

Экспериментальное исследование теплообмена в пучке труб при пульсациях потока

*А.И. Хайбуллина, А.Р. Хайруллин, Н.И. Сафиуллина, Д.М. Латыпова,
Е.Д. Трошина*

Казанский государственный энергетический университет

Аннотация: В работе проведено экспериментальное исследование влияния пульсаций потока на теплообмен в пучке труб. Экспериментальным путем получены закономерности теплообмена в пучке труб при пульсационном режиме течения потока. Максимальная интенсификация теплообмена составила 3,23 раза.

Ключевые слова: теплообмен, пульсационное течение, коридорный пучок труб, интенсификация теплообмена, кожухотрубный теплообменник.

Массогабаритные теплообменные аппараты широко используются во всех сферах промышленности. Масса теплообменного оборудования в составе теплосиловых установок может составлять львиную долю от общей массы установок. Поэтому эффективность установок в целом существенно зависит от эффективной работы теплообменного оборудования. Пути повышения эффективной работы теплообменных аппаратов тесно связаны с методами интенсификации теплообмена. Существуют различные методы интенсификации теплообмена: пассивные, активные, комбинированные [1–3]. Одним из методов интенсификации является пульсация потока, созданная преднамеренно. Пульсация потока относится к активным методам интенсификации теплообмена [4]. На сегодняшний день пульсации потока остаются менее изученными по сравнению с пассивными методами [5]. В данной работе проводится экспериментальное исследование теплообмена в пучке труб при пульсациях потока. Работ, в которых исследуется теплообмен пучков труб в условиях пульсирующих течений крайне мало, в основном работы посвящены одиночному цилиндру [6–8]. В большинстве работ пульсации имеют симметричный характер. В данной работе пульсации

потока имеют несимметричный характер. Такие пульсации показали свою эффективность по сравнению с симметричными пульсациями [9].

Экспериментальное исследование проводилось в коридорном пучке труб. Геометрические параметры пучка приведены на рис.1. Общий вид экспериментальной установки приведен на рис.2. В трубном пространстве циркулировала горячая вода. Необходимая температура воды поддерживалась электронагревательным котлом. В межтрубном пространстве циркулировала обогреваемая вода. Вода в межтрубном пространстве циркулировала по замкнутому контуру. Для поддержания стабильной температуры воды в межтрубном пространстве теплоноситель охлаждался в воздушном теплообменнике. Воздействию пульсаций подвергалась межтрубное пространство пучка труб. Пульсации создавались с помощью пульсатора, который представлял собой обечайку с расположенным в нем поршнем. Колебания поршня с заданной частотой и амплитудой осуществлялось посредством пневмоцилиндра. Управление временными характеристиками пневмоцилиндра, оснащенного пневмоклапанами, осуществлялось с компьютера.

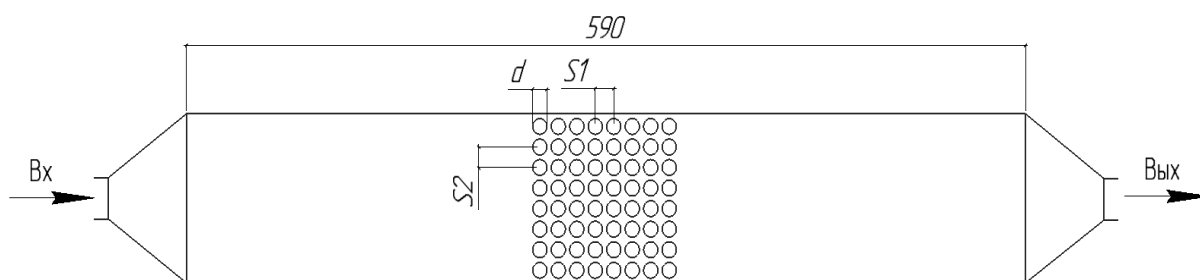


Рис. 1. – Схема расположения труб в теплообменнике: D – диаметр трубки, $D = 10$ мм; S_1, S_2 – шаг трубки; $S_1, S_2 = 13$ мм; количество трубок 64 (8x8)

Эксперимент по теплообмену проводился при стационарном течении с числом Рейнольдса $Re=500$ и числом Прандтля $Pr=5$. Режимные параметры пульсаций были следующие: частота $f = 1/T = 0,1-0,8$, Гц (где T –период пульсаций, с); амплитуда; $A/D = 0,4-10$ (где A –ход жидкости в обратном

направлении в пучке труб, m , D – диаметр трубки пучка); число Струхала $Sh = fD/u = 0,02-0,2$ (где u – скорость при стационарном течении, м/с); скважность пульсаций $\Psi = T_1/T = 0,35$ (где T_1 – первый полупериод пульсаций соответствующий обратному ходу жидкости в пучке труб, с). Относительный продольный и поперечные шаги пучка $S_{1,2}/D = 1,3$. Подробный расчет характеристик пульсационного течения приведен в работе. Отличием этой работы от предыдущих работ является применение более высоких частот и амплитуд пульсаций.



Рис. 2. – Экспериментальная установка

Теплоотдача пучка труб определялась косвенным методом по тепловому балансу, основному уравнению теплопередачи и по критериальному уравнению для расчета теплоотдачи внутри труб. Теплообмен при стационарном течении был сравнен с известным критериальным уравнением для коридорного пучка при числе Рейнольдса $Re < 1000$ [10]. Различия с критериальным уравнением составили 3%.

На рис.3 приведена зависимость увеличения интенсивности теплообмена от амплитуды пульсаций. По рис.3 видно, что с увеличением амплитуды пульсаций происходят повышения интенсивности теплообмена.

Как правило, при теплообмене с принудительными колебаниями потока увеличение амплитуды пульсаций пропорционально увеличению интенсивности теплообмена. Однако воздействие амплитуды на интенсификацию теплообмена снижается при превышении амплитуды пульсаций значения $A/D > 15$. Возможно, дальнейшее повышение амплитуды не будет приводить к повышению теплообмена. К сожалению, характеристики пульсационной системы, используемой в данной работе, не позволяли генерировать пульсации с амплитудами $A/D > 25$.

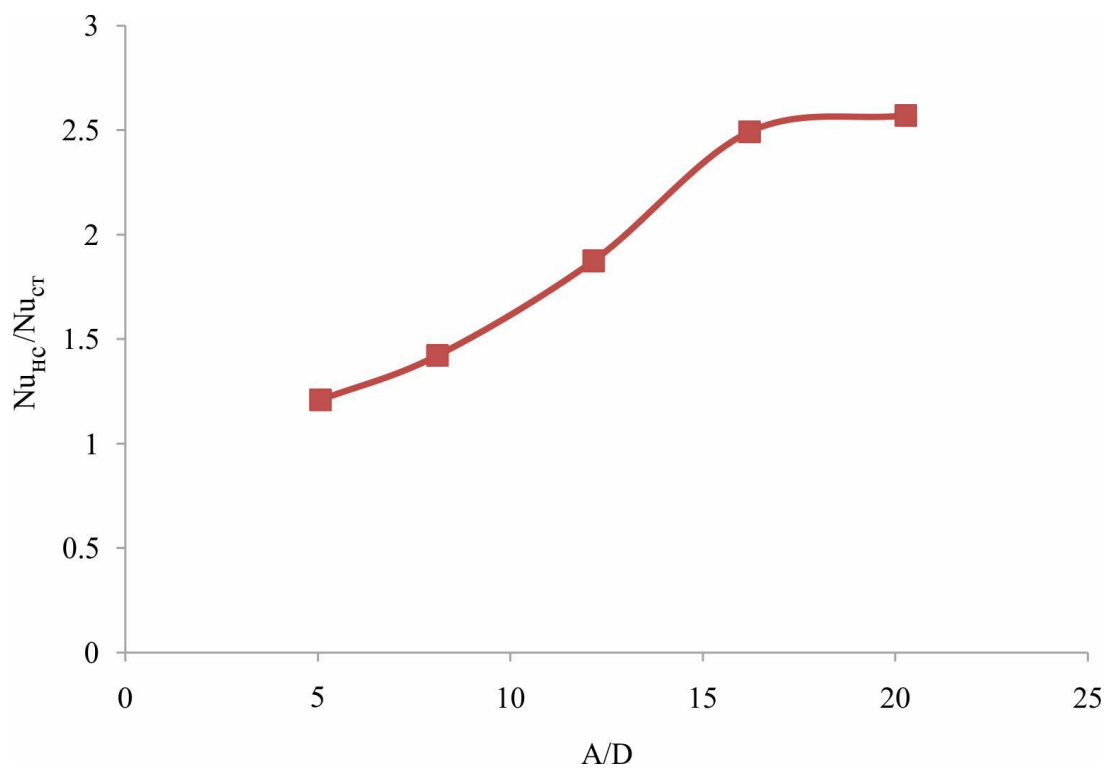


Рис. 3. – Зависимость Nu_{nc}/Nu_{st} от A/D , при $Sh = 0,064$, $\Psi = 0,35$

На рис.4 приведена зависимость прироста теплообмена в пульсационном течении, по сравнению со стационарным течением, в зависимости от числа Струхалия. Из работ других авторов известно, что теплоотдача в пульсирующих течениях с повышением частоты может как повышаться, так и понижаться. В данной работе получено повышение теплоотдачи пучка труб, в пульсирующем течении, во всем диапазоне частот пульсаций.

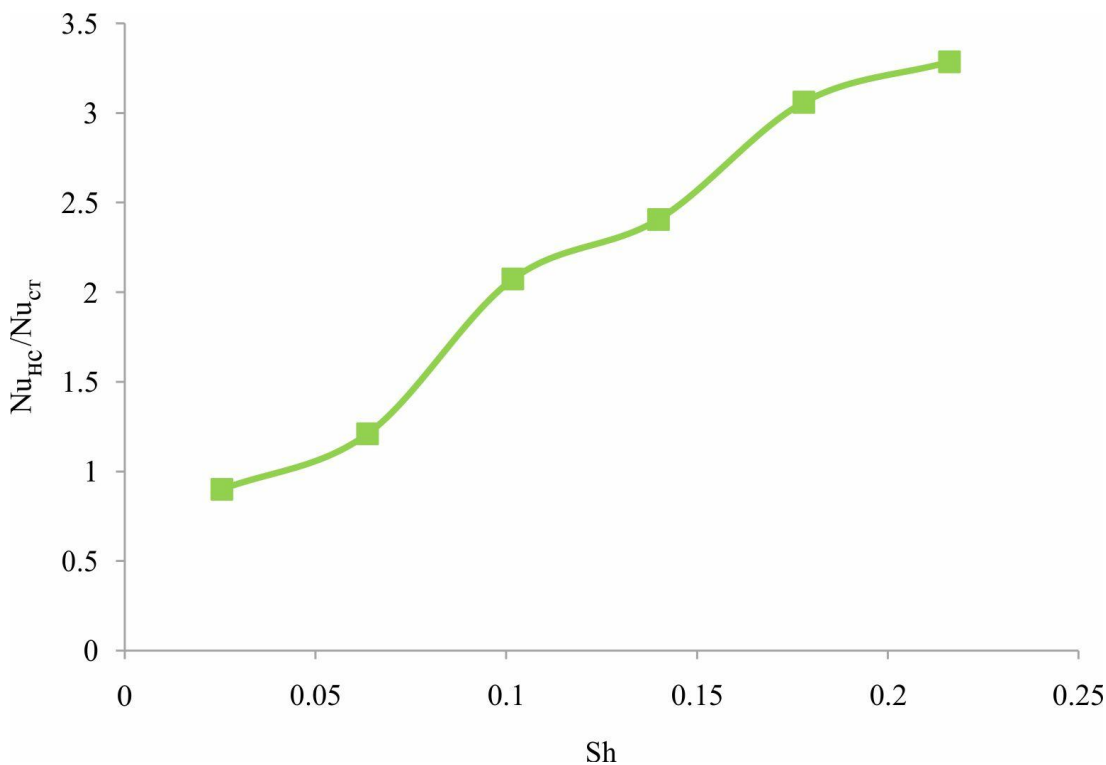


Рис. 4. – Зависимость Nu_{nc}/Nu_{ct} от Sh при $A/D = 5$, $\Psi = 0,35$

В данной работе показано, что несимметричные пульсации потока, созданные искусственно, приводят к интенсификации теплообмена коридорного пучка труб. Максимальная интенсификация теплообмена составила 3,23 раза.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-79-10136, rscf.ru/project/18-79-10136/.

Литература

1. Попов И.А., Махьянов Х.М., Гуреев В.М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Интенсификация теплообмена. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. 560 с.
2. Корниенко Ф.В. Увеличение эффективности испарительного конденсатора компрессионных холодильных машин // Инженерный вестник Дона, 2012, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/925.
3. Дресвянникова Е.В., Лекомцев П.Л., Савушкин А.В. Возможности регулирования процессов тепловлажностной обработки в массообменных

аппаратах при воздействии электрического поля // Инженерный вестник Дона, 2014, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2235.

4. Alam T., Kim M.H. A comprehensive review on single phase heat transfer enhancement techniques in heat exchanger applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, № 81, pp. 813-839.

5. Mohammad H. E., Mehdi B., Amirhesam T., Majid V. A critical review on pulsating flow in conventional fluids and nanofluids: Thermo-hydraulic characteristics // International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, № 120, URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0735193320303870](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0735193320303870).

6. Gnatowska R. Numerical analysis of oscillating flow around a cylinder // Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics, 2014, № 3., pp. 59-66.

7. Guoneng L., Youqu Z., Guilin H., Zhiguo Z., Yousheng X. Experimental Study of the Heat Transfer Enhancement from a Circular Cylinder in Laminar Pulsating Cross-flows // Heat Transfer Engineering, 2016, № 6. pp. 535-544.

8. Cheng C. H., Hong J. L., Aung W. Numerical prediction of lock-on effect on convective heat transfer from a transversely oscillating circular cylinder // International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, № 8. pp. 1825-1834.

9. Ilyin V.K, Sabitov L.S., Haibullina A.I., Hayrullin A.R. External heat transfer in corridor and staggered tube bundles of different configuration under the application of low-frequency pulsations // IOP Conf. Ser.: Mater, 2017, № 1, URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/240/1/012027.

10. Жукаускас А., Макарявичюс В., Шланчяускас А. Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке жидкости. Вильнюс: Изд. Мокслас, 1968. 192 с.

References

1. Popov I. A., Makhyanov KH. M., Gureyev V. M. Fizicheskiye osnovy i promyshlennoye primeneniye intensivifikatsii teploobmena. Intensifikatsiya



teploobmena [Physical foundations and industrial application of heat transfer intensification. Heat transfer intensification]. Kazan: Tsentr innovatsionnykh tekhnologiy, 2009, 560 p.

2. Korniyenko F.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/925.

3. Dresvyannikova E.V., Lekomtsev P.L., Savushkin A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2235.

4. Alam T., Kim M.H. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, № 81, pp. 813-839.

5. Mohammad H. E., Mehdi B., Amirhesam T., Majid V. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, № 120, URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0735193320303870](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0735193320303870).

6. Gnatowska R. Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics, 2014, № 3., pp. 59-66.

7. Guoneng L., Youqu Z., Guilin H., Zhiguo Z., Yousheng X. Heat Transfer Engineering, 2016, № 6. pp. 535-544.

8. Cheng C. H., Hong J. L., Aung W. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, № 8. pp. 1825-1834.

9. Ilyin V.K, Sabitov L.S., Haibullina A.I., Hayrullin A.R. IOP Conf. Ser.: Mater, 2017, № 1, URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/240/1/012027.

10. Zhukauskas A., Makaryavichyus V., Shlanchyauskas A. Teplootdacha puchkov trub v poperechnom potoke zhidkosti. [Heat transfer of tube bundles in the cross flow of fluid], Vil'nyus: Izd. Mokslas. 1968. 192 p.