

## Теплогидравлическая эффективность пакета труб в условиях наложенных пульсаций потока

*А.Р. Хайруллин, А.И. Хайбуллина*

*Казанский государственный энергетический университет*

**Аннотация:** При выборе метода интенсификации оценка теплогидравлической эффективности является важным критерием. В данной работе проведена оценка теплогидравлической эффективности пульсационного метода интенсификации теплообмена применительно к коридорному пакету труб. Теплогидравлическая эффективность оценивалась путем сопоставления отношения прироста числа Нуссельта к приросту коэффициента гидравлического сопротивления в пульсационном течении по сравнению со стационарным течением. Коэффициент гидравлического сопротивления определялся путем численного моделирования в AnsysFluent. Результаты численного исследования показали, что увеличение произведения амплитуды пульсаций и числа Струхала приводит к понижению теплогидравлической эффективности при всех значениях числа Рейнольдса, при этом теплогидравлическая эффективность выше при минимальных значениях числа Рейнольдса.

**Ключевые слова:** Фактор аналогий Рейнольдса, пульсация потока, интенсификация теплообмена, теплогидравлическая эффективность.

В составе промышленных установок широко применяются крупногабаритные теплообменные аппараты, основными элементами которых являются обтекаемые пакеты труб. Повышение энергетической эффективности и компактности теплообменников напрямую зависит от применяемых методов интенсификацией теплообмена [1-3]. Для интенсификации теплообмена применяются пассивные и активные методы. К пассивным методам относят такие методы, при которых не происходит дополнительного подвода энергии. Например, использование различных вставок, внутрь теплообменной поверхности, для турбулизации и дополнительного перемешивания потока. Изменение поверхности теплообмена (выступы, накатки, шероховатости) с целью усложнения структуры потока [4]. При активных методах необходим дополнительный подвод энергии извне. Одним из распространенных методов является пульсация или осцилляция потока [5]. Несмотря на то, что пульсация потока

---

или нестационарное течение может возникать самопроизвольно в элементах теплообменного оборудования, пульсация потока также может генерироваться преднамеренно с целью повышения эффективности теплообмена.

Искусственная генерация колебаний потока в элементах различных теплообменных устройств исследовалось многими авторами. При этом количество работ продолжает расти [6]. Усиление теплопередачи в пучках труб может увеличиваться пропорционально амплитуде и частоте пульсаций [7-9]. Однако с интенсификацией теплообмена, также увеличивается гидравлическое сопротивление. Поэтому любая интенсификация теплообмена, за счет наложенных пульсаций потока, должна сопоставляться с ростом мощностей, требуемых на прокачку теплоносителей через теплообменное оборудование. При этом необходимо нахождение оптимальных режимов пульсаций с максимальной эффективностью, которая зависит не только от режимов пульсаций, но и от геометрии теплообмена.

Эффективность выбранного метода интенсификации теплообмена можно оценить с помощью теплогидравлической эффективности [1,4,8], когда сопоставляется рост интенсификации теплообмена и гидравлическое сопротивление. На сегодняшний день теплообмен при применении пульсационного метода интенсификации в пучках труб изучен не достаточно [10], тем более, крайне мало работ, в которых оценивается теплогидравлическая эффективность данного метода.

В данной работе выполнена теплогидравлическая оценка пульсационного метода интенсификации в коридорном пучке при наличии несимметричных колебаний потока. Для оценки интенсификации теплообмена, при пульсациях потока в коридорном пучке, были взяты данные полученные в работе [10]. Данные по гидравлическому

---

сопротивлению были получены в рамках данной работы, в результате численного моделирования.

Для возможности сопоставления результатов полученных в данной работе с результатами полученными в [10] численное моделирование проводилось при тех же параметрах, что и в работе [10].

Расчетная область представляла собой семь рядов трубок по длине и два полуцилиндра по высоте, с относительным продольным и поперечным шагом 1,3. Число Рейнольдса  $Re$  принимало значение 1000, 1200, 1400, 1600, 2000, число Струхалия  $Sh$  0,772, 1,019, 1,266, 1,513. Амплитуда наложенных пульсаций  $A/D$  принимала значения 1, 1,5, 2. Вынужденные пульсации имели несимметричный характер. В качестве рабочей среды принималась вода при числе Прандтля 7,2. Расчеты выполнялись в AnsysFluent. Подробные детали математической модели приведены в работе [10].

На рис. 1,2 приведен рост числа Нуссельта и коэффициента гидравлического сопротивления в пульсационном течении с увеличением числа Струхалия, где  $Nu_p$ ,  $\xi_p$  и  $Nu_{st}$ ,  $\xi_{st}$  число Нуссельта и коэффициент гидравлического сопротивления в пульсационном и стационарном течении, соответственно.

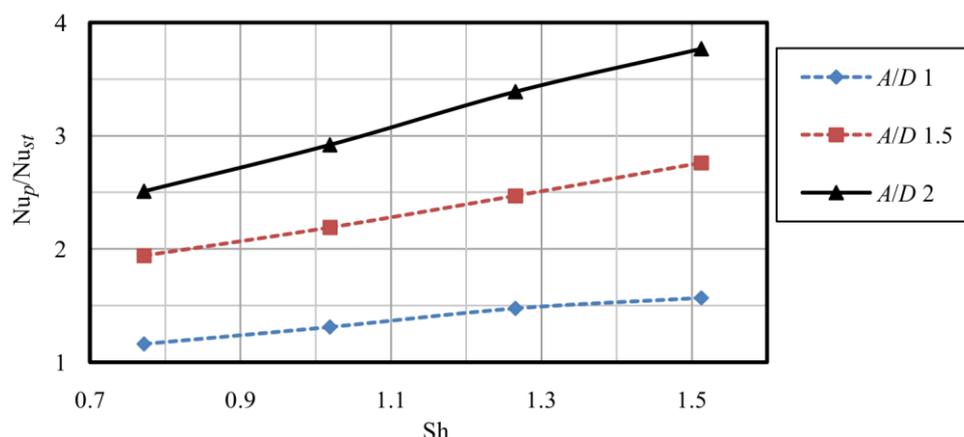


Рис. 1. – Отношение числа Нуссельта в пульсационном течении к стационарному течению с увеличением числа Струхалия при числе Рейнольдса 1400.

Как видно по рис. 1 увеличение теплообмена в пульсационном течении пропорционально увеличению числа Струхалья. При максимальной амплитуде наложенных пульсаций число Нуссельта в пульсационном течении увеличивается с 2,5 до 3,76 раза при увеличении числа Струхалья от 0,772 до 1,513, соответственно.

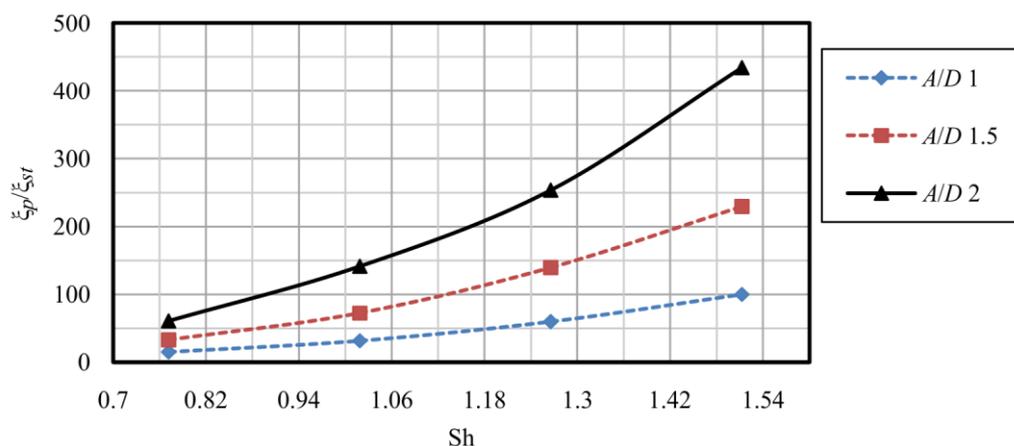


Рис. 2. – Отношение коэффициента гидравлического сопротивления в пульсационном течении к стационарному течению с увеличением числа Струхалья при числе Рейнольдса 1400.

На рис. 3 приведена теплогидравлическая эффективность пульсационного метода с увеличением числа Струхалья, оцененного через фактор аналогий Рейнольдса (ФАР) [1]. Данный критерий применяется для оценки эффективности метода интенсификации. ФАР определялся, как отношение прироста числа Нуссельта к приросту коэффициента гидравлического сопротивления в пульсационном течении по сравнению со стационарным течением. Как видно по рис. 3, ФАР снижается с увеличением числа Струхалья. Например, при амплитуде 1 и числе Струхалья 0,772 ФАР соответствовал 0,078, с увеличением числа Струхалья до 1,513 ФАР снизился до 0,016. Несмотря на то, что с увеличением числа Струхалья происходит значительная интенсификация теплообмена, рост потерь давления более значителен, что приводит к снижению ФАР.

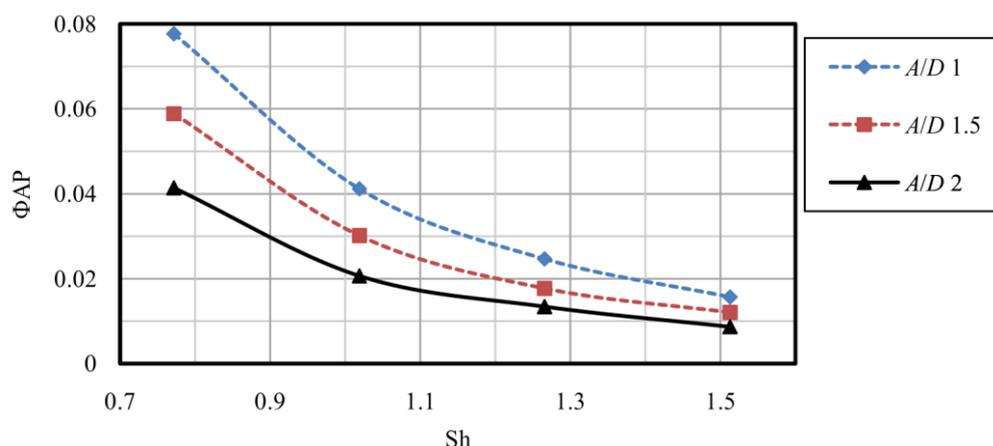


Рис. 3. – Теплогидравлическая эффективность с увеличением числа Струхалия при числе Рейнольдса 1400.

На рис. 4,5 приведен рост числа Нуссельта и коэффициента гидравлического сопротивления в пульсационном течении с увеличением амплитуды пульсаций. Также как и с увеличением числа Струхалия при увеличении интенсивности амплитуды происходит повышение числа Нуссельта и коэффициента гидравлического сопротивления. По рис. 6 видно, что ФАР снижается с увеличением амплитуды пульсаций. Влияние амплитуды на теплогидравлическую эффективность уменьшается с повышением числа Струхалия.

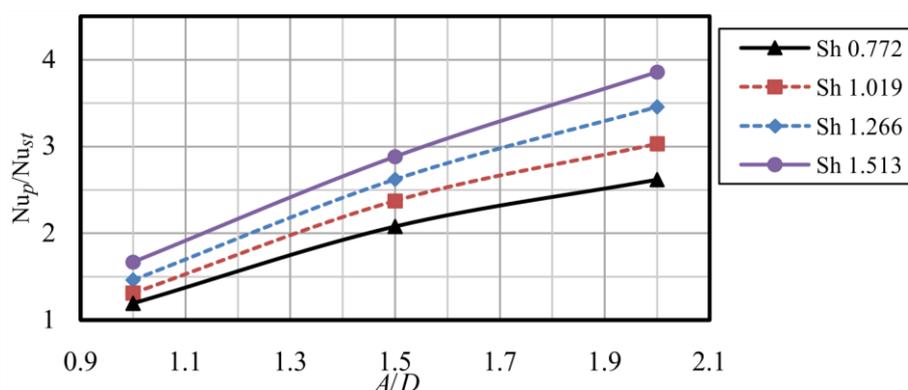


Рис. 4. – Отношение числа Нуссельта в пульсационном течении к стационарному течению с увеличением амплитуды пульсаций при числе Рейнольдса 1000.

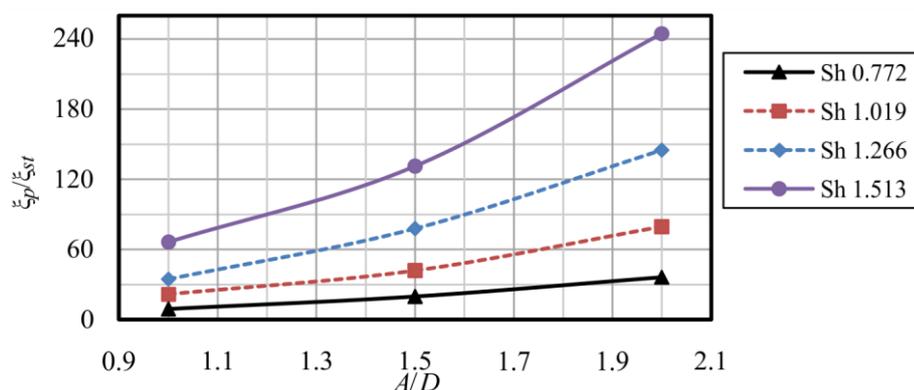


Рис. 5. – Отношение коэффициента гидравлического сопротивления в пульсационном течении к стационарному течению с увеличением амплитуды пульсаций при числе Рейнольдса 1000.

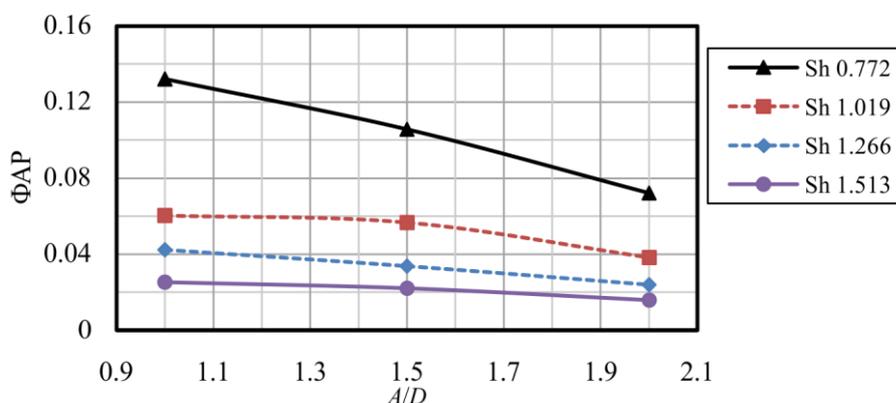


Рис. 6. – Теплогидравлическая эффективность с увеличением амплитуды при числе Рейнольдса 1000.

На рис. 7 показана теплогидравлическая эффективность в зависимости от произведения амплитуды пульсаций и числа Струхалия для всего диапазона исследований. Как видно по рис. 7, увеличение произведения амплитуды пульсаций и числа Струхалия приводит к понижению ФАР при всех значениях числа Рейнольдса, при этом ФАР выше при минимальных значениях числа Рейнольдса. Влияние пульсаций на ФАР становится менее выраженным при увеличении числа Рейнольдса. Максимальное значение ФАР 0,13 наблюдалась при минимальных значениях числа Рейнольдса, амплитуды и числа Струхалия в исследованном диапазоне.

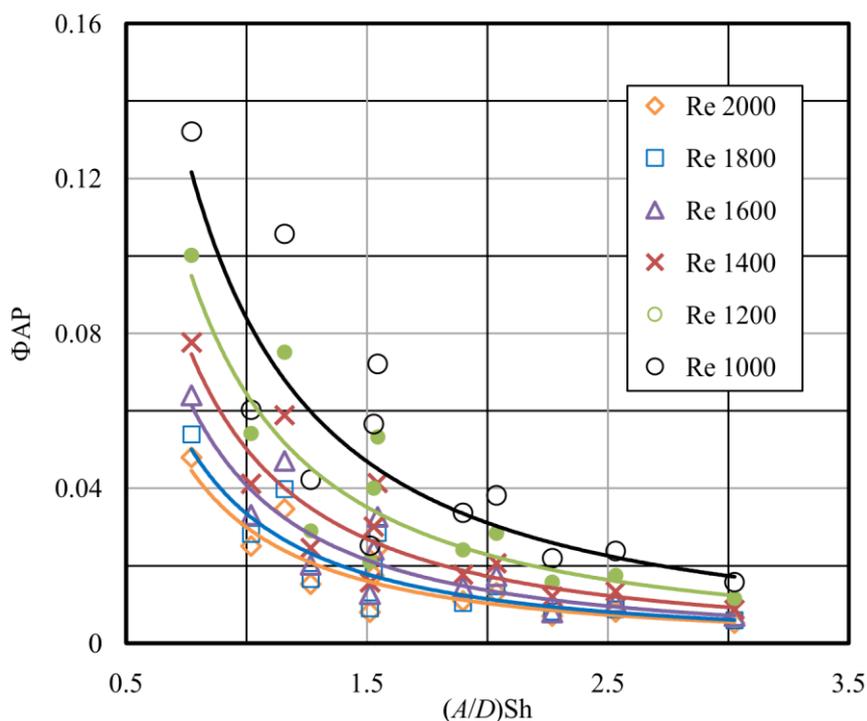


Рис. 7. – Теплогидравлическая эффективность с увеличением произведения амплитуды пульсаций и числа Струхала.

*«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда 23-29-00845, [rscf.ru/project/23-29-00845/](https://rscf.ru/project/23-29-00845/)».*

### 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. 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](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2235).
3. Корниенко Ф.В. Увеличение эффективности испарительного конденсатора компрессионных холодильных машин // Инженерный вестник Дона. 2012. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/925](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/925).

4. Maradiya C., Vadher J., Agarwal R. The heat transfer enhancement techniques and their Thermal Performance Factor // Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences. 2018. Vol. 7. № 1. pp. 1–21.

5. Ye Q., Zhang Y., Wei J. A comprehensive review of pulsating flow on heat transfer enhancement // Appl. Therm. Eng. 2021. Vol. 196. URL: doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117275.

6. Hemmat Esfe M. Bahiraei M., Torabi A., Valadkhani M. A critical review on pulsating flow in conventional fluids and nanofluids: Thermo-hydraulic characteristics // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 120. URL: doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104859.

7. Mulcahey T.I., Pathak M.G., Ghiaasiaan S.M. The effect of flow pulsation on drag and heat transfer in an array of heated square cylinders // International Journal of Thermal Sciences. 2013. Vol. 64. pp. 105–120.

8. Хайбуллина А.И., Хайруллин А.Р., Синявин А.А. Теплогидравлическая эффективность пористых сред в потоке воздуха и воды при симметричных и несимметричных пульсациях // Инженерный вестник Дона. 2022. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2022/7561.

9. Pathak M.G., Ghiaasiaan S.M. Thermal Dispersion and Convection Heat Transfer during Laminar Transient Flow in Porous Media // International Journal of Thermal Sciences. 2011. Vol. 50. pp. 440–448.

10. Хайбуллина А.И., Хайруллин А.Р. Численное исследование теплообмена в коридорном пучке труб в условиях пульсирующего потока жидкости // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2019. № 4. С. 12-21.

### References

1. Popov I. A., Makhyanov KH. M., Gureyev V. M. Fizicheskiye osnovy i promysh-lennoye primeneniye intensivatsii teploobmena. Intensifikatsiya teploobmena [Physical foundations and industrial application of heat transfer



intensification. Heat transfer intensification]. Kazan: Tsentr innovatsionnykh tekhnologiy. 2009. 560 p.

2. Dresvyannikova E.V. Lekomtsev P.L., Savushkin A.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2014. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2235](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2235).

3. Korniyenko F.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/925](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/925).

4. Maradiya C., Vadher J., Agarwal R. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences. 2018. Vol. 7. № 1. pp. 1–21.

5. Ye Q., Zhang Y., Wei J. Appl. Therm. Eng. 2021. Vol. 196 URL: [doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117275](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117275).

6. Hemmat Esfe M. Bahiraei M., Torabi A., Valadkhani M. Int. Commun. Heat Mass Transf. 2021. Vol. 120. URL: [doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104859](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104859).

7. Mulcahey T.I., Pathak M.G., Ghiaasiaan S.M. Int. J. Therm. Sci. 2013. Vol. 64. pp. 105-120.

8. Haibullina A.I., Khairullin A.R., Sinyavin A.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2022/7561](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2022/7561).

9. Pathak M.G., Ghiaasiaan S.M. Int. J. Therm. Sci. 2011. Vol. 50. pp. 440-448.

10. Haibullina A.I., Khairullin A.R. Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. 2019. № 4. С. 12-21.