

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

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ПУЧКЕ ТРУБ ПРИ СИММЕТРИЧНЫХ И НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПУЛЬСАЦИЯХ ПОТОКА

Хайруллин А.Р., Хайбуллина А.И.

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

**Аннотация.** В данной работе проведено экспериментальное исследование теплообмена в коридорном пучке труб в условиях возвратно поступательных пульсаций потока. Закономерности теплообмена исследованы для течения капельной жидкости, при числе Рейнольдса в диапазоне от 1200 до 2400 и числе Прандтля 4. Относительная безразмерная амплитуда пульсаций, отнесенная к диаметру трубки пучка, находилась в диапазоне от 5 до 15, частота пульсаций от 0,18 Гц до 0,45 Гц. Несимметричность пульсаций характеризовалась скважностью пульсаций и рассчитывалась как отношение первого полупериода пульсаций к общему периоду пульсаций. Скважность пульсаций находилась в диапазоне от 0,2 до 0,5. Результаты показали, что пульсация потока приводит к увеличению интенсивности теплообмена в пучке труб.

**Ключевые слова:** теплообмен, экспериментальное исследование, пульсирующее течение, пучок труб

## EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER IN A BUNDLE OF PIPES WITH SYMMETRIC AND ASYMMETRIC FLOW PULSATIONS

Hayrullin A. R., Haibullina A.I.

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

**Annotation.** In this paper, an experimental study of heat transfer in an inline tube bundle under conditions of reciprocating pulsations of the flow is carried out. The heat transfer was investigated for the water flow, with the Reynolds number in the range from 1200 to 2400 and the Prandtl number 4. The relative dimensionless amplitude of pulsations related to the diameter of the tube bundle was in the range from 5 to 15, the pulsation frequency from 0.18 Hz to 0.45 Hz. The asymmetry of pulsations was characterized by the duty cycle of pulsations and was calculated as the ratio of the first half-period of pulsations to the total period of pulsations. The duty cycle was in the range from 0.2 to 0.5. The results showed that flow pulsation leads to an increase in the intensity of heat transfer in the tube bundle.

**Keywords:** heat transfer, experimental study, pulsating flow, tube bundle

### ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестно, что теплообменные аппараты влияют на технико-экономические показатели промышленных установок. Масса теплообменного оборудования в составе промышленных установок составляет львиную долю от массы установок в целом. Отсюда следует, что повышение эффективности процессов теплообмена может привести к энерго- и ресурсосбережению. Повышение энергоресурсоэффективности теплообменных аппаратов тесно связано с исследованиями современных методов интенсификации теплообмена. Одним из методов интенсификации теплообмена является вынужденная пульсация потока.

Пульсации потока рассматривались многими исследователями [2, 3]. Положительные результаты при применении пульсационного потока в трубе круглого сечения [4–6] и обтекании одиночного цилиндра [7–9] показывают возможность применения пульсаций для интенсификации теплообмена в трубчатых теплообменных аппаратах.

Пульсирующие течение капельной жидкости в пучках труб были исследованы экспериментальным методом в работах [10–12]. Авторами проанализиро-

вана гидродинамическая картина течения в различных компоновках пучков труб. Влияние пульсаций на теплообмен не проводилась. В работе [13] исследовалась теплоотдача коридорного пучка труб численным методом. Авторы установили, что увеличение теплоотдачи цилиндра первого и второго ряда, связанного с феноменом резонанса вихрей. Интенсификации теплообмена для остальных рядов при вынужденных пульсациях не наблюдалось. В ряде исследований [14, 15] показано, что вынужденная нестационарность, наложенная на поток воздуха приводит к увеличению теплоотдачи пучков труб.

Теплообменные аппараты с трубными пучками широко распространены в составе промышленных установок. Несмотря на то, что возможность интенсификации теплообмена при вынужденных пульсациях потока показана во многих работах [2, 3], исследования теплообмена в пучках труб при пульсирующих течениях ограничены. При этом пульсации в имеющихся работах имеют ограниченную амплитуду и симметричный характер пульсаций. Эффективность несимметричных пульсаций с возвратно-поступательными пульсациями показано в работах авторов [16, 17].

В данной работе проведено экспериментальное исследование теплообмена в коридорном пучке в условиях возвратно поступательных пульсаций потока симметричного и несимметричного характера.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования пульсирующих течений в пучке труб проводились на испытательном теплообменнике, который представляет собой прямоугольный канал. По центру канала перпендикулярно потоку расположен пучок труб. Количество рядов труб в пучке по ходу жидкости и в поперечном направлении восемь. Диаметр трубок 10 мм, относи-

тельный продольный и поперечный шаг 1,3. Интегральные характеристики внешней теплоотдачи всего пучка труб оценивались по тепловому балансу и уравнению теплопередачи. Теплоотдача внутри трубок определялась по известному критериальному уравнению [18] при гидродинамическом режиме с числом Рейнольдса  $Re > 10000$ . Тепловой баланс определялся по измеренным расходам теплоносителей и их температурам на входе и выходе из межтрубного и трубного пространства пучка труб.

Для создания низкочастотных несимметричных пульсаций, с возвратно-поступательным движением жидкости, используется пульсатор (устройство для

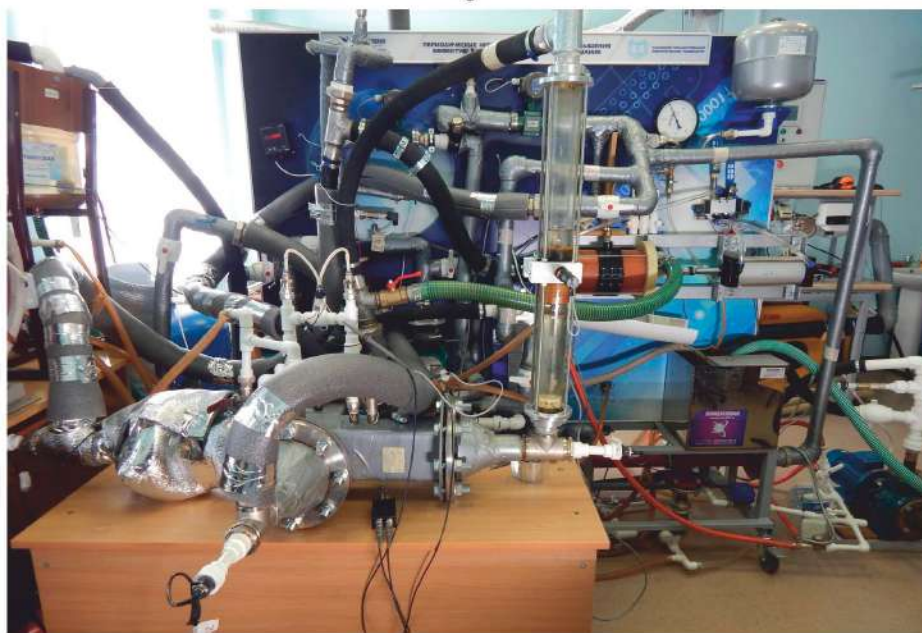
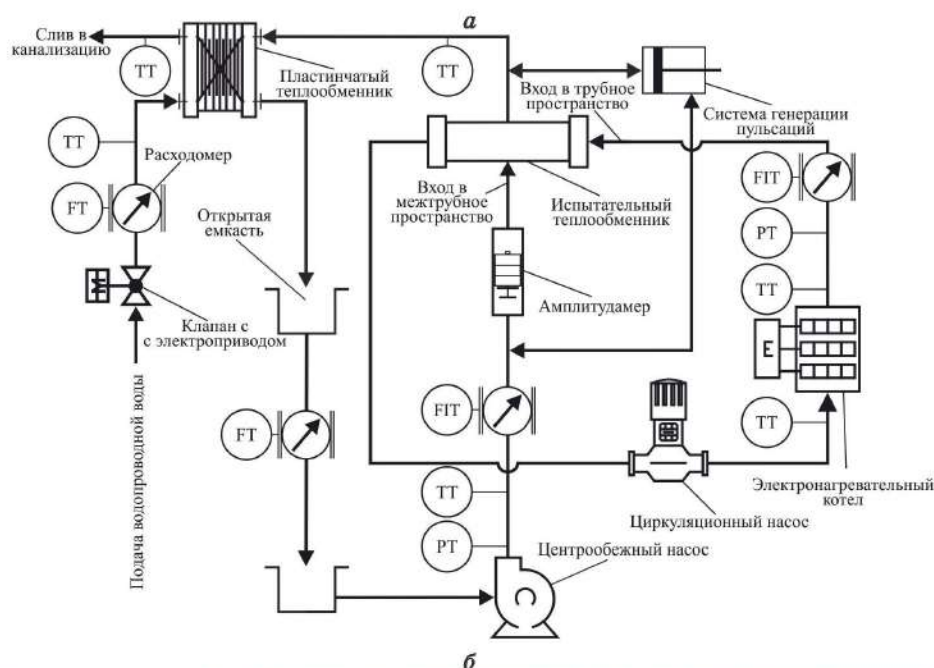


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования пульсирующих течений: а) схема; б) фотография



передачи колебаний от системы генерации пульсаций к теплоносителю в испытательном теплообменнике). Пульсатор представляет собой обечайку с расположенным в нем поршнем. Пульсатор соединен общим штоком с пневмоцилиндром, который также имеет поршень. Движение поршня пульсатора с заданной амплитудой, частотой и скважностью осуществляется попеременной подачей сжатого воздуха в поршневую и штоковую полость пневмоцилиндра за счет контрольно-регулирующей пневмоаппаратуры. Следует отметить, что пульсатор с данным принципом работы позволяет генерировать характер пульсаций не исследованный в научной литературе, не только в пучках труб, но и на других теплопередающих поверхностях.

Управления контрольно-регулирующей аппаратурой осуществляется с компьютера посредством интерфейса связи RS-485. Для подачи сжатого воздуха используется поршневой компрессор. Пульсации в данном исследовании имеют возвратно поступательный характер. Амплитуда пульсаций  $A$  это обратный ход (расстояние) жидкости в пучке труб. В относительных величинах  $A/D$ , где  $D$  диаметр трубки пучка. Для определения амплитуды пульсаций, на входе в межтрубное пространство, установлен амплитудомер. Вертикально установленный, амплитудомер представляет собой прозрачную трубу, с расположенным внутри обратным клапаном. Клапан пропускает поток в прямом направлении и не пропускает в обратном. Амплитуда фиксируется по смещению обратного клапана вверх по трубе, что характеризует разворот жидкости в пучке. Смещение обратного клапана вверх по трубе, соответствует первому полупериоду пульсаций. Далее следует второй полупериод пульсаций, здесь поток вновь разворачивается и движется в прямом направлении.

Схема работы экспериментальной установки и ее общий вид представлены на рис. 1. Вынужденные пульсации потока накладываются на межтрубное пространство испытательного теплообменника. Греющий теплоноситель циркулирует в трубном пространстве, обогреваемый теплоноситель в межтрубном пространстве. Отвод тепла от обогреваемого теплоносителя осуществляется водопроводной водой посредством пластинчатого теплообменника.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Закономерности теплообмена исследованы для течения каплярной жидкости, при числе Рейнольдса  $Re$  в диапазоне от 1200 до 2400 и числе Прандтля 4. Относительная безразмерная амплитуда пульсаций  $A/D$ , отнесенная к диаметру трубки пучка, находилась в диапазоне от 5 до 15, частота пульсаций  $f$  от 0,18 Гц до 0,45 Гц. Скважность пульсаций  $\psi$  находилась в диапазоне от 0,2 до 0,5.

Частота пульсаций  $f$  определялась по формуле

$$f = \frac{1}{T} \text{ Гц,}$$

где  $T$  – период пульсаций, который рассчитывался по формуле

$$T = T_1 + T_2 \text{ с,}$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – первый и второй полупериод пульсаций соответственно. Скважность пульсаций  $\psi$  рассчитывалась следующим образом

$$\psi = \frac{T_1}{T}.$$

Число Рейнольдса, как при стационарном, так и при пульсационном течении, находилось по следующей формуле

$$Re = \frac{uD}{\nu},$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость при средней температуре воды в межтрубном пространстве пучка труб,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $u$  – скорость потока воды по самому узкому сечению межтрубного пространства пучка труб,  $\text{м}/\text{с}$ . Осредненный расход жидкости в межтрубном пространстве, при пульсирующем течении, устанавливался равным стационарному. Таким образом, число Рейнольдса при стационарном и пульсационном течении были равны.

Внешняя теплоотдача пучка труб, для стационарного течения, верифицирована по критериальному уравнению А.А. Жукаускаса [19], для коридорного пучка труб при числе Рейнольдса  $Re > 1000$ . Отклонение экспериментальных данных с уравнением А.А. Жукаускаса, в диапазоне числа Рейнольдса от 1200 до 2400, в среднем составило 13 %.

На рис. 2 показан эффект амплитуды пульсаций на теплоотдачу пучка труб при частоте пульсаций  $f = 0,18$  Гц и числе Рейнольдса 1200. Как видно по рис. 2 увеличение безразмерной амплитуды приводит к росту числа Нуссельта  $Nu$ , как при симметричных, так и

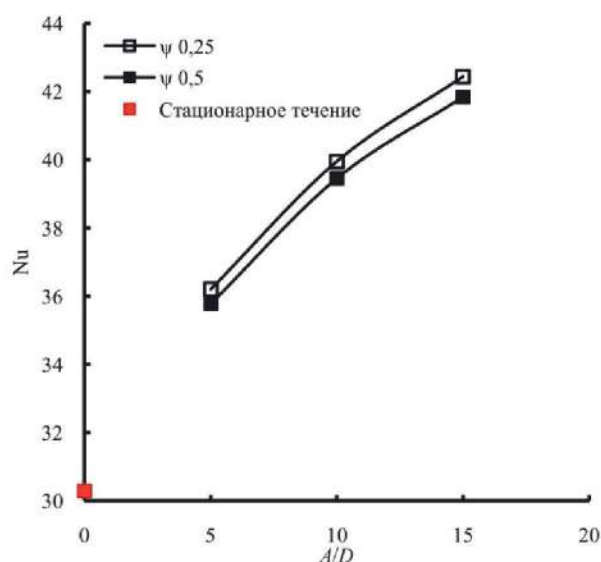


Рис. 2. Зависимость числа Нуссельта от амплитуды пульсаций при частоте пульсаций  $f = 0,18$  Гц и числе Рейнольдса  $Re = 1200$

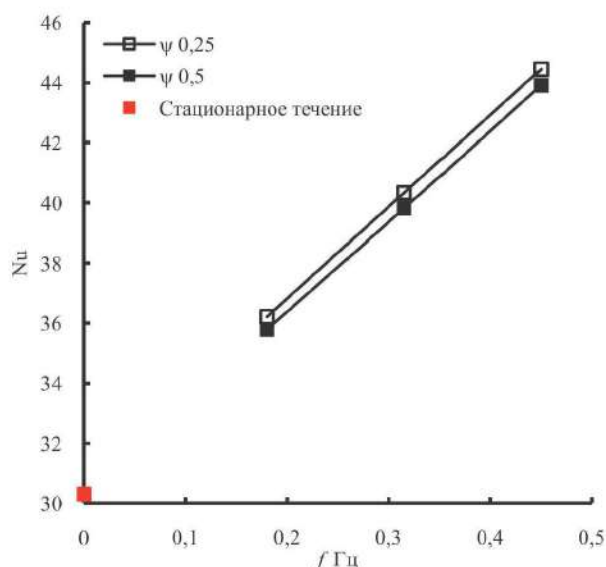


Рис. 3. Зависимость числа Нуссельта от частоты пульсаций при амплитуде пульсаций  $A/D = 5$  и числе Рейнольдса  $Re = 1200$

несимметричных пульсациях. Число Нуссельта  $Nu$ , при максимальной амплитуде, увеличивается на 40 % и 38 % при несимметричных и симметричных пульсациях соответственно.

На рис. 3 показано влияние частоты пульсаций на интенсификацию теплообмена при фиксированной амплитуде  $A/D = 5$  и числе Рейнольдса  $Re = 1200$ . Увеличение частоты пульсаций приводит к повышению интенсивности теплообмена пучка, при этом влияние роста частоты выше роста амплитуды. С ростом частоты  $f$  до 4,5 Гц число Нуссельта  $Nu$  при пульсационном течении выше стационарного на 47 % и 45 % при несимметричных и симметричных пульсациях соответственно.

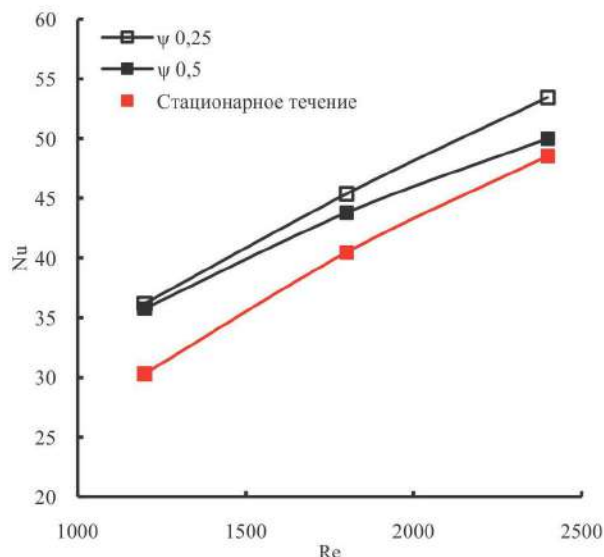


Рис. 4. Зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса при частоте пульсаций  $f = 0,18$  Гц и амплитуде пульсаций  $A/D = 5$

На рис. 4 показана зависимость числа Нуссельта  $Nu$  от числа Рейнольдса  $Re$  при частоте пульсаций  $f = 0,18$  Гц и амплитуде  $A/D = 5$ . Как видно по рис. 4 с увеличением числа Рейнольдса  $Re$ , как при стационарном течении, так и при пульсационном течении происходит повышение внешней теплоотдачи пучка труб. Степень интенсификации теплообмена снижается с увеличением числа Рейнольдса  $Re$ . Разница между симметричными и несимметричными пульсациями также увеличивается с ростом числа Рейнольдса  $Re$ . Когда число Рейнольдса  $Re$  было 1200, разница между двумя типами пульсаций была незначительна, число Нуссельта  $Nu$  при симметричных пульсациях увеличилось на 18 %, при несимметричных пульсациях на 19 %. С увеличением числа Рейнольдса  $Re$  до 2400, увеличение числа Нуссельта  $Nu$  составило 3 % и 10 % для симметричных и несимметричных пульсаций соответственно.

## ВЫВОДЫ

Результаты экспериментальных исследований показали, что пульсационное течение может приводить к существенной интенсификации теплообмена в зависимости от режима пульсаций. Выявлена положительная взаимосвязь между интенсивностью пульсаций и внешней теплоотдачей коридорного пучка труб. Как с повышением частоты, так амплитуды пульсаций теплоотдача пучка труб возрастает. Скважность пульсаций, также оказывает влияние на теплоотдачу пучка труб. Увеличение несимметричности пульсаций приводит к повышению теплоотдачи. С увеличением интенсивности стационарного течения прирост теплоотдачи в пульсационном течении уменьшается. Максимальная интенсификация теплообмена наблюдается при числе Рейнольдса 1200 и режиме пульсаций соответствующей максимальной частоте и амплитуде пульсаций.

*Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 23-29-00845, <https://www.rscf.ru/project/23-29-00845/>»*

## Список литературы

1. 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.
2. 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.appltherm.2021.117275
3. Herman, C. The impact of flow oscillations on convective heat transfer // Annu. Rev. Heat Transf. 2000. Vol. 11. P. 495–561.
4. Badr H.M. Effect of free-stream fluctuations on laminar forced convection from a straight tube // Int. J. Heat Mass Trans. 1997. Vol. 40. P. 3653–3662.
5. Zontul H., Şahin B. Experimental investigation of convective heat transfer performance and hydrodynamics of pulsating



- flow through the rectangular grooved channel // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2023. Vol. 141. URL: doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2022.110796.
6. Haibullina A.I., Hayrullin A.R. Heat Transfer in Pulsating Laminar Flow in a Pipe: Evaluation of the Reduction in the Heat Exchange Area of Oil Cooler // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2022. No. 4. Vol. 988. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/988/4/042038
  7. Gaheen O.A. [и др.]. Experimental investigation on the convection heat transfer enhancement for heated cylinder using pulsated flow // *Therm. Sci. Eng. Prog.* 2021. Vol. 26. URL: doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101055
  8. Gnatowska R. Numerical analysis of oscillating flow around a cylinder // *J. Appl. Comput. Mech.* 2014. No. 3. Vol. 13. P. 59–66.
  9. Mikheev N.I., Molochnikov V.M., Mikheev A.N., Dushina O.A. Hydrodynamics and heat transfer of pulsating flow around a cylinder // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2017. Vol. 109. P. 254–265.
  10. Konstantinidis E., Balabani S., Yianneskis M. Relationship between vortex shedding and heat transfer: implications for tube bundles in cross-flow // *Chem. Eng. Res. Des.* 2003. Vol. 81. P. 695–699.
  11. Konstantinidis E., Balabani S., Yianneskis M. Phase-average mean flow and turbulence structure in a staggered cylinder array subjected to pulsating cross-flow // *J. Fluids Eng. Trans. ASME.* 2004. Vol. 126. P. 323–336.
  12. Konstantinidis E., Castiglia D., Balabani S., Yianneskis M. On the flow and vortex shedding characteristics of an in-line tube bundle in steady and pulsating crossflow // *Chem. Eng. Res. Des.* 2000. Vol. 78. No. 8. P. 1129–1138.
  13. Liang C., Papadakis G. Study of the Effect of Flow Pulsation on the Flow Field and Heat Transfer Over an Inline Cylinder Array Using LES // *Engineering Turbulence Modelling and Experiments.* 2005. Vol. 6. P. 813–822.
  14. Molochnikov V.M., Mikheev A.N., Aslaev A.K., Dushina O.A., Paereliy A.A. Heat transfer of a tube bundle in a pulsating flow // *Therm. and Aeromechanics.* 2019. Vol. 26, No. 4. P. 519–529.
  15. Molochnikov V.M., Mikheev A.N., Goltsman A.E., Paereliy A.A., Aslaev A.K. Flow structure between the tubes and heat transfer of a tube bundle in pulsating flow // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. Vol. 1105. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1105/1/012024.
  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. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/240/1/012025
  17. Ilyin V.K., Haibullina A.I., Hayrullin A.R., Sabitov L.S. Factors influencing on the thermal flow with the cross-section of the corridor tube bundle in low-frequency non-symmetric pulsations // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2017. Vol. 240. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/240/1/012026
  18. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Учебное пособие для вузов К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков / Под ред. чл.-кор. АН СССР П.Г. Романкова. 10-е изд., перераб и доп. Л.: Химия. 1987. 576 с.
  19. Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке жидкости / А.А. Жукаускас, Макарявичюс В.И., Шланяускас А.А. Вильнюс: Изд. Мокслас. 1968. 192 с