

УДК 536.24

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В КОРИДОРНОМ ПУЧКЕ ТРУБ В УСЛОВИЯХ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ПОТОКА ЖИДКОСТИ<sup>1</sup>

А.И. ХАЙБУЛЛИНА, А.Р. ХАЙРУЛЛИН  
 ФГБОУВО «Казанский государственный энергетический университет»,  
 г. Казань, Российская Федерация  
 E-mail: haybullina.87@mail.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Трубчатые теплообменные аппараты широко применяются в различных отраслях промышленности. Даже небольшое повышение эффективности кожухотрубных аппаратов может привести к значительному энергосбережению. Одним из способов повышения эффективности работы кожухотрубных аппаратов является применение пульсаций потока для интенсификации теплообмена. Несмотря на то, что теплообмен при поперечном обтекании пучков труб в стационарных условиях хорошо изучен, теплообмен в условиях пульсаций потока исследован ограниченно, поэтому раскрытие его закономерностей остается актуальной задачей.

**Материалы и методы.** Течение несжимаемой жидкости описано системой уравнений Навье-Стокса, осредненных по методу Рейнольдса, и уравнением неразрывности. Теплоперенос описан уравнением конвективного теплообмена (Фурье-Кирхгофа). Численное исследование выполнено в Ansys Fluent.

**Результаты.** Проведено численное исследование влияния вынужденных несимметричных пульсаций на теплообмен при поперечном обтекании коридорного пучка труб. При проведении численного эксперимента число Рейнольдса  $Re$  находилось в диапазоне от 1000 до 2000, относительная амплитуда пульсаций  $A/D$  – от 1 до 2, число Струхала  $Sh$  – от 0,77 до 1,51, число Прандтля и скважность пульсаций имели фиксированные значения  $Pr = 7,2$ ,  $\psi = 0,25$ . Относительный поперечный и продольный шаг составлял  $s_{1,2}/D = 1,3$ . Установлено, что пульсации потока приводят к интенсификации теплообмена во всем исследованном диапазоне режимных параметров. С увеличением  $A/D$  и  $Sh$  происходит повышение числа Нуссельта  $Nu$ . При увеличении числа  $Re$  наблюдается снижение отношения числа  $Nu$  при пульсационном и стационарном течении.

**Выводы.** Обобщающая зависимость, полученная по результатам численного исследования, может быть использована для прогнозирования теплоотдачи при пульсационном течении в диапазоне исследованных геометрических и режимных параметров. Для прогнозирования теплоотдачи в более широком диапазоне режимных параметров и с отличными конфигурациями пучков труб необходимы дополнительные исследования.

**Ключевые слова:** пульсирующее течение, пульсационное течение, коридорный пучок труб, численное моделирование, интенсификация теплообмена

## A NUMERICAL STUDY OF HEAT TRANSFER IN THE IN-LINE TUBE BUNDLE UNDER PULSATING FLUID FLOW CONDITIONS

A.I. KHAIBULLINA, A.R. KHAIRULLIN  
 Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation  
 E-mail: haybullina.87@mail.ru

### Abstract

**Background.** Shell-and-tube heat exchangers are widely used in different industries. Even a small increase in the efficiency of shell-and-tube heat exchangers can lead to significant energy savings. One of the ways to improve the efficiency of shell-and-tube heat exchangers is the use of pulsating flows for the enhancement of heat exchange. Despite the fact that heat transfer in the tube bundle cross flow in steady-state conditions has been studied quite well, there is limited data on heat transfer in pulsating flow, which means that the problem of finding regularities of heat transfer with pulsating flows in tube bundles is still important.

**Materials and methods.** The work employs the incompressible Reynolds averaged Navier-Stokes (URANS) equations and the continuity equation. Heat transfer is described by the convective heat transfer (Fourier-Kirchhoff) equation. The calculations are performed using Ansys Fluent.

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №18-79-10136).

**Results.** A numerical study has been conducted of the effects of forced asymmetrical pulsating flow on heat exchange in in-line tube bundle cross-flow conditions. In the numerical experiment the Reynolds number  $Re$  ranged from 1000 to 2000, the relative pulsating amplitude  $A/D$  – from 1 to 2, the Strouhal number  $Sh$  – from 0,77 to 1,51, the Prandtl number and the duty cycle had fixed values:  $Pr = 7,2$ ,  $\psi = 0,25$ . The relative transverse and longitudinal pitch was  $s_{1,2}/D = 1,3$ . It has been found that pulsating flows lead to the enhancement of heat transfer in the whole range of the studied operating parameters. An increase in  $A/D$  and  $Sh$  leads to bigger Nusselt number  $Nu$ . An increase in the  $Re$  number leads to a decrease in the  $Nu$  ratio in pulsating and steady flow conditions.

**Conclusions.** The general correlation obtained based on the numerical study results can be used to predict heat transfer in a pulsating flow in the range of the studied geometric and operating parameters. More research is needed to predict heat transfer in a wider range of operating parameters and with other tube bundle configurations.

**Key words:** pulsating flow, pulsing flow, in-line tube bundle, numerical simulation, heat transfer enhancement

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2019.4.012-021

**Введение.** На сегодняшний день стационарное течение при обтекании как одиночного цилиндра [1, 2], так и пучка труб [3] хорошо изучено. Однако течение в условиях пульсаций потока остается мало изученным, особенно теплообмен в пучках труб при пульсационном течении. Пульсации потока могут возникать самопроизвольно или создаваться искусственно. Самопроизвольные пульсации потока могут возникать при обтекании как одиночного цилиндра, так и пучка труб [4]. Возникающие самопроизвольные пульсации потока могут приводить к разрушениям оборудования при синхронизации частот пульсаций потока с частотами колебаний обтекаемых тел [5]. Поэтому в литературе исследуются феномен резонансных частот [6, 7] и различные способы управления возникающими пульсациями [8]. С другой стороны, искусственно созданные пульсации потока можно использовать для интенсификации теплообмена [9–13]. Например, для интенсификации теплообмена в кожухотрубных теплообменных аппаратах, которые широко применяются в энергетике [14].

В [15] экспериментальным методом исследован теплообмен одиночного цилиндра в пульсирующем потоке воздуха. Число  $Re$  соответствовало 50000, амплитуда пульсаций скорости потока находилась в диапазоне от 4,0 до 15,5 %, число  $Sh$  от 0,016 до 0,218. Максимальная интенсификация теплообмена в 45 % наблюдалась в передней части цилиндра, минимальная в 6 % – в кормовой части.

В [16] экспериментальным методом исследовано влияние симметричных возвратно поступательных колебаний цилиндра на его теплообмен в потоке воздуха.

Число  $Re$  находилось в диапазоне от 0 до 4000, безразмерная амплитуда колебаний цилиндра, отнесенная к его диаметру  $A/D$ , – от 0 до 0,628, числа  $Sh$  – от 0 до 0,65. Результаты показывают, что колебания цилиндра могут значительно увеличить коэффициент теплоотдачи во всем исследованном диапазоне параметров, максимальная интенсификация составила 34 %.

В [17] экспериментальным методом исследован теплообмен при симметричных колебаниях цилиндра в потоке воды. Число  $Re$  находилось в диапазоне от 550 до 3500, число  $Sh$  – от 0 до 1, амплитуда пульсаций  $A/D$  соответствовала значениям 0,1 и 0,2. Показано, что с увеличением  $A/D$  наблюдается рост коэффициента теплоотдачи. С увеличением  $Sh$  интенсивность теплообмена может как увеличиться, так и уменьшиться. При  $A/D = 0,1$  наблюдалось два пика с максимальной интенсификацией теплообмена, соответствующих значениям  $Sh = 0,21$  и 0,58. При  $A/D = 0,2$  наблюдалось три пика, соответствующих  $Sh = 0,21$ ; 0,37; 0,51.

В [18] при экспериментальном исследовании теплообмена квадратной трубы в условиях пульсационного потока воздуха достигнута интенсификация около 12 %. Пульсации потока имели симметричный характер с частотой от 0 до 60 Гц, число  $Re$  соответствовало 350 и 540, безразмерная амплитуда пульсаций скорости была постоянной  $A_{vel} = 0,05$ .

В [19] численным методом изучалось влияние как симметричных, так и несимметричных пульсаций на теплообмен одиночного цилиндра в потоке воды. Число  $Re$  изменялось в диапазоне от 7 до 100, частота пульсаций  $f$  – от 0 до 0,8 Гц, при

этом зафиксирована интенсификация теплообмена до 12 %. Также результаты показывают, что наибольшим эффектом с точки зрения энергоэффективности обладают несимметричные пульсации с частотой 0,05 Гц.

В [20] численным методом исследовано влияние симметричных пульсаций на теплообмен полуцилиндра при числе  $Re$  от 10 до 100,  $Sh$  от 0 до 2,  $A_{vel}$  от 0 до 0,6. Максимальное увеличение коэффициента теплоотдачи на 10 % наблюдалось при  $Sh = 1$  и  $A_{vel} = 0,6$  во всем исследованном диапазоне величин числа  $Re$ .

Анализ работ других авторов показывает, что применяемые пульсации в основном имеют симметричный характер. С другой стороны, научный интерес представляют несимметричные пульсации, когда периоды времени торможения и ускорения потока разные. В [21–24] была показана эффективность применения несимметричных пульсаций по сравнению с симметричными. В частности, в [21] численным методом была рассмотрена энергетическая эффективность пульсирующих потоков масла при интенсификации теплоотдачи в кожухотрубном водяном маслоохладителе со следующими параметрами:  $Re = 658$ ,  $Pr = 293$ . Показано, что энергетическая эффективность (по критерию Кирпичева [14]) несимметричных пульсаций выше, по сравнению с симметричными. В [22] в результате математического моделирования показано, что интенсификация теплообмена в потоке масла выше при несимметричных пульсациях во всем диапазоне исследований. Исследования в [22] проводились для пучков труб различной конфигурации в пульсирующих потоках масла при  $Re$  от 100 до 1000,  $Pr$  от 215 до 363,  $f$  от 0,2 до 0,5 Гц и  $A/D$  от 15 до 35. В [23, 24] экспериментальным методом исследовано влияние пульсаций на теплообмен в коридорном пучке труб при числе  $Re < 500$ .

Ниже предлагается численное исследование влияния несимметричных пульсаций потоков воды на теплообмен коридорного пучка труб при  $Re$  от 1000 до 2000.

**Математическая модель.** Для описания течения несжимаемой жидкости использованы нестационарные уравнения Навье-Стокса осредненные по методу Рейнольдса (URANS) с применением гипо-

тезы турбулентной вязкости. Теплоперенос описывался уравнением конвективного теплообмена (Фурье-Кирхгофа)<sup>2</sup> [25]. Двухмерная расчетная область математической модели представлена на рис. 1.

При стационарном течении на входе задавалась постоянная скорость жидкости  $u_{st}$  м/с с постоянной температурой  $t_{bx} = 18$  °С. Температура стенки центрального нижнего цилиндра в пучке была постоянной  $t_{ct} = 19$  °С, для остальных цилиндров принималось условие адиабатной стенки  $\partial t / \partial n = 0$ . Пульсационное течение моделировалось с помощью пульсаций скорости (зависимости скорости от времени  $u(\tau)$ , которая задавалась на входе в пучок труб в качестве граничного условия (рис. 1)). Пульсации скорости  $u(t)$  соответствовали необходимой частоте  $f = 1/T$  Гц, числу  $Re$ , скважности  $\psi = T_1/T$  и относительной амплитуде  $A/D$ , где  $A$  – смещение частицы жидкости назад, м, в самом узком сечении межтрубного пространства пучка труб. Таким образом, пульсации жидкости имели возвратно-поступательный характер. Число  $Re$  рассчитывалось по формуле

$$Re = \frac{uD}{\nu}, \quad (1)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;  $D = 0,025$  – диаметр трубки пучка, м;  $\langle u_p \rangle$  – осредненная скорость жидкости, м/с.

Для пульсационного течения осредненная за период пульсаций ( $T$  с) скорость была равна скорости стационарного течения  $u_{st}$ :

$$\langle u_p \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T u_p d\tau = u_{st}, \quad (2)$$

где  $u_p$  – мгновенное значение скорости на входе, м/с.

Расчеты проводились с помощью ПО ANSYS Fluent на основе метода конечных объемов (МКО). Расчетная область модели была разбита на 32023 контрольных объема. Коэффициент расширения размеров расчетных ячеек в радиальном направлении от стенок каждого цилиндра составлял 1,2. Количество слоев в пристеночной области 10. Минимальный размер ячейки в пристеночной области составлял  $y_{min}/D = 2,5 \cdot 10^{-3}$ , что сравнимо с минимальным размером ячейки  $y_{min}/D = 4,3 \cdot 10^{-3}$ , использованной в [12].

<sup>2</sup> ANSYS FLUENT, ANSYS, Inc. Southpointe, 2011.

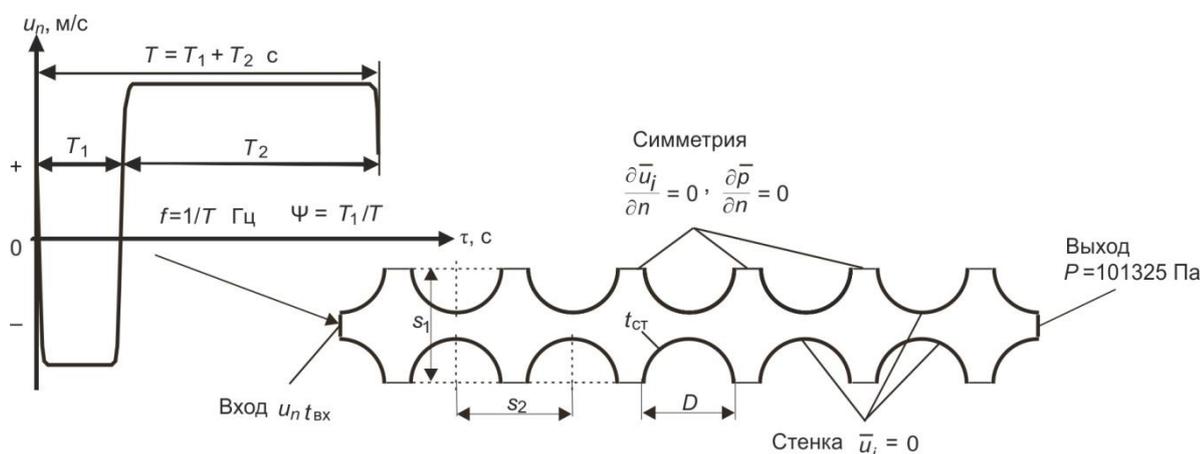


Рис. 1. Расчетная область модели

**Верификация математической модели.** Полученные результаты по теплообмену в пучке труб при стационарном течении сравнивались с критериальным уравнением [3]

$$Nu_{st} = 0,26Re^{0,63} Pr^{0,36}. \quad (3)$$

Числа Нуссельта рассчитывались по формуле

$$Nu_{st} = \frac{q_{st} D}{\lambda \Delta t_{st}}, \quad (4)$$

где  $q_{st}$  – плотность теплового потока, осредненная по поверхности центрального цилиндра в пучке, Вт/м<sup>2</sup>;  $\Delta t_{st}$  – разница температур между стенкой центрального цилиндра и осредненной температурой жидкости по межтрубному пространству, °C;  $\lambda$  – теплопроводность жидкости Вт/(м·°C).

На рис. 2 представлена зависимость числа Нуссельта  $Nu_{st}$  от числа Re для различных моделей турбулентности. Относительный поперечный и продольный шаг составлял  $s_{1,2}/D = 1,3$ ,  $Pr = 7,2$ .

При выборе модели турбулентности были рассмотрены 6 различных моделей турбулентности<sup>3</sup>: модель Спаларта-Алмараса Spalart–Allmaras (SA), модель переноса касательных напряжений Shear Stress Transport (SST), стандартная  $k$ -epsilon ( $k$ -ε), стандартная  $k$ -omega ( $k$ -ω),  $k$ -kl-omega ( $k$ -kl-ω) модели и модель Рейнольдсовых напряжений Reynolds Stress Model (RSM) с линейризованным описанием момента давления-деформации (Linear Pressure-Strain (LPS)). Модели

$k$ -ε и RSM рассматривались со стандартной пристеночной функцией Standard Wall Function (SWF) и расширенным пристеночным моделированием Enhanced Wall Treatment (EWT). Установлено (рис. 2), что наилучшее схождение с уравнением (3) наблюдается для модели SST (рис. 2, кривая 3), максимальное отклонение составило не более 3,5 % (рис. 2, кривая 3). Модели  $k$ -ε SWF,  $k$ -ε EWT и RSM EWT завышают значения числа Nu. Максимальное расхождение числа Nu в 23,4 % с уравнением (3) наблюдается для  $k$ -ε SWF модели (рис. 2, кривая 5), для  $k$ -ε EWT – 16,9 % (рис. 2, кривая 6), для RSM EWT – 8,2 % (рис. 2, кривая 1). С увеличением числа Re расхождение числа Nu с уравнением (3) уменьшается. Модели SA,  $k$ -kl-ω,  $k$ -ω, наоборот, занижают значения Nu, при этом расхождение с уравнением (3) увеличивается с повышением Re. Модели SA и  $k$ -kl-ω (рис. 2, кривые 2,4) показывают близкий результат, максимальное отклонение с уравнением (3) составляет 14,8 и 18 % соответственно, для модели  $k$ -ω – 24,2 % (рис. 2, кривая 7).

**Результаты исследования.** Ниже рассмотрен прирост числа Нуссельта в пульсационном течении по сравнению со стационарным, полученный в результате численного моделирования. В ходе численного эксперимента число Re находилось в диапазоне от 1000 до 2000, амплитуда пульсаций  $A/D$  – от 1 до 2, число  $Sh = fD/u_{st}$  – от 0,77 до 1,51. В качестве рабочей жидкости принималась вода с постоянным числом  $Pr = 7,2$ , скважность пульсаций также имела фиксированное значение  $\psi = 0,25$ .

<sup>3</sup> ANSYS FLUENT, ANSYS, Inc. Southpointe, 2011.

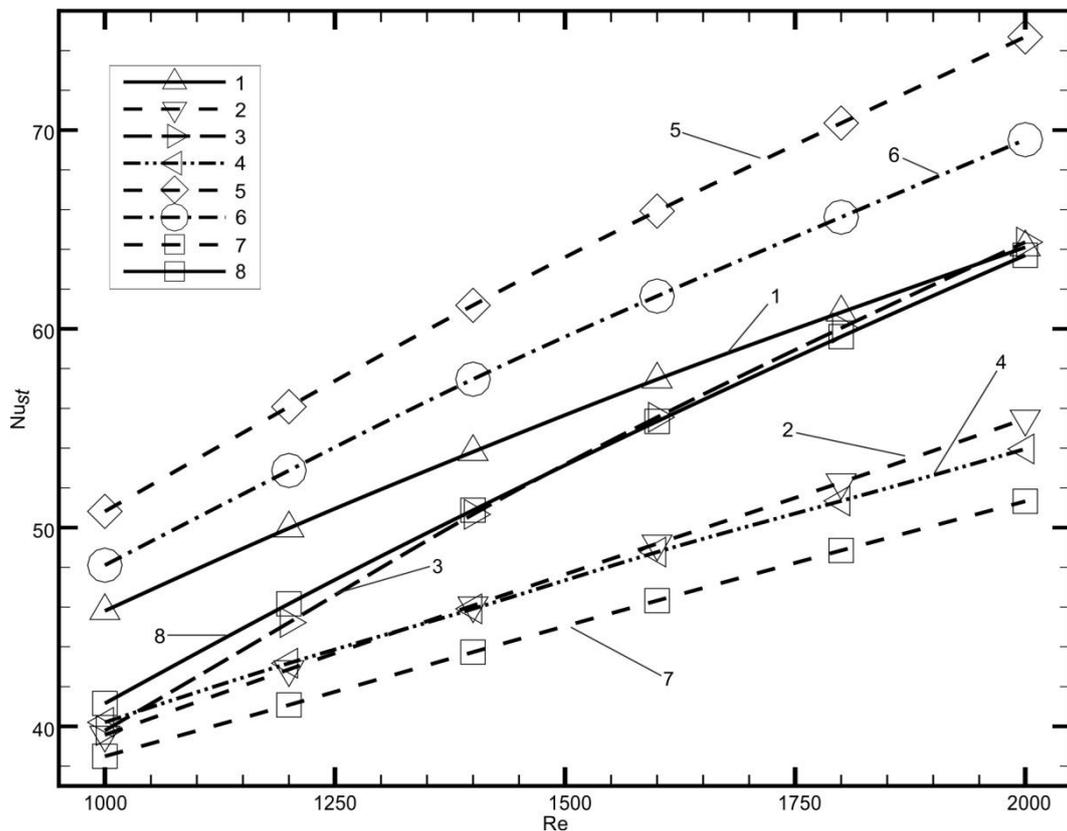


Рис. 2. Зависимость  $Nu_{st}$  от  $Re$  для различных моделей турбулентности: 1 – RSM EWT; 2 – SA; 3 – SST; 4 –  $k-kI-\omega$ ; 5 –  $k-\epsilon$  SWF; 6 –  $k-\epsilon$  EWT; 7 –  $k-\omega$ ; 8 – уравнение (3)

В качестве модели турбулентности была выбрана модель SST, поскольку она показала наилучшее схождение с литературными данными [3].

Число Нуссельта в пульсационном течении рассчитывалось следующим образом:

$$Nu_p = \frac{q_p D}{\lambda \Delta t_p}, \quad (5)$$

где  $q_p$  – плотность теплового потока, осредненная по поверхности центрального цилиндра в пучке и за один период пульсаций, Вт/м<sup>2</sup>;  $\Delta t_p$  – разница температур между стенкой центрального цилиндра и осредненной температурой жидкости по межтрубному пространству и за один период пульсаций, °С.

Установлено (рис. 3), что с увеличением числа  $Re$  в основном происходит уменьшение величины отношения  $Nu_p/Nu_{st}$ .

На рис. 4 показано влияние амплитуды пульсаций  $A/D$  на прирост  $Nu_p/Nu_{st}$ . Увеличение  $A/D$  более существенно интенсифицирует теплообмен в пульсационном режиме течения, что согласуется с

данными других авторов [9, 16, 17]. Данная тенденция наблюдается при всех значениях числа  $Re$  и числа  $Sh$  в исследованном диапазоне.

На рис. 5 показаны зависимости отношения  $Nu_p/Nu_{st}$  от числа  $Sh$ . При увеличении  $Sh$  наблюдается стабильный рост  $Nu_p/Nu_{st}$  при всех  $Re$  и  $A/D$ . Однако в [17, 20] показано, что с увеличением  $Sh$  интенсивность теплообмена в пульсационном течении может как повыситься, так и понизиться в зависимости от  $Sh$ , что объясняется синхронизацией собственных частот колебаний вихрей, возникающих при обтекании цилиндра в стационарном течении, с вынужденными частотами пульсаций (феномен резонанса вихрей) [18]. Пики с максимальными значениями числа  $Nu$  наблюдаются при превышении вынужденных частот пульсаций в два раза, собственных частот колебаний вихрей в три раза [17, 18]. В данном же исследовании при стационарном течении в следе за цилиндром не возникало возмущений потока, что объясняет стабилизацию роста  $Nu_p/Nu_{st}$  с увеличением числа  $Sh$ .

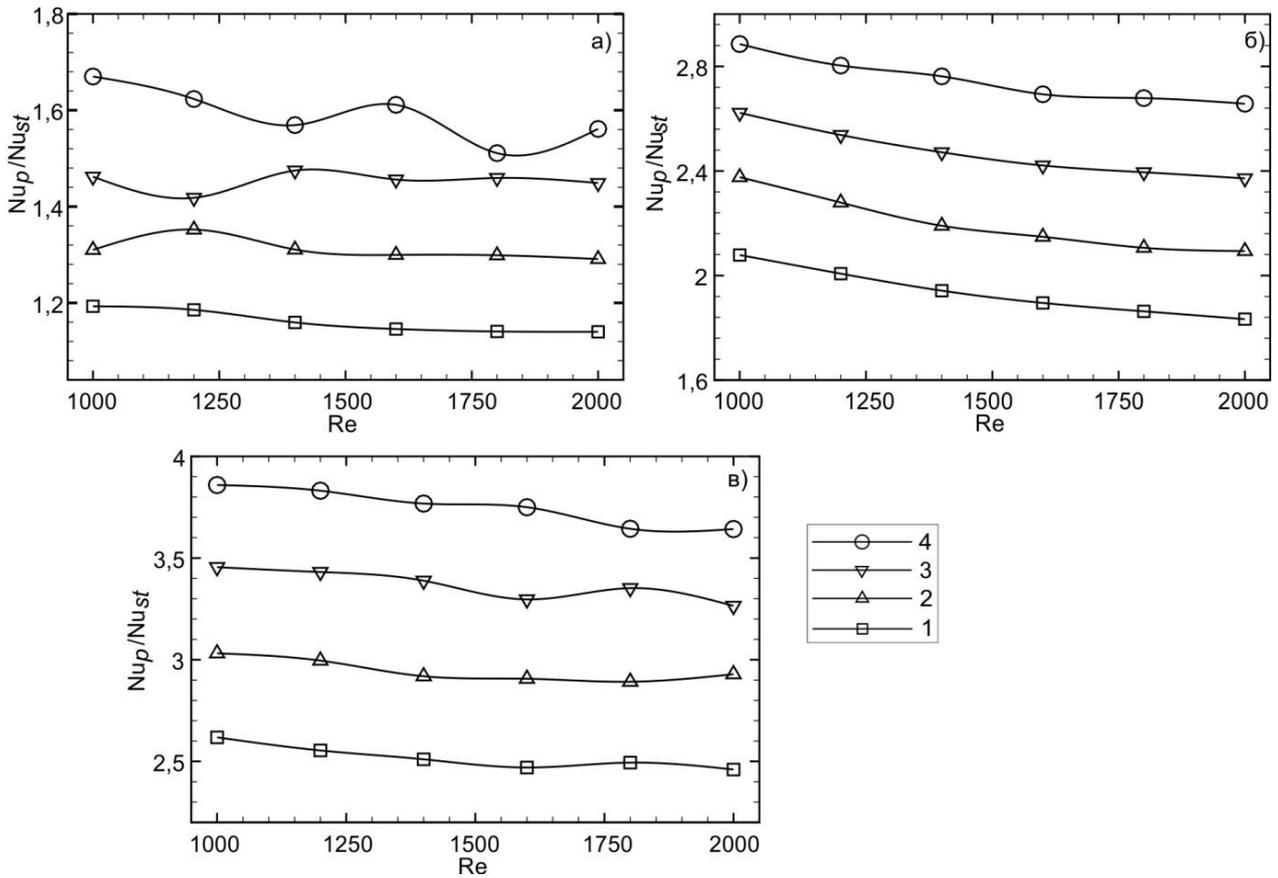


Рис. 3. Зависимость  $Nu_p/Nu_{st}$  от  $Re$ : а –  $A/D = 1$ ; б –  $A/D = 1,5$ ; в –  $A/D = 2$ ; 1 –  $Sh = 0,77$ ; 2 –  $Sh = 1,02$ ; 3 –  $Sh = 1,27$ ; 4 –  $Sh = 1,51$

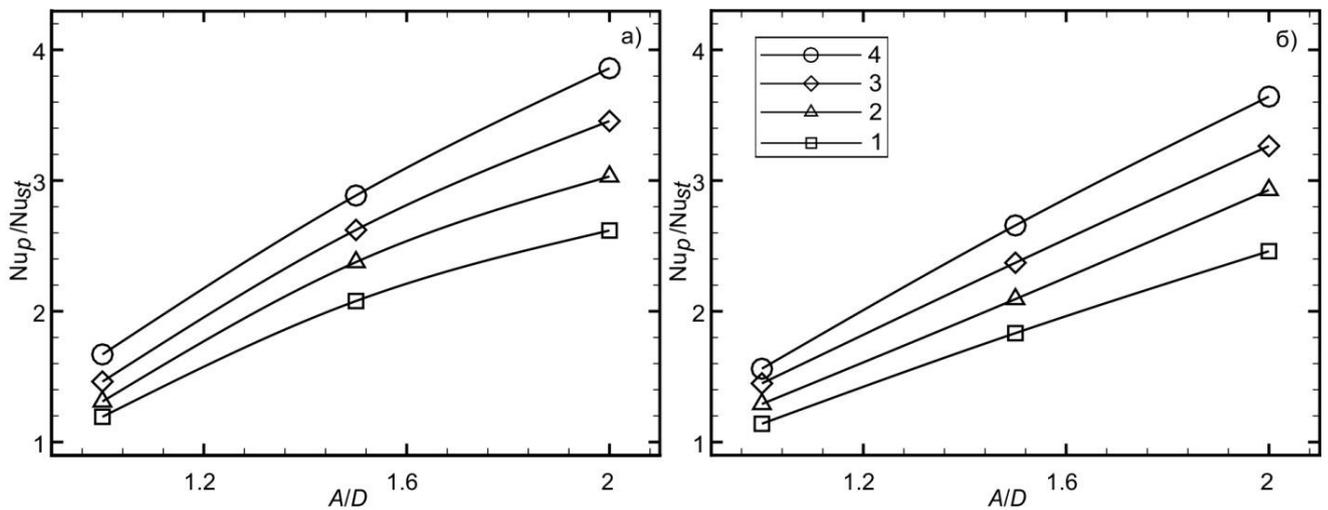


Рис. 4. Зависимость  $Nu_p/Nu_{st}$  от  $A/D$ : а –  $Re = 1000$ ; б –  $Re = 2000$ ; 1 –  $Sh = 0,77$ ; 2 –  $Sh = 1,02$ ; 3 –  $Sh = 1,27$ ; 4 –  $Sh = 1,51$

При стационарном течении жидкости в пучках труб образование вихревых дорожек существенно зависит от геометрии пучка и числа  $Re$  [26], где для коридорного пучка труб с относительным шагом  $s_{1,2}/D = 1,33$  формирование вихревых до-

рожек возникало лишь в диапазоне  $Re$  от 170 до 740 [27]. По результатам численного эксперимента была получена обобщающая зависимость:

$$\frac{Nu_p}{Nu_{st}} = 2,681 Re^{-0,098} \cdot A/D^{1,191} \cdot Sh^{0,526}. \quad (6)$$

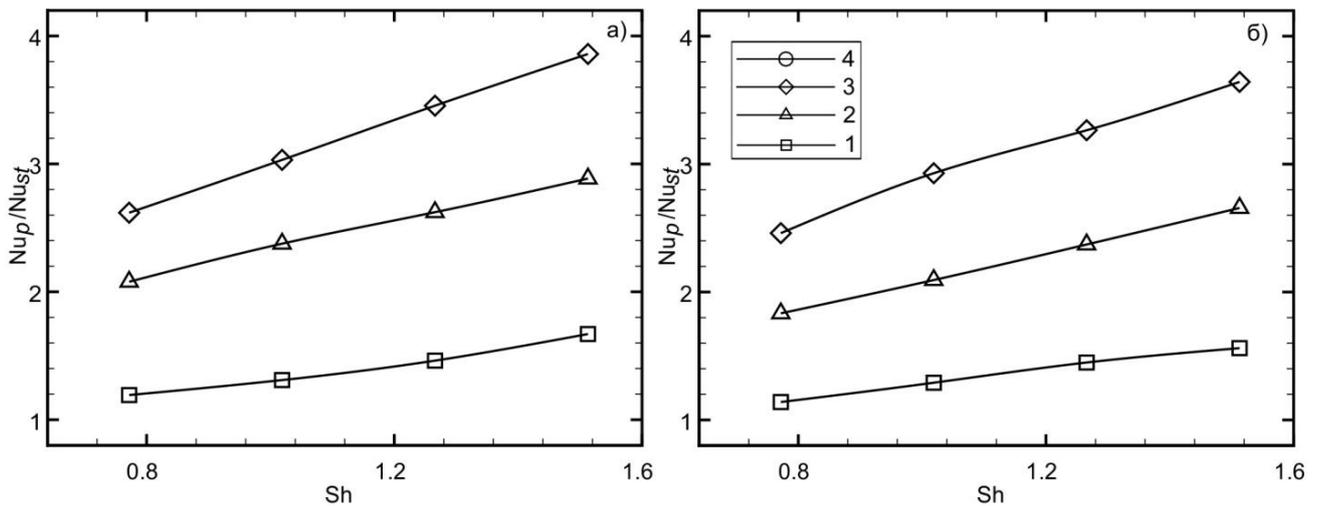


Рис. 5. Зависимость  $Nu_p/Nu_{st}$  от  $Sh$ : а –  $Re = 1000$ ; б –  $Re = 2000$ ; 1 –  $Sh = 0,77$ ; 2 –  $Sh = 1,02$ ; 3 –  $Sh = 1,27$ ; 4 –  $Sh = 1,51$

Данное уравнение может быть использовано для диапазонов  $1000 \leq Re \leq 2000$ ;  $0,77 \leq Sh \leq 1,51$ ;  $1 \leq A/D \leq 2$  при  $Pr = 7,2$ ,  $\psi = 0,25$ ,  $s_{1,2}/D = 1,3$ . Коэффициент детерминации  $R^2$  составил 0,993. Максимальное отклонение от данных численного эксперимента составляет не более  $\delta_{\max} = \pm 7,8 \%$ , среднее –  $\delta_{\text{ср}} = \pm 2,4 \%$ . Для примера на рис. 6 приведена зависимость отношения  $Nu_p/Nu_{st}$  от числа  $Re$  для амплитуды пульсаций  $A/D = 1,5$ , полученная в результате численного эксперимента и рассчитанная по обобщающей зависимости (6).

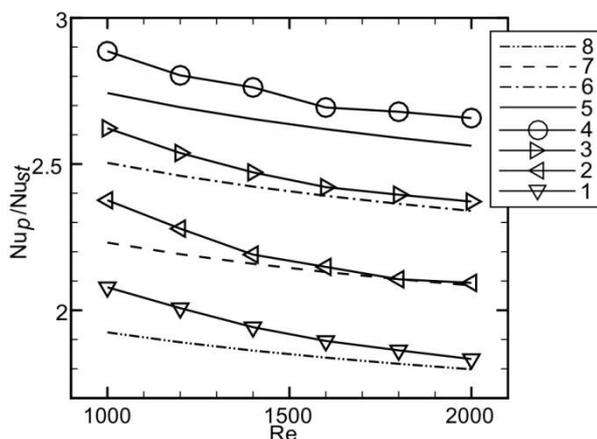


Рис. 6. Зависимость  $Nu_p/Nu_{st}$  от  $Re$  при  $A/D = 1,5$  (1–4 – численный эксперимент, 5–8 – уравнение (6)): 1, 5 –  $Sh = 0,77$ ; 2, 6 –  $Sh = 1,02$ ; 3, 7 –  $Sh = 1,27$ ; 4, 8 –  $Sh = 1,51$

**Выводы.** В результате численного исследования влияния пульсаций потока на теплообмен при поперечном обтекании коридорного пучка труб и проведенных расчетов с различными моделями турбулентности при теплообмене в стационарном

течении было установлено, что наилучшее схождение с экспериментальными данными показала модель SST с максимальным расхождением не более 3,5 %.

Также установлено влияние режимных параметров на теплообмен. С увеличением  $A/D$  и  $Sh$  происходит повышение интенсивности теплообмена в пульсационном течении по сравнению со стационарным. Увеличение числа  $Re$  приводит к уменьшению величины отношения  $Nu_p/Nu_{st}$ .

Интенсификация теплообмена наблюдается во всем исследованном диапазоне режимных параметров. Максимальная интенсификация в 3,86 раза наблюдается при  $Re = 1000$ ,  $Sh = 1,51$ ,  $A/D = 2$ , минимальная в 1,14 раза – при  $Re = 2000$ ,  $Sh = 0,77$ ,  $A/D = 1$ .

Полученная обобщающая зависимость для  $Nu_p/Nu_{st}$  от  $Re$ ,  $Sh$  и  $A/D$ , показавшая более сильное влияние на теплообмен относительной амплитуды пульсаций  $A/D$  по сравнению с другими режимными параметрами, может быть использована для оценки интенсификации теплообмена в коридорном пучке труб с  $s_{1,2}/D = 1,3$  при указанных диапазонах режимных параметров. Для получения уравнения в более широком диапазоне режимных параметров и с отличными конфигурациями пучков труб необходимы дополнительные исследования.

#### Список литературы

1. Zdravkovich M.M. Flow Around Circular Cylinders. – Oxford University Press, 1997. – 612 с.

2. **Жукаускас А., Жюгжда И.** Теплоотдача цилиндра в поперечном потоке жидкости. – Вильнюс: Изд-во «Мокслас», 1979. – 240 с.
3. **Жукаускас А., Макарявичюс В., Шланчяускас А.** Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке жидкости. – Вильнюс: Изд-во «Мокслас», 1968. – 192 с.
4. **Жукаускас А., Улинскас Р., Катинас В.** Гидродинамика и вибрация обтекаемых пучков труб. – Вильнюс: Изд-во «Мокслас», 1984. – 312 с.
5. **Dorogi D., Varanyi L.** Numerical simulation of a freely vibrating circular cylinder with different natural frequencies // *Ocean Engineering*. – 2018. – Vol. 158. – P. 196–207. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.03.079
6. **Numerical** simulation of viscous flow past an oscillating square cylinder using a CIP-based model / Ying-nan Fu, Xi-zeng Zhao, Fei-feng Cao, Da-ke Zhang, Du Cheng, Li Li // *Journal of Hydrodynamics*. – 2017. – Vol. 29, no. 1. – P. 96–108. doi: 10.1016/s1001-6058(16)60721-7.
7. **Gnatowska R.** Numerical analysis of oscillating flow around a cylinder // *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics*. – 2014. – Vol. 13, no. 3. – P. 59–66. doi: 10.17512/jamcm.2014.3.07.
8. **Управление** отрывным турбулентным потоком при помощи высокочастотных вращательных колебаний при  $Re = 1,4 \times 10^5$  / Е.В. Палкин, Р.И. Мулладжанов, Х. Мухамед, Х. Кемал // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327, № 9. – С. 88–94.
9. **Experimental** Study of the Heat Transfer Enhancement from a Circular Cylinder in Laminar Pulsating Cross-flows / Guoneng Li, Youqu Zheng, Guilin Hu, Zhiguo Zhang, Yousheng Xu // *Heat Transfer Engineering*. – 2016. – Vol. 37, no. 6. – P. 535–544. doi: 10.1080/01457632.2015.1060758.
10. **Papadakis G., Bergeles G.** Numerical simulation of the flow and heat transfer around a cylinder with a pulsating approaching flow at a low Reynolds number // *Proc Inst Mech Eng*. – 2001. – Vol. 215. – P. 105–119. doi: 10.1243/0954406011520463
11. **Experimental** Study of the Heat Transfer Enhancement from a Circular Cylinder in Laminar Pulsating Cross-flows / G. Li, Y. Zheng, G. Hu, Z. Zhang, Y. Xu // *Heat Transfer Engineering*. – 2015. – Vol. 37, no. 6. – P. 535–544. doi: 10.1080/01457632.2015.1060758
12. **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. doi: 10.1016/b978-008044544-1/50078-9.
13. **Konstantinidis E., Balabani S., Yianneskis M.** Relationship Between Vortex Shedding Lock-On and Heat Transfer. *Chemical // Engineering Research and Design*. – 2003. – Vol. 81, no. 6. – P. 695–699. doi: 10.1205/026387603322150543.
14. **Попов И.А., Махянов Х.М., Гуреев В.М.** Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. *Интенсификация теплообмена / под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова*. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 560 с.
15. **Gundappa M., Diller T.E.** The effects of free stream turbulence and flow pulsation on heat transfer from a cylinder in cross-flow // *J. Heat Transfer*. – 1991. – Vol. 113, no. 3. – P. 766–769. doi:10.1115/1.2910630.
16. **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. – Vol. 40, no. 8. – P. 1825–1834. doi: 10.1016/s0017-9310(96)00255-4
17. **Park H.G., Gharib M.** Experimental Study of Heat Convection From Stationary and Oscillating Circular Cylinder in Cross Flow // *Journal of Heat Transfer*. – 2001. – Vol. 123, no. 51. – P. 51–62. doi: 10.1115/1.1338137.
18. **Ji T.H., Kim S.Y., Hyun J.M.** Experiments on heat transfer enhancement from a heated square cylinder in a pulsating channel flow // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2008. – Vol. 51, no. 5–6. – P. 1130–1138. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.04.01.
19. **Мусаева Д.А., Синявин А.А., Гурьянов А.И.** Математическое моделирование процессов теплообмена при поперечном обтекании цилиндра в условиях низкочастотных несимметричных пульсаций потока жидкости // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2012. – № 7–8. – С. 19–27.
20. **Bhalla N., Dhiman A.K.** Pulsating flow and heat transfer analysis around a heated semi-circular cylinder at low and moderate Reynolds numbers // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. – 2017. – Vol. 39, no. 8. – P. 3019–3037. doi: 10.1007/s40430-017-0749-1.
21. **Energy** efficiency of pulsating flows at heat-transfer enhancement in a shell-and-tube water oil cooler / A.I. Haibullina, L.S. Sabitov, A.R. Hayrullin, V.K. Iyin // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering «International Scientific-Technical Conference on Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials 2017, ISTC-IETEM 2017»*. – 2018. – Vol. 412, no. 1. – P. 1–6.
22. **External** heat transfer in corridor and staggered tube bundles of different configuration under the application of low-frequency pulsations / V.K. Iyin, L.S. Sabitov, A.I. Haibullina, A.R. Hayrullin //

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Ser. «International Scientific-Technical Conference on Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials 2016, ISTC-IETEM 2016». – 2017. – Vol. 240, no. 1. – P. 1–10.

23. **Хайбуллина А.И., Ильин В.К.** Экспериментальное исследование внешней теплоотдачи при поперечном обтекании коридорного пучка труб при  $Re \leq 500$  с наложением на поток низкочастотных несимметричных пульсаций // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2014. – № 1–2. – С. 11–19.

24. **Исследование** теплоотдачи в коридорном пучке труб при наложении на поток противоточных несимметричных низкочастотных пульсаций / А.И. Хайбуллина, А.Р. Хайруллин, А.А. Синявин, В.К. Ильин // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2013. – Т. 12, № 1. – С. 312–315.

25. **Снегирёв А.Ю.** Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений. – СПб.: Изд-во Политехнический университет, 2009. – 143 с.

26. **Weaver D.S., Lian H.Y., Huang X.Y.** Vortex Shedding In Rotated Square Arrays // Journal of Fluids and Structures. – 1993. – Vol. 7, no. 2. – P. 107–121. doi:10.1006/jfls.1993.1009.

27. **Weaver D.S., Fitzpatrick J.A., Elkashlan M.** Strouhal numbers for heat-exchanger tube arrays in cross flow // Journal of Pressure Vessel Technology. – 1987. – Vol. 109, no. 2. – P. 219–223.

## References

1. Zdravkovich, M.M. Flow Around Circular Cylinders. Oxford University Press, 1997. 612 p.

2. Zhukauskas, A., Zhyugzhda, I. *Теплоотдача тсильндра в поперечном потоке жидкости* [Cylinder heat transfer in fluid cross-flow]. Vil'nyus: Izdatel'stvo Mokslas, 1979. 240 p.

3. Zhukauskas, A., Makaryavichyus, V., Shlanchyauskas, A. *Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке жидкости* [Heat transfer of tube bundles in fluid cross-flow]. Vil'nyus: Izdatel'stvo Mokslas, 1968. 192 p.

4. Zhukauskas, A., Ulinskas, R., Katinas, V. *Gidrodinamika i vibratsiya obtekaemykh puchkov trub* [Hydrodynamics and vibration of streamlined tube bundles]. Vil'nyus: Izdatel'stvo Mokslas, 1984. 312 p.

5. Dorogi, D., Baranyi, L. Numerical simulation of a freely vibrating circular cylinder with different natural frequencies. *Ocean Engineering*, 2018, vol. 158, pp. 196–207. doi:10.1016/j.oceaneng.2018.03.079

6. Ying-nan, Fu, Xi-zeng, Zhao, Fei-feng, Cao, Da-ke, Zhang, Du, Cheng, Li, Li. Numerical simulation of viscous flow past an oscillating square cylinder using a CIP-based model. *Journal of Hy-*

*drodynamics*, 2017, vol. 29, no. 1, pp. 96–108. doi:10.1016/s1001-6058(16)60721-7.

7. Gnatowska, R. Numerical analysis of oscillating flow around a cylinder. *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics*, 2014, vol. 13, no. 3, pp. 59–66. doi:10.17512/jamcm.2014.3.07.

8. Palkin, E.V., Mullyadzhyanov, R.I., Mukhamed, Kh., Kemal, Kh. Upravlenie otrvnyym turbulentnym potokom pri pomoshchi vysokochastotnykh vrashchatel'nykh kolebaniy pri  $Re = 1,4 \times 10^5$  [Control of separation turbulent flows using high-frequency rotary vibrations at  $Re = 1,4 \times 10^5$ ]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*, 2016, vol. 327, no. 9, pp. 88–94.

9. Guoneng, Li, Youqu, Zheng, Guilin, Hu, Zhiguo, Zhang, Yousheng, Xu. Experimental Study of the Heat Transfer Enhancement from a Circular Cylinder in Laminar Pulsating Cross-flows. *Heat Transfer Engineering*, 2016, vol. 37, no. 6, pp. 535–544. doi:10.1080/01457632.2015.1060758.

10. Papadakis, G., Bergeles, G. Numerical simulation of the flow and heat transfer around a cylinder with a pulsating approaching flow at a low Reynolds number. *Proc Inst Mech Eng.*, 2001, vol. 215, pp. 105–119. doi:10.1243/0954406011520463

11. Li, G., Zheng, Y., Hu, G., Zhang, Z., Xu, Y. Experimental Study of the Heat Transfer Enhancement from a Circular Cylinder in Laminar Pulsating Cross-flows. *Heat Transfer Engineering*, 2015, vol. 37, no. 6, pp. 535–544. doi:10.1080/01457632.2015.1060758

12. 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, pp. 813–822. doi:10.1016/b978-008044544-1/50078-9.

13. Konstantinidis, E., Balabani, S., Yianneskis, M. Relationship Between Vortex Shedding Lock-On and Heat Transfer. *Chemical Engineering Research and Design*, 2003, vol. 81, no. 6, pp. 695–699. doi:10.1205/026387603322150543.

14. Popov, I.A., Makhyanov, Kh.M., Gureev, V.M. *Fizicheskie osnovy i promyshlennoe primeneniye intensivatsii teploobmena. Intensifikatsiya teploobmena* [Basic physics and industrial applications of heat exchange intensification. Heat exchange intensification]. Kazan': Tsentr innovatsionnykh tekhnologiy, 2009. 560 p.

15. Gundappa, M., Diller, T.E. The effects of free stream turbulence and flow pulsation on heat transfer from a cylinder in cross-flow. *J. Heat Transfer*, 1991, vol. 113, no. 3, pp. 766–769. doi:10.1115/1.2910630.

16. 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, vol. 40, no. 8, pp. 1825–1834. doi: 10.1016/s0017-9310(96) 00255-4

17. Park, H.G., Gharib, M. Experimental Study of Heat Convection From Stationary and Oscillating Circular Cylinder in Cross Flow. *Journal of Heat Transfer*, 2001, vol. 123, no. 51, pp. 51–62. doi:10.1115/1.1338137.

18. Ji, T.H., Kim, S.Y., Hyun, J.M. Experiments on heat transfer enhancement from a heated square cylinder in a pulsating channel flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, vol. 51, no. 5–6, pp. 1130–1138. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.04.01.

19. Musaeva, D.A., Sinyavin, A.A., Gur'yanov, A.I. Matematicheskoe modelirovanie protsessov teploobmena pri poperechnom obtekanii tsilindra v usloviyakh nizkochastotnykh nesimmetrichnykh pul'satsiy potoka zhidkosti [Mathematical modelling of heat exchange processes in case of cylinder cross flows in conditions of fluid flow low-frequency asymmetrical pulsations]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2012, no. 7–8, pp. 19–27.

20. Bhalla, N., Dhiman, A.K. Pulsating flow and heat transfer analysis around a heated semi-circular cylinder at low and moderate Reynolds numbers. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2017, vol. 39, no. 8, pp. 3019–3037. doi:10.1007/s40430-017-0749-1.

21. Haibullina, A.I., Sabitov, L.S., Hayrullin, A.R., Iyin, V.K. Energy efficiency of pulsating flows at heat-transfer enhancement in a shell-and-tube water oil cooler. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Ser. «International Scientific-Technical Conference on Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials 2017, ISTC-IETEM 2017», 2018, vol. 412, no. 1, pp. 1–6.

22. Iyin, V.K., Sabitov, L.S., Haibullina, A.I., Hayrullin, A.R. External heat transfer in corridor and staggered tube bundles of different configura-

tion under the application of low-frequency pulsations. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Ser. «International Scientific-Technical Conference on Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials 2016, ISTC-IETEM 2016», 2017, vol. 240, no. 1, pp. 1–10.

23. Khaybullina, A.I., Il'in, V.K. Eksperimental'noe issledovanie vneshney teplootdachi pri poperechnom obtekanii korridornogo puchka trub pri  $Re \leq 500$  s nalozheniem na potok nizkochastotnykh nesimmetrichnykh pul'satsiy [An experimental study of external heat transfer at in-line tube bundle cross-flow at  $Re \leq 500$  in conditions of low-frequency asymmetrical pulsation superposition on the flow]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2014, no. 1–2, pp. 11–19.

24. Khaybullina, A.I., Khayrullin, A.R., Sinyavin, A.A., Il'in, V.K. Issledovanie teplootdachi v koridornom puchke trub pri nalozhenii na potok protivotochnykh nesimmetrichnykh nizkochastotnykh pul'satsiy [A study of heat transfer in in-line tube bundle in conditions of low-frequency asymmetrical pulsation superposition on the flow]. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii*, 2013, vol. 12, no. 1, pp. 312–315.

25. Snegirev, A.Yu. Vysokoproizvoditel'nye vychisleniya v tekhnicheskoy fizike. Chislennoe modelirovanie turbulentnykh techeniy [High-performance computing in engineering physics. Numerical simulation of turbulent flows]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo Politekhnikeskiiy universitet, 2009. 143 p.

26. Weaver, D.S., Lian, H.Y., Huang, X.Y. Vortex Shedding In Rotated Square Arrays. *Journal of Fluids and Structures*, 1993, vol. 7, no. 2, pp. 107–121. doi:10.1006/jfls.1993.1009.

27. Weaver, D.S., Fitzpatrick, J.A., Elakashlan, M. Strouhal numbers for heat-exchanger tube arrays in cross flow. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1987, vol. 109, no. 2, pp. 219–223.

---

Хайбуллина Айгуль Ильгизаровна,

ФГБОУВО «Казанский государственный энергетический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий, телефон (8843) 519-42-06, e-mail: haybullina.87@mail.ru

Khaibullina Aigul Ilgizarovna,

Kazan State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Power Supply of Enterprises and Energy Resource Saving Technologies, telephone (8843) 519-42-06, e-mail: haybullina.87@mail.ru

Хайруллин Айдар Рафаэлевич,

ФГБОУВО «Казанский государственный энергетический университет», инженер кафедры энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий, телефон (8843) 519-42-21, e-mail: haybullina.87@mail.ru

Khairullin Aidar Rafaelevich,

Kazan State Power Engineering University, Engineer of the Department of Power Supply of Enterprises and Energy Resource Saving Technologies, telephone (8843) 519-42-21, e-mail: haybullina.87@mail.ru