

УДК 536.24

Айдар Рафаэлевич Хайруллин

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», аспирант кафедры энергообеспечения предприятий, строительства зданий и сооружений, Россия, Казань, телефон +7(843) 519-43-21, e-mail: kharullin@yandex.ru

Айгуль Ильгизаровна Хайбуллина

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, строительства зданий и сооружений, Россия, Казань, телефон +7(843) 519-42-06, e-mail: haybullina.87@mail.ru

Елена Ринатовна Киржацких

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, строительства зданий и сооружений, Россия, Казань, телефон +7(843) 519-43-21, e-mail: ukaneeva1991@mail.ru

Численное исследование интенсификации теплообмена шахматного пучка труб при различных режимных параметрах вынужденных пульсаций потока¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Доля теплообменного оборудования в составе промышленных установок является значительной, поэтому эффективность работы теплообменных аппаратов влияет на технико-экономические показатели промышленных установок в целом. Повышение эффективности теплообменного оборудования возможно за счет применения различных методов интенсификации теплообмена, например за счет вынужденных пульсаций потока, которые относятся к активным методам интенсификации теплообмена. Несмотря на имеющиеся положительные результаты в данной области, закономерности теплообмена в условиях вынужденных пульсаций потока исследованы недостаточно.

Методы и материалы. Исследование закономерностей теплообмена в пучке труб проведено численно, с помощью Ansys Fluent. Дискретизация уравнений Навье–Стокса и конвективного теплообмена (Фурье–Кирхгофа) проведено методом конечных объемов. Валидация численной модели осуществлена по известному критериальному уравнению для прогнозирования теплоотдачи в пучках труб при условиях стационарного течения.

Результаты. По результатам численного моделирования установлено влияние режимных параметров на теплообмен шахматного пучка труб при симметричных и несимметричных вынужденных возвратно-поступательных пульсациях потока. Показано, что с увеличением произведения безразмерной амплитуды и числа Струхала Sh , характеризующего интенсивность пульсаций, происходит увеличение числа Нуссельта Nu независимо от числа Рейнольдса Re и числа Прандтля Pr . Установлено, что число Nu в пульсационном течении увеличивается с ростом Re и Pr , при этом их влияние на прирост Nu в пульсационном течении по сравнению со стационарным течением незначительно. В ходе численного исследования получена максимальная интенсификация теплообмена в 1,8 раза. Показано, что скважность пульсаций оказывает незначительное влияние на теплообмен, при этом теплогидравлическая эффективность пучка труб увеличивается при несимметричных пульсациях. Получены обобщающие зависимости для предсказания теплоотдачи в шахматном пучке труб при пульсациях потока.

Выводы. Результаты исследования направлены на повышение эффективности трубчатых теплообменных аппаратов за счет использования пульсационных методов интенсификации теплообмена.

Ключевые слова: теплообменное оборудование, кожухотрубный теплообменный аппарат, пульсации потока, шахматный пучок труб, метод интенсификации теплообмена

Aydar Rafaelevich Khayrullin

Kazan State Power Engineering University, Postgraduate Student of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures Department, Russia, Kazan, telephone +7(843) 519-43-21, e-mail: kharullin@yandex.ru

Aigul Ilgizarovna Khaibullina

Kazan State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures Department, Russia, Kazan, telephone +7(843) 519-42-06, e-mail: haybullina.87@mail.ru

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23–29–00845, rscf.ru/en/project/23-29-00845/
The study is supported by a grant from the Russian Science Foundation № 23–29–00845, rscf.ru/en/project/23-29-00845/

Elena Rinatovna Kirzhatskikh

Kazan State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures Department, Russia, Kazan, telephone +7(843) 519-43-21, e-mail: ukaneeva1991@mail.ru

Numerical study of heat transfer enhancement in a staggered tube bundle under various operating parameters of forced flow pulsation

Abstract

Background. The share of heat exchange equipment in industrial plants is significant, therefore, the efficiency of heat exchangers affects the technical and economic indicators of industrial plants taken as a whole. Increasing the efficiency of heat exchange equipment is possible due to the application of various methods of heat exchange enhancement, for example, due to forced flow pulsations, which are active methods of heat transfer enhancement. Despite the available positive results in this area, the consistent patterns of heat transfer under conditions of forced flow pulsations have not been sufficiently studied.

Materials and methods. The study of heat transfer patterns in a tube bundle has been carried out numerically using Ansys Fluent. Discretization of the Navier–Stokes and convective heat transfer (Fourier–Kirchhoff) equations have been carried out using the finite volume method. Validation of the numerical model has been carried out using the well-known criteria equation to predict heat transfer in tube bundles under steady-state flow conditions.

Results. As a result of numerical simulation, the influence of operating parameters on heat transfer of a staggered bundle under symmetric and asymmetric forced reciprocating flow pulsations has been established. It has been shown that with an increase of the product of the dimensionless amplitude and the Strouhal number Sh , which characterizes the pulsation intensity, an increase of the Nusselt number Nu occurs regardless of the Reynolds number Re and the Prandtl number Pr . It has been established that the number Nu in a pulsating flow increases with the growth of Re and Pr , while their influence on the increase of Nu in a pulsating flow compared to a steady flow is insignificant. During the numerical study, a maximum intensification of heat transfer of 1,66 times has been obtained. It has been shown that the duty cycle of pulsations has an insignificant effect on heat transfer, while the thermohydraulic efficiency of the tube bundle is increasing in case of asymmetric pulsations. Empirical correlations to predict heat transfer in a staggered tube bundle under flow pulsations have been obtained.

Conclusions. The obtained results are aimed at increasing the efficiency of tubular heat exchangers by using pulsation methods of heat transfer enhancement.

Key words: heat exchange equipment, shell-and-tube heat exchanger, flow pulsations, staggered tube bundle, heat transfer enhancement method

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.1.021-029

Введение. Массогабаритные теплообменные аппараты (ТА) являются неотъемлемой частью промышленных установок. Эффективность теплообменного оборудования напрямую влияет на экономическую эффективность технологических процессов промышленных установок. Повышение технико-экономических показателей ТА возможно за счет применения различных методов интенсификации теплообмена. Пульсирующие течения, созданные искусственным путем, позволяют интенсифицировать теплообмен за счет подвода дополнительной энергии, что относит их к активным методам интенсификации теплообмена. В отличие от пассивных методов интенсификации теплообмена, вынужденные пульсации потока остаются менее изученными, что отчасти вызвано сложностью исследования нестационарных течений. Теплообмен в условиях вынужденных пульсаций потока предполагает оценку большего количества факторов по сравнению со стационарным течением. Пульсации потока в основном характеризуются частотой колебания потока и амплитудой пульсаций. Колебания потока могут иметь симметричный характер или несимметричный, когда периоды времени ускорения и торможения различны. Амплитуда

может выражаться в безразмерной амплитуде скорости (отклонение от средней скорости) или в относительном расстоянии (отклонение потока относительно поверхности теплообмена). Несмотря на возникающие сложности при исследовании пульсирующих течений, такие течения в некоторых случаях позволяют существенно интенсифицировать теплообмен, что представляет научный и практический интерес.

Ввиду распространенности трубчатых ТА, внешний теплообмен и гидродинамика пучков труб является классической задачей многие десятилетия. Несмотря на имеющуюся подробную информацию по теплогидравлическим характеристикам для широкого диапазона режимных и геометрических параметров [1], исследования в данной области остаются актуальными [2, 3]. При этом теплообмен в условиях наложенного пульсационного потока в пучках труб остается менее изученным. Подробный обзор пульсирующих течений в поперечно обтекаемых пучках труб приведен в [4], где продолжают комплексные исследования характеристик теплообмена при возвратно-поступательных пульсациях потока в пучках труб [4–6].

В имеющихся исследованиях по данной тематике показано, что теплообмен в пучках

труб существенно зависит от режимных и геометрических параметров. В [7] в результате численного исследования показано, что теплоотдача колеблющегося трехрядного коридорного пучка может увеличиться до 25 %, что связывается с синхронизацией вынужденных частот с частотой вихреобразования в следе первого ряда пучка. Результаты численных исследований [8, 9] показали, что интенсификация теплообмена тандема цилиндров при пульсациях потока зависит от числа Рейнольдса, частоты и геометрических параметров пучка. В [10] рассмотрено влияние синусоидальных пульсаций потока на теплообмен шахматного пучка труб, в результате численных экспериментов показано, что теплоотдача пучка труб увеличивается при более высоких частотах и зависит от ряда трубки в пучке. В [8–10] предложены обобщающие зависимости для прогнозирования теплоотдачи в пучках труб в условиях пульсирующих потоков, однако полученные корреляции лимитированы ламинарными режимами. В [11] проведено численное исследование эффекта синусоидальных пульсаций потока жидкого металла на теплообмен коридорного пучка труб, которое показало, что с увеличением частоты пульсаций имеется некоторый максимум теплоотдачи, дальнейшее увеличение приводит к снижению теплообмена, при этом увеличение амплитуды оказывает положительный эффект на теплоотдачу во всем диапазоне исследований. В [12] рассмотрен теплообмен каплевидного пучка труб при пульсациях потока наножидкости, в результате численного эксперимента получен схожий с [11] эффект частоты и амплитуды. Увеличение теплоотдачи пучка происходит на фоне повышения амплитуды, при этом с увеличением частоты теплоотдача может как увеличиваться, так и понижаться.

В серии экспериментальных работ [13, 14] проведено исследование колеблющегося потока относительно пучков труб, погруженных в открытый бассейн, в отсутствии направленного стационарного потока. Безразмерная амплитуда колебаний выражалась в смещении потока относительно диаметра трубки пучка и достигала значения 18,75. Несмотря на низкую частоту колебаний $f \leq 0,5$ Гц, в результате проведенных опытов достигнута интенсификация теплообмена 200 % за счет высокоамплитудных колебаний потока. При этом если повышение амплитуды приводило к росту теплоотдачи пучка, то частота колебаний практически не оказывала влияния на теплообмен. В другой серии экспериментальных работ [15, 16] исследованы теплообмен и гидродинамика в пучках труб при

пульсациях потока воздуха, близких к гармоническим. Результаты исследования показали, что теплоотдача пучков может отличаться значительно, в зависимости от их разреженности и компоновки. Показано также, что интенсификация теплообмена происходит на фоне роста интенсивности турбулентности в следе трубки пучка. В серии работ [17–19] исследованы статистические характеристики потока пучков труб в условиях вынужденных пульсаций. Одной из основных целей исследований являлось определение режимов, при которых происходит подстройка вынужденных частот пульсаций под частоты вихреобразования в следе трубок пучка, при этом теплообмен пучка не рассматривался.

Поскольку теплообмен в пучках труб при вынужденных пульсациях потока сложнее стационарного течения и отсутствует систематизированная информация в данной области, понимание механизмов теплообмена такого течения остается на начальном этапе развития. Расширение информации о взаимном влиянии режимных и геометрических параметров по характеристикам теплообмена в пучках труб позволит улучшить фундаментальные знания и будет способствовать применению пульсирующих течений для повышения эффективности теплообменного оборудования.

Математическая модель. Вычислительные ресурсы при нестационарном течении в задачах гидродинамики возрастают существенно, поэтому моделирование конвективного теплообмена в пучках труб зачастую ведется в двухмерной постановке. Использование трехмерной постановки еще более усложняется при многопараметрическом исследовании. Для упрощения задачи численное исследование велось в двухмерной постановке. Способность предсказывать интегральные характеристики теплообмена в пучках труб при двухмерной постановке в условиях вынужденных пульсаций потока показана в [5, 11]. Область расчета математической модели показана на рис. 1. Диаметр трубки пучка D составляет 0,02 м, входной и выходной стабилизационный участок соответствует $10D$. Количество рядов в продольном направлении соответствует 15. Известно, что теплообмен начальных рядов меньше глубинного ряда пучка труб [1], что необходимо учитывать при прогнозировании теплообмена в пучках труб. Влияние начальных рядов на теплообмен всего пучка уменьшается с увеличением числа рядов и может не учитываться [1]. Трубки пучка расположены в шахматном порядке по схеме повернутого на 45° квадрата к набегающему потоку с относительным шагом трубок $S/D = 1,3$.

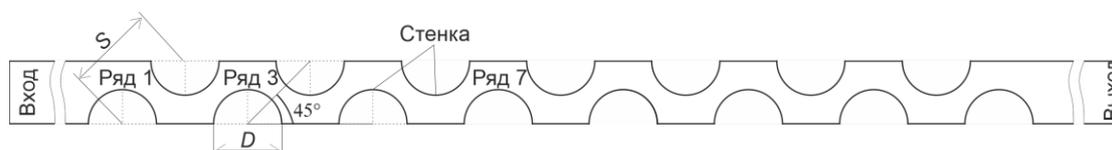


Рис. 1. Расчетная область численной модели

На входе в пучок труб для стационарного течения задавалась постоянная скорость по нормали, для нестационарного течения – пульсации скорости. Температура потока при пульсационном и стационарном течении на входном и выходном участке задавалась постоянной. На верхней и нижней частях канала задавалось условие симметрии и отсутствие проскальзывания. На стенках трубки седьмого ряда задавалось условие постоянной температуры, на остальных трубках принималось условие адиабатной стенки. Локальный нагрев седьмого ряда позволил исключить влияние начальных рядов на теплообмен всего пучка. Разница температур между стенкой нагреваемой трубки и входной температурой составляла один градус. На выходе из канала задавалось постоянное давление 101325 Па. Теплофизические свойства несжимаемой жидкости были постоянными, для фиксированного числа Прандтля Pr силы гравитации не учитывались. Пульсации потока имели симметричный и несимметричный возвратно-поступательный характер и определялись режимными параметрами. На рис. 2 приведен пример для различной скважности пульсаций, которая рассчитывалась по формуле

$$\psi = \frac{T_1}{T}, \quad (1)$$

где $T = T_1 + T_2$ – период пульсаций, с; T_1 и T_2 – первый и второй полупериоды пульсаций соответственно, с.

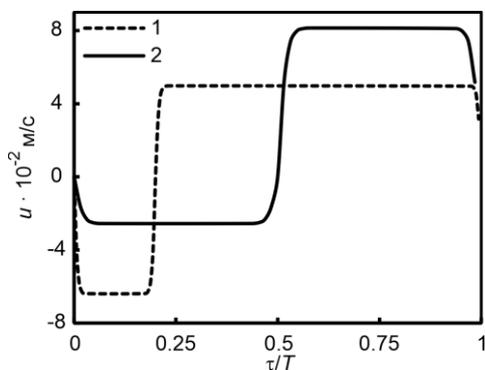


Рис. 2. Пульсации скорости на входе в пучок при $Re = 3500$, $Pr = 3$, $A/DSh = 0,15$: 1 – $\psi = 0,2$; 2 – $\psi = 0,5$

Частота пульсаций f определяется по формуле

$$f = \frac{1}{T} \text{ Гц.} \quad (2)$$

Амплитуда пульсаций выражается в безразмерном виде относительно трубки пучка A/D , при этом за размерную амплитуду принимается смещение частицы жидкости в пучке труб в противоположном направлении от стационарного потока за T_1 :

$$A = -\int_0^{T_1} u dt \text{ м,} \quad (3)$$

где u – скорость в самом узком сечении межтрубного пространства пучка труб, м/с; τ – время, с.

Число Рейнольдса в пучке труб определяется по формуле

$$Re = \frac{uD}{\nu}, \quad (4)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости теплоносителя, m^2/s .

Осредненная за один период пульсаций скорость в пучке труб при пульсационном течении u_p равна скорости стационарного течения u_{st} :

$$\langle u_p \rangle = \frac{\int_0^T u dt}{T} = u_{st}. \quad (5)$$

Число Нуссельта в пучке труб при стационарном Nu_{st} и пульсационном течении Nu_p рассчитывается следующим образом:

$$Nu_{st} = \frac{q_{st} D}{\lambda \Delta t_{st}}; \quad (6)$$

$$Nu_p = \frac{q_p D}{\lambda \Delta t_p}, \quad (7)$$

где q_{st} , q_p – плотность теплового потока, осредненная по поверхности пучка труб, $Вт/м^2$; Δt_{st} , Δt_p – разница температур теплоносителя и стенки трубки седьмого ряда, $^{\circ}C$, при пульсационном и стационарном течении соответственно; λ – коэффициент теплопроводности, $Вт/м \cdot ^{\circ}C$.

Nu_p в уравнении (7) осредняется за один период пульсаций аналогично уравнению (5). Плотность теплового потока рассчитывается по формуле

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}, \quad (8)$$

где $\partial t / \partial n$ – градиент температуры на стенке трубки седьмого ряда.

Теплогидравлическая эффективность пучка труб при одинаковом числе Рейнольдса ($Re_p = Re_{st}$) [20] определяется следующим образом:

$$\eta = \frac{Nu_p / Nu_{st}}{\xi_p / \xi_{st}}, \quad (9)$$

где $\xi_{p,st}$ – коэффициент гидравлического сопротивления, который рассчитывается по формулам для стационарного и пульсационного течения соответственно:

$$\xi_{st} = \frac{\Delta P_{st} 2}{\rho u_{st}^2}, \quad (10)$$

где ΔP_{st} – перепад давления в пучке труб, Па, при стационарном течении;

$$\xi_p = \frac{\langle \Delta P_p |u| \rangle 2}{\rho u_p^3}, \quad (11)$$

где $\langle \Delta P_p | u \rangle$ – мощность на прокачку теплоносителя, Вт/м², осредненная за один период пульсаций следующим образом:

$$\langle \Delta P_p | u \rangle = \frac{\int_0^T \Delta P_p | u | dt}{T}, \quad (12)$$

где ΔP_p – мгновенное значение перепада давления, Па, в пучке труб при пульсационном течении.

Поскольку избыточное давление на выходе было принято нулевым, перепад давления как в пульсационном, так и в стационарном течении определялся по осредненному давлению на входе в расчетную область (см. рис. 1).

Расчет течения жидкости и конвективного теплообмена выполнен на основе уравнений Навье–Стокса и Фурье–Кирхгофа с использованием метода конечных объемов в Ansys Fluent, k - ϵ модели турбулентности с улучшенной пристеночной функцией RNG k - ϵ EWT².

В результате тестовых расчетов сходимости сеточного решателя была выбрана расчетная сетка с количеством контрольных объемов 60668. Количество слоев в пристеночной зоне соответствовало 15 при минимальном размере контрольного объема r , отнесенного к диаметру цилиндра пучка труб $r/D = 1 \cdot 10^{-3}$, при этом размер контрольных объемов увеличивался с коэффициентом 1,2 в радиальном направлении от стенки цилиндра. Безразмерный шаг по времени, выбранный в результате тестовых расчетов, соответствовал $9,44 \cdot 10^{-3} = |u_{\max}| \cdot \Delta t / D$, где u_{\max} – максимальная скорость в пучке труб, м/с; Δt – шаг по времени, с. Размерный шаг по времени в зависимости от режимных параметров находился в диапазоне от $9,97 \cdot 10^{-5}$ до $1,57 \cdot 10^{-3}$. Расчеты проводили до выхода на квазистационарный режим, который констатировали при различии теплового потока, осредненного за два соседних периода пульсаций, не более чем на 0,1 %. Для выхода на квазистационарный режим требовалось не более 12 периодов пульсаций.

Результаты исследования. Влияние вынужденных пульсаций на теплообмен в пучке труб исследовалось при различных значениях числа Рейнольдса Re , числа Прандтля Pr , скважности пульсаций ψ и с относительным шагом трубок $S/D = 1,3$ (см. рис. 1). В качестве рабочей жидкости использовалась вода. Теплофизические свойства рабочей жидкости соответствовали значениям числа Pr , указанным в таблице. Матрица полнофакторного численного эксперимента также приведена в таблице. Для уменьшения вариантов расчета оценка влияния амплитуды и частоты пульсаций проводилась с помощью безразмерного комплекса A/DSh , где $Sh = fD/u_{st}$ (Sh – число Струхала).

Параметры численного эксперимента

Уровни	Re	A/DSh	Pr	ψ
1	3500	0,15	3	0,2
2	6000	0,46	5,5	0,5
3	8500	0,77	8	–

Для валидации результатов моделирования теплообмен в пучке труб при двух значениях S/D для стационарного течения сравнивался с критериальным уравнением (рис. 3), предложенным А. Жукаускасом [1] по результатам обобщения экспериментальных данных для шахматных пучков труб:

$$Nu = 0,4Re^{0,6}Pr^{0,36}. \quad (13)$$

Результаты численного моделирования показывают, что теплоотдача в пучке труб удовлетворительно согласуется с уравнением (13), различие для пучка при $S/D = 1,3$ и $S/D = 1,8$ составило не более 17 и 11 % соответственно. Большее расхождение с уравнением (13) при $S/D = 1,3$, возможно, связано с тем, что данное значение S/D выходит за пределы исследованных А. Жукаускасом [1].

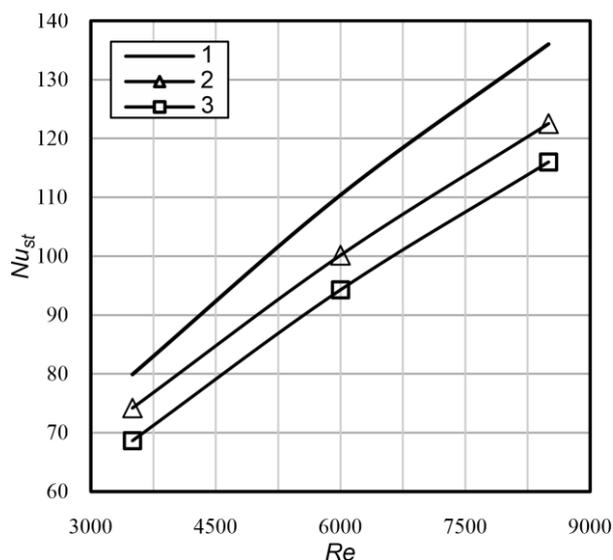


Рис. 3. Зависимость Nu_{st} от Re при $Pr = 3$: 1 – результаты моделирования; 2 – данные А. Жукаускаса [1]

На рис. 4 и 5 показано влияние интенсивности пульсаций A/DSh на теплообмен пучка труб при числе Прандтля $Pr = 3$, $Pr = 8$ и различном числе Рейнольдса Re . Увеличение интенсивности пульсаций A/DSh приводит к росту числа Нуссельта Nu_p при всех исследованных значениях числа Рейнольдса Re и числа Прандтля Pr . Полученные результаты согласуются с данными других исследований. В [4–6, 11, 15] амплитуда и частота пульсаций также оказывали положительное влияние на теплообмен коридорного пучка. Влияние Re и Pr на теплообмен пучка труб при пульсационном течении

² ANSYS Fluent Theory Guide. ANSYS Inc, Canonsburg, 2016.

аналогично стационарному течению: увеличение как Re , так и Pr приводит к росту теплоотдачи.

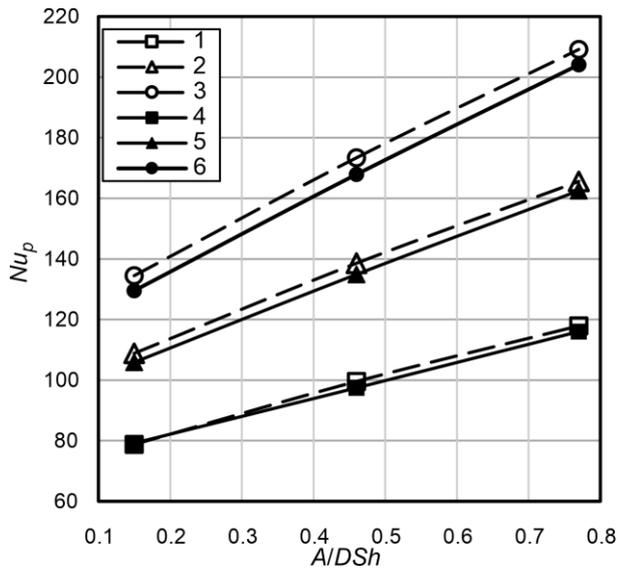


Рис. 4. Зависимость Nu_p от A/DSh для различных значений ψ и Re при $Pr = 3$: 1 – $Re = 3500$, $\psi = 0,2$; 2 – $Re = 6000$, $\psi = 0,2$; 3 – $Re = 8500$, $\psi = 0,2$; 4 – $Re = 3500$, $\psi = 0,5$; 5 – $Re = 6000$, $\psi = 0,5$; 6 – $Re = 8500$, $\psi = 0,5$

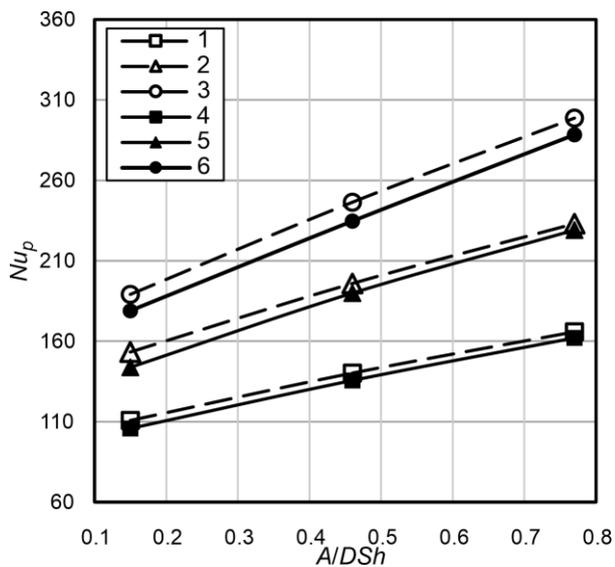


Рис. 5. Зависимость Nu_p от A/DSh для различных значений ψ и Re при $Pr = 8$: 1 – $Re = 3500$, $\psi = 0,2$; 2 – $Re = 6000$, $\psi = 0,2$; 3 – $Re = 8500$, $\psi = 0,2$; 4 – $Re = 3500$, $\psi = 0,5$; 5 – $Re = 6000$, $\psi = 0,5$; 6 – $Re = 8500$, $\psi = 0,5$

Влияние скажности пульсаций на теплоотдачу пучка труб в целом несущественно. Теплоотдача при несимметричных пульсациях незначительно выше, чем при симметричных пульсациях во всем исследованном диапазоне, при этом данная тенденция усиливается (на 1–2 %) с ростом Pr , Re и A/DSh .

На рис. 6 показано влияние A/DSh на прирост числа Нуссельта Nu_p/Nu_{st} в пульсационном течении по сравнению со стационарным течением

течением. Рост A/DSh приводит к увеличению Nu_p/Nu_{st} , при этом влияние Re на Nu_p/Nu_{st} по сравнению с влиянием A/DSh незначительно. Например, при $Pr = 3$ и $\psi = 0,5$ с увеличением A/DSh от 0,15 до 0,77 прирост числа Нуссельта Nu_p/Nu_{st} увеличивается с 1,12 до 1,76, при этом разброс прироста Nu_p/Nu_{st} для исследованного диапазона Re при $\psi = 0,5$ составляет не более 1,04 раза.

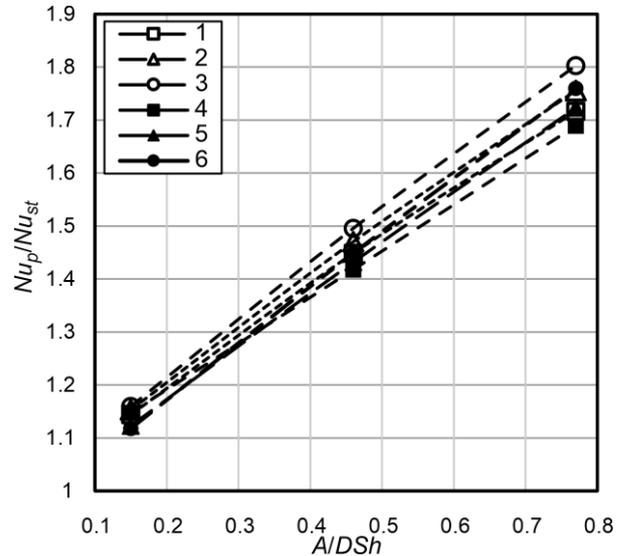


Рис. 6. Зависимость Nu_p/Nu_{st} от A/DSh для различных значений ψ и Re при $Pr = 3$: 1 – $Re = 3500$, $\psi = 0,2$; 2 – $Re = 6000$, $\psi = 0,2$; 3 – $Re = 8500$, $\psi = 0,2$; 4 – $Re = 3500$, $\psi = 0,5$; 5 – $Re = 6000$, $\psi = 0,5$; 6 – $Re = 8500$, $\psi = 0,5$

На рис. 7, 8 показаны зависимости отношения гидравлического сопротивления ξ_p/ξ_{st} в пульсационном течении по сравнению со стационарным течением и теплогидравлическая эффективность пучка труб при $Pr = 3$ и различном числе Re .

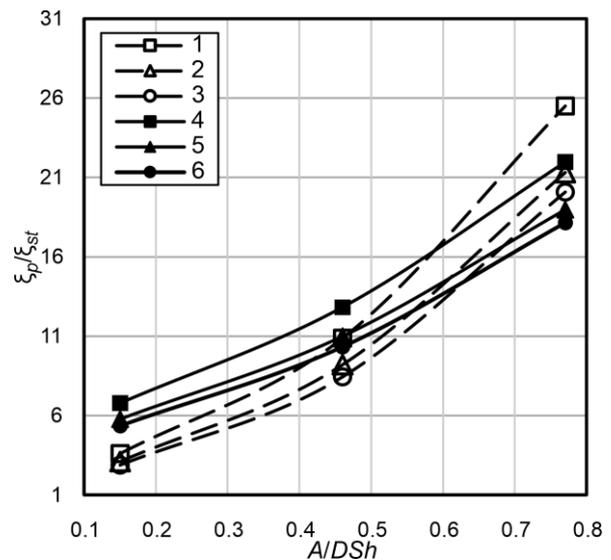


Рис. 7. Зависимость ξ_p/ξ_{st} от A/DSh для различных значений ψ и Re при $Pr = 3$: 1 – $Re = 3500$, $\psi = 0,2$; 2 – $Re = 6000$, $\psi = 0,2$; 3 – $Re = 8500$, $\psi = 0,2$; 4 – $Re = 3500$, $\psi = 0,5$; 5 – $Re = 6000$, $\psi = 0,5$; 6 – $Re = 8500$, $\psi = 0,5$

Увеличение интенсивности пульсаций A/DSh приводит к росту гидравлического сопротивления в несколько раз, при этом рост ξ_p/ξ_{st} при несимметричных пульсациях с увеличением A/DSh опережает рост ξ_p/ξ_{st} при симметричных пульсациях. Когда интенсивность пульсаций минимальна ($A/DSh = 0,15$), гидравлическое сопротивление ниже при скважности $\psi = 0,2$, с увеличением A/DSh до $0,77$ гидравлическое сопротивление выше при $\psi = 0,5$. Эффект влияния числа Re на ξ_p/ξ_{st} менее значителен по сравнению с A/DSh , при этом увеличение числа Re приводит к уменьшению прироста ξ_p/ξ_{st} .

Теплогидравлическая эффективность пучка труб η максимальна при минимальной интенсивности пульсаций A/DSh и уменьшается с ростом A/DSh (рис. 8). Эффективность пучка труб при несимметричных пульсациях превосходит эффективность при симметричных пульсациях в два раза для минимального значения A/DSh за счет меньшего роста гидравлического сопротивления при $\psi = 0,2$ (рис. 7). С увеличением A/DSh теплогидравлическая эффективность пучка труб при несимметричных пульсациях приближается к эффективности при симметричных пульсациях.

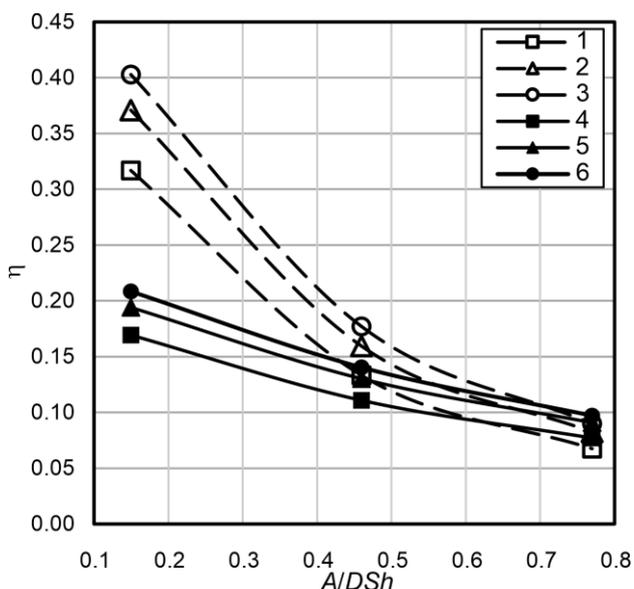


Рис. 8. Зависимость η от A/DSh для различных значений ψ и Re при $Pr = 3$: 1 – $Re = 3500, \psi = 0,2$; 2 – $Re = 6000, \psi = 0,2$; 3 – $Re = 8500, \psi = 0,2$; 4 – $Re = 3500, \psi = 0,5$; 5 – $Re = 6000, \psi = 0,5$; 6 – $Re = 8500, \psi = 0,5$

По результатам численного исследования получены обобщающие зависимости для прогнозирования теплоотдачи при несимметричных и симметричных пульсациях:

$$Nu_p = 0,5Re^{0,629} Pr^{0,353} (A/DSh)^{0,253}, \quad (14)$$

$$Nu_p/Nu_{st} = 1,393Re^{0,031} Pr^{0,011} (A/DSh)^{0,253}, \quad (15)$$

$$Nu_p = 0,591 Re^{0,61} Pr^{0,335} (A/DSh)^{0,263}, \quad (16)$$

$$Nu_p/Nu_{st} = 1,634 Re^{0,013} Pr^{-0,006} (A/DSh)^{0,263}. \quad (17)$$

Уравнения (14)–(17) справедливы для шахматного пучка труб при принятых геометрических параметрах и режимных параметрах: $3500 \leq Re \leq 8500$; $3 \leq Pr \leq 8$; $0,15 \leq A/DSh \leq 0,77$.

Отклонение полученных зависимостей от данных численного эксперимента составляет не более 5 % (рис. 9, 10). Степенные показатели полученных уравнений (14)–(17) свидетельствуют о том, что прирост теплоотдачи Nu_p/Nu_{st} практически не зависит от Re и Pr , значение эмпирических констант при Re и Pr в уравнениях (15), (17) не более 0,031. В связи с этим прирост теплоотдачи Nu_p/Nu_{st} в пучке труб при вынужденных пульсациях потока определяется интенсивностью пульсаций A/DSh .

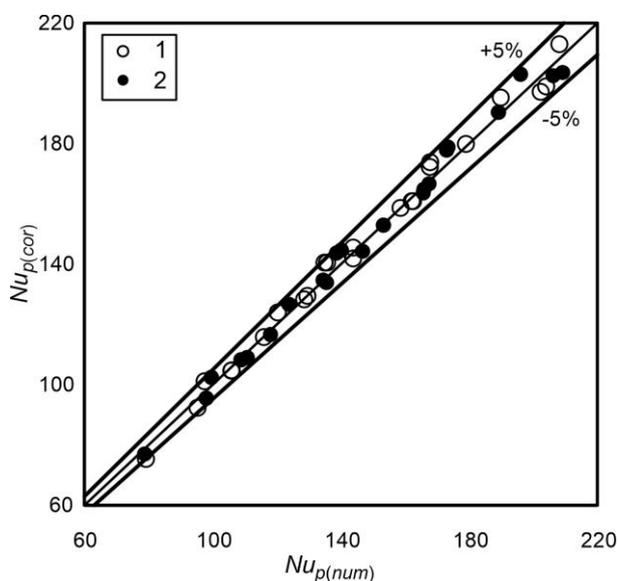


Рис. 9. Сравнение корреляций (14), (16) и результатов численного исследования: 1 – $\psi = 0,2$; 2 – $\psi = 0,5$

Для организации возвратно-поступательного движения в пучках труб ТА возможно применение технических решений, предложенных в [4, 21]. Возвратно-поступательное движение в ТА может осуществляться посредством поршня. Движение поршня с соответствующими режимными параметрами может контролироваться посредством пневматической или гидравлической системы.

При симметричных пульсациях простым решением для организации возвратно-поступательного пульсационного течения является применение кулачкового механизма на основе электропривода.

Целесообразность применения пульсирующего течения в ТА, в том числе аппаратного оформления пульсационного метода, должна рассматриваться на основе эксплуатационных и капитальных затрат, что выходит за рамки настоящего исследования.

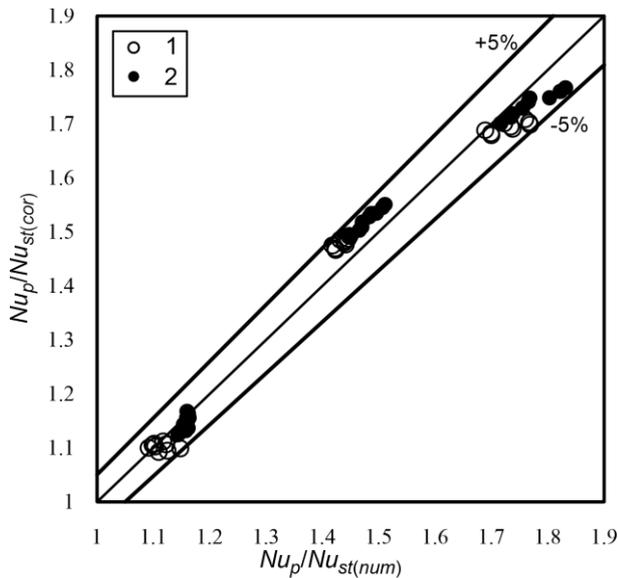


Рис. 10. Сравнение корреляций (15), (17) и результатов численного исследования: 1 – $\psi = 0,2$; 2 – $\psi = 0,5$

Необходимо учитывать, что рассмотренный метод интенсификации теплообмена требует дополнительных энергетических затрат на генерацию пульсаций и может являться экономически нецелесообразным в ряде случаев. Экономическая эффективность при организации пульсирующего течения в ТА подтверждена в работах других авторов [22, 23]. Одним из преимуществ исследованного метода является возможность организации пульсирующего течения в существующем ТА для восстановления теплопроизводительности, например, при пиковых нагрузках работы ТА. При этом возможны ситуации, когда габариты ТА могут быть ограничены техническим заданием. Для организации возвратно-поступательного движения оборудование может быть установлено дистанционно, что позволит повысить теплопроизводительность ТА, не увеличивая площадь теплообмена.

Выводы. В результате проведенного численного исследования теплообмена в шахматном пучке труб при вынужденных возвратно-поступательных пульсациях потока и анализа полученных данных установлено, что увеличение A/DSh приводит к росту Nu и уменьшению теплогидравлической эффективности η независимо от скважности ψ пульсаций, получены обобщающие зависимости, позволяющие предсказывать теплоотдачу шахматного пучка труб в диапазоне числа Рейнольдса $3500 \leq Re \leq 8500$, числа Прандтля $3 \leq Pr \leq 8$, и интенсивности пульсаций $0,15 \leq A/DSh \leq 0,77$.

Полученные в ходе численного исследования результаты показывают возможность интенсификации теплообмена в шахматных пучках труб за счет вынужденных пульсаций потока. Установлено, что скважность пульсаций незначительно влияет на теплообмен. При этом теплогидравлическая эффективность η для несимметричного

режима пульсаций может быть до двух раз выше, чем для симметричного режима. Принимая во внимание затраты энергии на генерацию пульсаций, можно заключить, что несимметричный режим является энергетически более эффективным при низкой интенсивности пульсаций.

Список литературы

1. **Zukauskas A.** Heat Transfer from Tubes in Cross-flow // *Adv. Heat Transf.* – 1972. – Vol. 18. – P. 87–159.
2. **Experimental** investigation and analysis on the cross flow characteristics over inline tube bundles with $S/D=1,875$ / X. Xie, A. Ma, H. Zhao, et al. // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2023. – Vol. 203. – P. 123800.
3. **Seroshtanov V., Gusakov A.** Gradient Heatmetry and PIV Investigation of Heat Transfer and Flow near Circular Cylinders // *Inventions.* – 2022. – Vol. 7, No. 3. – P. 80.
4. **Experimental** study of the in-line tube bundle thermal performance in pulsating flow / A. Hayrullin, A. Haibullina, A. Sinyavin, V. Ilyin // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2024. – Vol. 232. – P. 125916.
5. **Local** Heat Transfer Dynamics in the In-Line Tube Bundle under Asymmetrical Pulsating Flow / A. Haibullina, A. Hayrullin, D. Balzamor, et al. // *Energies.* – 2022. – Vol. 15, No. 22. – P. 8660.
6. **Хайбуллина А.И., Хайруллин А.Р.** Численное исследование теплообмена в коридорном пучке труб в условиях пульсирующего потока жидкости // *Вестник ИГЭУ.* – 2019. – Вып. 4. – С. 12–21.
7. **Ghazanfarjan J., Taghilou B.** Active Heat Transfer Augmentation of Bundle of Tubes by Partial Oscillatory Excitation // *Journal of Thermophysics and Heat Transf.* – 2018. – Vol. 32, No. 3. – P. 590–604.
8. **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. – P. 105–120.
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. – P. 440–448.
10. **Numerical** study on the heat transfer characteristics of oscillating flow in cryogenic regenerators / S. Chen, Q. Huang, M. Liang, et al. // *Cryogenics.* – 2018. – Vol. 96. – P. 99–107.
11. **Effect** of pulsation parameters on the spatial and temporal variation of flow and heat transfer characteristics in liquid metal cross flow the in-line tube bundle / H. Jiang, Y. Niu, P. Yang, Y. Liu // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2024. – Vol. 219. – P. 124871.
12. **Akcaay S., Akdag U.** Numerical Analysis of Thermal and Hydraulic Performance of Pulsating Nanofluid Flow Over Cam-Shaped Tube Bundles // *Iran J Sci Technol Trans Mech Eng.* – 2023. – Vol. 47, No. 3. – P. 969–988.
13. **A comparative** experimental study on the performance of staggered tube-bundle heat exchanger with unequally-pitch and equally-pitch arrangement in oscillating flow / Z. Wu, S. You, H. Zhang, W. Zheng // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2020. – Vol. 154. – P. 119680.
14. **Experimental** investigation on heat transfer characteristics of staggered tube bundle heat exchanger immersed in oscillating flow / Z. Wu, S. You, H. Zhang, W. Zheng // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2020. – Vol. 148. – P. 119125.
15. **Heat** transfer of a tube bundle in a pulsating flow: 4 / V.M. Molochnikov, A.N. Mikheev, A.K. Aslaev, et al. // *Thermophys. Aeromech.* – 2019. – Vol. 26, No. 4. – P. 547–559.

16. **Flow** structure between the tubes and heat transfer of a tube bundle in pulsating flow / V.M. Molochnikov, A.N. Mikheev, A.K. Aslaev, et al. // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2018. – Vol. 1105. – P. 012024.

17. **Konstantinidis E., Castiglia D., Balabani S.** An experimental study of steady and pulsating cross-flow over a semi-staggered tube bundle // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science.* – 2005. – Vol. 219, No. 3. – P. 283–298.

18. **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.

19. **Konstantinidis E., Balabani S., Yianneskis M.** Phase-Average Mean Flow and Turbulence Structure in a Staggered Cylinder Array Subjected to Pulsating Cross-Flow // *Journal of Fluids Engineering.* – 2004. – Vol. 126, No. 3. – P. 323–336.

20. **Bergles A.E., Bunn R.L., Junkhan G.H.** Extended performance evaluation criteria for enhanced heat transfer surfaces // *Letters in Heat and Mass Transfer.* – 1974. – Vol. 1, No. 2. – P. 113–120.

21. **Energy** efficiency of pulsating flows at heat-transfer enhancement in a shell-and-tube water oil cooler / A. Haibullina, L.S. Sabitov, A. Hayrullin, V.K. Ilyin // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* – 2018. – Vol. 412. – P. 012026.

22. **Федоткин И.М., Фирисюк В.Р.** Интенсификация теплообмена в аппаратах химических производств. – Киев: Техника, 1971. – 216 с.

23. **Колчин С.А.** Гидравлическое сопротивление дискретно-шероховатого канала при наложенных пульсациях потока: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.05, 01.04.14. – Казань, 2015. – 126 с.

References

1. Zukauskas, A. Heat Transfer from Tubes in Cross-flow. *Adv. Heat Transf.*, 1972, vol. 18, pp. 87–159.

2. Xie, X., Ma, A., Zhao, H., Li, X., Wu, X. Experimental investigation and analysis on the cross flow characteristics over inline tube bundles with $S/D = 1,875$. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, vol. 203, p. 123800.

3. Seroshtanov, V., Gusakov, A. Gradient Heatmetry and PIV Investigation of Heat Transfer and Flow near Circular Cylinders. *Inventions*, 2022, vol. 7, no. 3, p. 80.

4. Hayrullin, A., Haibullina, A., Sinyavin, A., Ilyin, V. Experimental study of the in-line tube bundle thermal performance in pulsating flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, vol. 232, p. 125916.

5. Haibullina, A., Hayrullin, A., Balzamor, D., Ilyin, V., Bronskaya, V., Khairullina, L. Local Heat Transfer Dynamics in the In-Line Tube Bundle under Asymmetrical Pulsating Flow. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 22, p. 8660.

6. Khaibullina, A.I., Khairullin, A.R. Chislennoe issledovanie teploobmena v koridornom puchke trub v usloviyakh pul'siruyushchego potoka zhidkosti [A numerical study of heat transfer in the in-line tube bundle under pulsating fluid flow conditions]. *Vestnik IGÉU*, 2019, issue 4, pp. 12–21.

7. Ghazanfarian, J., Taghilou, B. Active Heat Transfer Augmentation of Bundle of Tubes by Partial Oscillatory Excitation. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2018, vol. 32, no. 3, pp. 590–604.

8. 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.

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. Chen, S., Huang, Q., Liang, M., Chen, H., Chen, L., Hou, Y. Numerical study on the heat transfer characteristics of oscillating flow in cryogenic regenerators. *Cryogenics*, 2018, vol. 96, pp. 99–107.

11. Jiang, H., Niu, Y., Yang, P., Liu, Y. Effect of pulsation parameters on the spatial and temporal variation of flow and heat transfer characteristics in liquid metal cross flow the in-line tube bundle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, vol. 219, p. 124871.

12. Akcay, S., Akdag, U. Numerical Analysis of Thermal and Hydraulic Performance of Pulsating Nanofluid Flow Over Cam-Shaped Tube Bundles. *Iran J Sci Technol Trans Mech Eng.*, 2023, vol. 47, no. 3, pp. 969–988.

13. Wu, Z., You, S., Zhang, H., Zheng, W. A comparative experimental study on the performance of staggered tube-bundle heat exchanger with unequally-pitch and equally-pitch arrangement in oscillating flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 154, p. 119680.

14. Wu, Z., You, S., Zhang, H., Zheng, W. Experimental investigation on heat transfer characteristics of staggered tube bundle heat exchanger immersed in oscillating flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 148, p. 119125.

15. 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. *Thermophys. Aeromech*, 2019, vol. 26, no. 4, pp. 547–559.

16. Molochnikov, V.M., Mikheev, A.N., Aslaev, A.K., Goltsman, A.E., Paereliy, A.A. Flow structure between the tubes and heat transfer of a tube bundle in pulsating flow. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, vol. 1105, p. 012024.

17. Konstantinidis, E., Castiglia, D., Balabani, S. An experimental study of steady and pulsating cross-flow over a semi-staggered tube bundle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2005, vol. 219, no. 3, pp. 283–298.

18. 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.

19. Konstantinidis, E., Balabani, S., Yianneskis, M. Phase-Average Mean Flow and Turbulence Structure in a Staggered Cylinder Array Subjected to Pulsating Cross-Flow. *Journal of Fluids Engineering*, 2004, vol. 126, no. 3, pp. 323–336.

20. Bergles, A.E., Bunn, R.L., Junkhan, G.H. Extended performance evaluation criteria for enhanced heat transfer surfaces. *Letters in Heat and Mass Transfer*, 1974, vol. 1, no. 2, pp. 113–120.

21. Haibullina, A.I., Sabitov, L.S., Hayrullin, A.R., Ilyin, V.K. Energy efficiency of pulsating flows at heat-transfer enhancement in a shell-and-tube water oil cooler. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 412, p. 012026.

22. Fedotkin, I.M., Firisjuk, V.R. *Intensifikatsiya teploobmena v apparatakh khimicheskikh proizvodstv* [Intensification of Heat Transfer in Apparatuses of Chemical Industries]. Kiev: Tekhnika, 1971. 216 p.

23. Kolchin, S.A. *Gidravlichesкое soprotivlenie diskretno-sherokhovatogo kanala pri nalozhennykh pul'satsiyakh potoka*. Diss. ... kand. tekhn. nauk: 01.02.05, 01.04.14 [Hydraulic Resistance of a Discrete-Rough Channel with Superimposed Flow Pulsations: Cand. tech. sci. diss.: 01.02.05, 01.04.14]. Kazan, 2015. 126 p.