

Министерство промышленности и торговли Республики Татарстан
Акционерное общество «Казанский научно-исследовательский
институт авиационных технологий»
ГАУ «Центр энергосберегающих технологий Республики Татарстан
при Кабинете Министров Республики Татарстан»
Казанский (Приволжский) Федеральный университет
Казанский национальный исследовательский технический университет
имени А.Н. Туполева - КАИ (КНИТУ - КАИ)
Казанский национальный исследовательский технологический университет
Академия наук Республики Татарстан
ООО «ЦПР «Техносвар»

Материалы

VIII Международной научно-технической конференции
**«ИННОВАЦИОННЫЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ
И МАТЕРИАЛЫ – 2017»**
(МНТК «ИМТОМ – 2017»)

Часть 2

6-8 декабря 2017 года

Казань
2017

УДК 67
ББК К34
М34

Ответственность за содержание тезисов возлагается на авторов.

М34 Материалы VIII Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2017» (МНТК «ИМТОМ–2017»). Ч. 2. – Казань, 2017. – 396 с., ил.

Материалы состоят из 6 разделов в соответствии с секциями Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы–2017» (МНТК «ИМТОМ–2017»): «Высокоэффективные материалы, технологии и оборудование в машиностроении», «Инновационные разработки и экономика в машиностроении», «Химическое машиностроение», «Математическое и физическое моделирование информационных, технических, технологических и управленческих систем и процессов», «Инновационные сварочные технологии в промышленности», «Инновационные разработки малых и средних предприятий».

Будет полезно научным работникам, технологам и инженерам соответствующих специальностей.

ISBN 978-5-9500631-7-6 (m. 2)

ISBN 978-5-9500631-5-2

© АО «КНИАТ», 2017

© ООО «Фолиант», оформление, 2017

Все права защищены. Материалы Сборника трудов не могут быть воспроизведены в любой форме или любыми средствами, электронными или механическими, включая фотографирование, магнитную запись или иные средства копирования или сохранения информации без письменного разрешения АО «Казанский научно-исследовательский институт авиационных технологий».

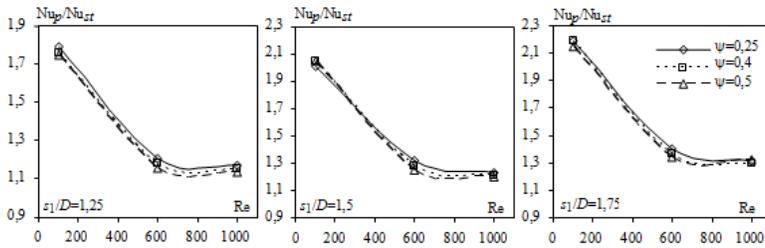


Рис. 2. Зависимость Nu_p/Nu_{st} от Re при $Pr = 215$, $\beta = 15$, $f = 0,5$ Hz, $\varphi = 90^\circ$

По результатам численного эксперимента можно сделать вывод, что повышение числа Pr также как и повышение Re приводит к снижению теплоотдачи при пульсирующем течении по сравнению со стационарным независимо от s_1/D . Также при минимальных β и f наблюдаются значения $Nu_p/Nu_{st} < 1$, что в основном проявляется при приближении к симметричному характеру пульсаций $\psi = 0,5$ и с уменьшением s_1/D .

В результате обобщения данных численного моделирования получено критериальное уравнение следующего вида

$$\frac{Nu_p}{Nu_{st}} = 0,954 Re^{-0,201} \cdot Pr^{-0,211} \cdot \beta^{0,184} \cdot Fo^{-0,230} \cdot \psi^{-0,053} \cdot \varphi^{0,085} \cdot s_1/D^{0,287} \quad (6)$$

где Nu_{st} – числа Нуссельта при стационарном течении можно найти по критериальному уравнению

$$Nu_{st} = 0,354 \cdot Re^{0,6} Pr^{0,33} \varphi^{-0,1} \cdot (s_1/D)^{-0,45} \cdot (\mu_{ж}/\mu_{ст})^{0,14}, \quad (7)$$

Уравнение (6) получено для диапазонов $215 \leq Pr \leq 363$, $0,25 \leq \psi \leq 0,5$, $100 \leq Re \leq 1000$, $15 \leq \beta \leq 35$, $5,81 \cdot 10^{-4} \leq Fo \leq 14,53 \cdot 10^{-4}$. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,906$, максимальная погрешность аппроксимации не более $\delta_{max} = 35,7\%$, среднее отклонение не более $\bar{\delta} = 5,5\%$.

Численным методом исследован теплообмен при поперечном обтекании пучков труб с наложением на поток жидкости низкочастотных пульсаций. Показано, что в зависимости от параметров пульсаций теплоотдача Nu_p/Nu_{st} может быть увеличена до 3 раз.

Установлено, что увеличение β и f приводит к повышению Nu_p/Nu_{st} , а увеличение Re , Pr и ψ к снижению Nu_p/Nu_{st} .

Список литературы

1. Li Hua, Zhong Yingjie, Zhang Xuemei, Deng Kai, Lin Haihao, Cai Luyin. Experimental Study of Convective Heat Transfer in Pulsating Air Flow inside Circular Pipe // International Conference on Power Engineering-2007, October 23-27, 2007, Hangzhou, China. 880-885 P.

2. Jin D.X., Lee Y.P., Lee D.-Y. Effects of the pulsating flow agitation on the heat transfer in a triangular grooved channel // International Journal of Heat and Mass Transfer Vol., 50. 2007. 3062–3071 P.

3. Mikhcev N.I., Molochnikov V.M., Mikheev A.N., Dushina O.A. Hydrodynamics and heat transfer of pulsating flow around a cylinder // *International Journal of Heat and Mass Transfer* Vol., 109. 2017. 254–265 P.
4. Armin W, Wolfgang P Dynamics of unsteady heat transfer in pulsating flow across a cylinder // *International Journal of Heat and Mass Transfer* Vol., 109, 2017. 1111–1131 P.
5. Amiri S., Taher R., Mongeau L. Quantitative visualization of temperature field and measurement of local heat transfer coefficient over heat exchanger elements in sinusoidal oscillating flow// *Experimental Thermal and Fluid Science* Vol., 633. 2017. 1724–1730 P.
6. Khalil K, Bader A., Awadh A., Ioan P. Mixed convection analysis of laminar pulsating flow and heat transfer over a backward-facing step // *International Journal of Heat and Mass Transfer* Vol., 51. 2008. 5785–5793 P.
7. Moon Jeong Woo, Kim Seo Young, Cho Hyung Hee. Frequency-dependent heat transfer enhancement from rectangular heated block array in a pulsating channel flow // *International Journal of Heat and Mass Transfer* Vol., 48. 2005. 4904–4913 P.
8. Hiroshi Iwai, Tomoyuki Mambo, Naoki Yamamoto, Kenjiro Suzuki Laminar convective heat transfer from a circular cylinder exposed to a low frequency zero-mean velocity oscillating flow *International Journal of Heat and Mass Transfer* Vol. 47. 2004. 4659–4672 P.
9. Musaeva, D.A., Sinyavin, A.A., Gurianov A.I. Mathematical modeling of heat transfer processes under conditions of low-frequency non-symmetric pulsations of fluid flow, *Energy problems*, no. 7–8, 19–27 P.
10. Musaeva, D.A., Gurianov A.I., Sinyavin A.A. Investigation of influence of low-frequency impulses on heat transfer processes with cross-flow in corridor sheave of tubes // *Modern science: researches, ideas, results, technologies*. no. 2 2012, 183–186 P.
11. Wilcox David C. *Turbulence Modeling for CFD*. Third edition copyright 2006 by DCW Industries, Inc. 515 P.
12. You Qin Wang *Turbulence Modeling Applied to Flow Through a Staggered Tube Bundle* // *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. – 2010. – Vol. 24, № 3. С. 534–543.
13. Khaybullina A.I., Khayrullin A.R., Sinyavin A.A., Ilin V.K. Modeling the turbulence of a pulsating flow of a heat carrier in a corridor bundle of tubes // *Collection of articles of the V All-Russian Scientific Conference "Thermophysical foundations of energy technologies" with international participation, Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2014. 368-372 P.*
14. Khaybullina A.I., Khayrullin A.R., Ilin V.K. Heat transfer in the flow channel in tube bundle corridor type under imposed on the flow liquid of upstream low-frequency asymmetrical pulsations // *Energy Problems*, No.11-12, 2016, 64-75 P.
15. Ramesh K. Dusan P. *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. Copyright 2003 John Wiley & Sons, Inc. 931 P.

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОРИДОРНОГО ПУЧКА ТРУБ В УСЛОВИЯХ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ПОТОКА ЖИДКОСТИ

Хайбуллина А.И.,

старший преподаватель кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий», Казанский государственный энергетический университет

Чирухин К.В.

студент кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий», Казанский государственный энергетический университет

Аннотация. В работе приведена методика определения теплогидравлической эффективности η пучков труб при пульсирующем потоке теплоносителя. По данным численного моделирования исследовано влияние числа Рейнольдса Re безразмерной амплитуды пульсаций β и числа Струхала Sh на теплогидравлическую эффективность η коридорного пучка труб. Найдены, оптимальные режимы пульсаций соответствующие максимальной η .

Abstract. The method of determining the thermal and hydraulic efficiency η of tube bundles with a pulsating flow is given in the paper. Based on numerical simulation, the effect of the Reynolds number Re of the dimensionless pulsation amplitude β and the Strouhal number Sh on the thermal and hydraulic efficiency η of the corridor bundle of tubes was investigated. The optimum pulsation regimes corresponding to the maximum η are found.

Ключевые слова: теплогидравлическая эффективность, пульсирующие течения, теплоотдача, коридорный пучок труб, коэффициент гидравлического сопротивления.

Key words: thermal and hydraulic efficiency, pulsating flow, heat transfer, corridor tube bundle, coefficient of hydraulic loss.

На сегодняшний день имеются множество работ посвященных исследованию теплообмена и гидродинамики в пучках труб с целью повышения эффективности теплообменного оборудования. [1–10]

В работе [2] численным методом исследован теплообмен колеблющегося цилиндра в потоке жидкости. Безразмерная максимальная частота скорости колебания цилиндра лежала в диапазоне $0,5 \leq V_m \leq 1$, где $V_m = v_m/u_0$, здесь v_m и u_0 максимальная скорость колебания цилиндра, м/с и скорость потока жидкости, м/с соответственно. Диапазон чисел Рейнольдса составлял $100 \leq Re \leq 500$. Замечено, что с увеличением V_m интенсификация теплоотдачи повышается, а с ростом Re понижается. Когда $Re = 200$, $V_m = 0,25$, $V_m = 0,5$, $V_m = 1$ увеличение теплоотдачи составило 10,2 %, 13,3 %, и 21,9 % соответственно. Когда $V_m = 1$, $Re = 100$, $Re = 200$ и $Re = 500$ повышение теплоотдачи составило

17 %, 21,9 %, и 28,7 % соответственно. Максимальное локальное увеличение теплоотдачи по периметру цилиндра наблюдалась в нижней части цилиндра.

В работе [3] экспериментальным методом был исследован теплообмен при поперечном обтекании цилиндра в пульсирующем потоке воздуха. Числа Струхала Sh лежали в диапазоне $0,18 \leq Sh \leq 2,8$, числа Рейнольдса Re $205 \leq Re \leq 822$, амплитуда давлений $40 \leq p \leq 276$, Па. Зафиксировано увеличение коэффициента теплоотдачи в 2,1 раза.

Авторами работы [4] численным методом был исследован теплоотдача полукруглого цилиндра размещенного в горизонтальном канале при вынужденных колебаниях пульсаций потока жидкости. Пульсации имели синусоидальный характер, в качестве рабочей жидкости использовалась вода с числом Прандтля $Pr = 7$, числа Рейнольдса Re лежали в диапазоне $10 \leq Re \leq 100$, числа Струхала $0 \leq Sh \leq 2$, амплитуда колебаний $0 \leq A \leq 0,6$. Максимальное увеличение безразмерного коэффициента сопротивления формы (total drag coefficient) составило 22 %, чисел Нуссельта 10 %. Замечено, что максимальное увеличение теплоотдачи независимо от Re наблюдается при $Sh = 1$.

В работах [5, 6] экспериментальным методом исследовался теплообмен в коридорном пучке труб в условиях пульсирующего потока жидкости. Пульсации потока имели несимметричный характер. В качестве рабочей жидкости использовалась вода $Pr \approx 5,5$. Re лежали в диапазоне $100 \leq Re \leq 500$, частота пульсаций $0,125 \leq f \leq 0,5$ Hz, амплитуда колебаний $1,25 \leq A/D \leq 4,5$. Максимальное увеличение теплоотдачи на 90 % наблюдалось при $Re = 500$, $f = 0,5$ Hz, $A/D = 4,5$.

Для оценки эффективности методов интенсификации при стационарных течениях используется коэффициент теплогидравлической эффективности Кирпичева [7]

$$E = q / N, \quad (1)$$

где q – удельный теплосъем, Вт/м²; N – удельная мощность прокачки теплоносителя, Вт/м²

$$N = \Delta p \cdot v = \xi \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot v = \xi \frac{\rho \cdot v^3}{2},$$

Здесь Δp – перепад давления в пучке труб, Па; v – средняя скорость жидкости в пучке, м/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления.

Мощность на прокачку теплоносителя в пучке труб при пульсирующем течении осредняется за период пульсации T_p , с

$$N_p = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} \Delta p_{p(t)} v_{p(t)} dt. \quad (2)$$

где $\Delta p_{p(t)}$ – мгновенные значения перепада давления при пульсирующем потоке в пучке труб, Па; $v_{p(t)}$ – мгновенные значения скорости при пульсирующем потоке, м/с; t – время, с.

Эффективность метода интенсификации также можно оценить с помощью удельного коэффициента теплогидравлической эффективности при условии $Re_p = Re_{st}$ (фактор аналогии Рейнольдсов (ФАР)) [1] в форме

$$\eta = E_p / E_{st} = (Nu_p / Nu_{st}) / (\xi_p / \xi_{st}), \quad (3)$$

где Re_{st} , E_{st} , Nu_{st} , ξ_{st} – числа Рейнольдса, коэффициент эффективности Кирпичева, число Нуссельта и гидравлическое сопротивление в канале со стационарным течением, Re_p , E_p , Nu_p , ξ_p – среднее за период пульсаций числа Рейнольдса, коэффициент эффективности Кирпичева, число Нуссельта и эквивалентное гидравлическое сопротивление в канале при пульсирующем течении.

Рейнольдса для стационарного Re_{st} и пульсирующего течения рассчитывается следующим образом Re_p :

$$Re_{st} = \frac{v_{st} D}{\nu}; \quad (4) \quad Re_p = \frac{v_p D}{\nu}, \quad (5)$$

где D – диаметр трубки пучка, м; ν – кинематическая вязкость, м²/с; v_{st} – средняя скорость потока при стационарном течении по самому узкому сечению в пучке, м/с; v_p – скорость при пульсирующем течении осреднялась за период пульсации T_p

$$v_p = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} v_{p(t)} dt.$$

Для стационарного течения в пучке труб коэффициент гидравлического сопротивления определялся следующим образом

$$\xi_{st} = \frac{\Delta p_{st} \cdot 2}{\rho v_{st}^3}. \quad (6)$$

где v_{st} – средняя скорость потока при стационарном течении, м/с.

Для пульсирующего потока эквивалентный коэффициент гидравлического сопротивления ξ_p (коэффициент гидравлического сопротивления канала с эквивалентными затратами энергии (мощности) на прокачку теплоносителя с наложением пульсаций) определялся следующим образом

$$\xi_p = \frac{N_p \cdot 2}{\rho v_p^3}, \quad (7)$$

Согласно авторам [8,9] более рационально с практической точки зрения оценивать эффективность методов интенсификации теплообмена по значению

теплосъема с единицы поверхности при равных удельных мощностях, затрачиваемых на преодоление гидравлических потерь $N_{st} = N_p$

$$E_N = \frac{E_p}{E_{st}} \Big|_{N_{st}=N_p} = \frac{Nu_{st}}{Nu_p} \Big|_{N_{cr}=N_p} = \frac{Nu_p / Nu_{st}}{\left(\xi_p / \xi_{st}\right)^m} \Big|_{Re_{st}} \cdot \quad (8)$$

где m – показатель степени при числе Re в критериальном уравнении для расчета теплоотдачи при пульсирующем течении (уравнение (10)). Таким образом, выражения для коэффициента эффективности при равных удельных мощностях E_N , будет рассчитываться следующим образом

$$E_N = \frac{Nu_p / Nu_{st}}{\left(\xi_p / \xi_{st}\right)^m} \quad (9)$$

Теплоотдача в коридорном пучке труб при пульсирующем течении может быть найдена по следующей зависимости [10]

$$Nu_p = 3,05 \cdot Re_{st}^{0,42} \cdot (\beta Sh)^{0,2}. \quad (10)$$

Здесь число Струхала

$$Sh = \frac{fD}{v_{st}},$$

где частота пульсаций f

$$f = \frac{1}{T_p}, \text{ Hz; } T_p = T_1 + T_2, \text{ с,}$$

где T_p – период пульсации, который состоит из суммы двух полупериодов T_1 – полупериода подачи импульса в межтрубное пространство пучка труб, $T_1 = 0,5$ (const) и T_2 – полупериода сброса давления, T_2 – задается в зависимости от f . Безразмерная амплитуда пульсаций $\beta = A/D$, здесь A обратный ход жидкости в пучке труб, м.

Уравнение (10) справедливо для следующих условий $100 \leq Re \leq 1000$, $0,026 \leq (\beta Sh) \leq 2,6$, $2,6 \leq Re(\beta Sh) \leq 260$, $1,25 \leq \beta \leq 4,5$, при относительном продольным и поперечным шаге трубок в пучке $s_1/D = 1,3$, $s_2/D = 1,3$ и $Pr \approx 5,5$. Коэффициент детерминации составляет ($R^2 = 0,84$).

Предложена методика оценки эффективности при применении пульсаций для повышения теплоотдачи элементов теплообмена.

Приведены показатели удельного коэффициента теплогидравлической эффективности при условии $Re_p = Re_{st}$ η и коэффициента эффективности при равных удельных мощностях затрачиваемых на прокачку теплоносителя E_N для внешнего теплообмена в коридорном пучке при пульсирующих течениях.

Список литературы

1. I.A. Popov, A.B. Yakovlev, A.V. Shelkov, D.V. Rigkov, L.A. Obuhova. Topical methods of heat transfer intensification for heat transfer equipment of heat power engineering // Power engineering of tatarstan. 2011. № 5. P. 25-29.

Касимов В.А., Минуллин Р.Г., Филимонова Т.К. Моделирование влияния гололедно-изморозевых отложений на передачу сигналов по проводам воздушных линий электропередачи.....	176
Касьянов С.В., Сафаров Д.Т. Математическое моделирование технологической структуры отклонения показателя точности детали автомобиля....	180
Касьянов С.В., Сафарова Л.Р. Проектирование технологических процессов изготовления деталей машин с учетом образования попутных продуктов, отходов и выбросов	183
Ковалёв И.С. Математическое и компьютерное моделирование системы охлаждения дизельного двигателя грузового автомобиля.....	188
Милостной М.Ю., Герман О.А., Бердиев О.Ш. Прогнозирование программы выпуска продукции с применением имитационного моделирования на примере цеха программной обработки деталей.....	192
Моренко И.В. Математическое моделирование обрушения столба жидкости в каналах разной формы	195
Москалев Л.Н., Поникаров С.И. Моделирование процесса абсорбции производства технического формалина с интеграцией нестандартного оборудования	199
Низамеев А.Ю., Юсупов Ф.Т., Саетшин А.А., Идрисов Э.Н., Зиятдинов А.М., Матухин Е.Л. Математическое описание основных технологических процессов и их применение в химической промышленности.....	204
Новичков С.В., Григорьев И.С. Влияние давления сжатого воздуха после воздушного аккумулятора на конструкцию регенератора в схеме ВАГТЭ	206
Пшеничный П.В., Стрекалов В.А., Тагиров Р.Р., Шаймухаметов Р.Р. Спектральный анализ акустических шумов автомобиля	209
Радайкин О.В., Шарафутдинов Л.А., Сабитов Л.С., Стрелков Ю.М. Исследование совместной работы опор линий электропередач со сборным железобетонным фундаментом нового типа на основе компьютерного моделирования в ПК ANSYS	213
Ростунцова И.А., Русаков Д.А. Моделирование технологического процесса глубокого охлаждения уходящих газов ПГУ	220
Ростунцова И.А., Батеев Н.А. Внедрение технологии газового промпрегрева на мощных блоках ПГУ	224
Сабинов А.Р., Хусайнов Р.М. Расчет направления осей деформаций в рабочей зоне вертикально-фрезерного станка	228
Сабитов Л.С., Ильин В.К., Кашапов Н.Ф., Хамидуллин И.Н. Численное моделирование новой опоры линии электропередачи	233
Садыков А.М. Создание логической математической модели для организации производства по ремонту и обслуживанию тяжелой техники	239
Сафаров Д.Т., Глинина Г.Ф. Дифференциальный расчет и оптимизация потребления электроэнергии при проектировании операций обработки деталей на станках с ЧПУ	242
Сафаров Д.Т., Кузьмичева Я.К. Применение метода блокчейна для управления качеством машиностроительной продукции	242