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 *(т. 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».

- функционально-диагностическую модель объекта, содержащую аналитическое описание рабочих процессов в ФСЭ и перечень диагностических контролируемых параметров;

- логическую диагностическую модель объекта в виде сети логических элементов, каждый из которых описывается системой логических уравнений выходных сигналов, полученных из дискретно преобразованных диагностических параметров;

- матрицу технических состояний с дискретными значениями логических выходных сигналов по результатам решения системы логических уравнений выходных сигналов. Матрица технических состояний (ТС) является физико-математической основой алгоритмов оперативного диагностирования – алгоритмов ППНР.

- построение диагностической экспертной модели объекта на базе матрицы ТС путём её расширения. Особенности данного этапа моделирования:

- для каждого ФСЭ определяются все имеющиеся энергетические, конструктивные, управляющие и даже возможные временные связи с другими элементами оборудования;

- за счёт дополнительных логических элементов других взаимосвязанных систем, временных связей и элементов-факторов внешней среды, выявленных по результатам последнего анализа, достраивается логическая диагностическая модель объекта. Эти дополнительные элементы и связи могут иметь или не иметь установленных датчиков контроля.

Список литературы

1. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ: ПРОБЛЕМЫ, ТЕНДЕНЦИИ, ПЕРСПЕКТИВЫ / Филина О.А., Гиматдинов Ф.С., Аскаков Ф.Ф. / Новая наука: Современное состояние и пути развития. 2017. № 1-2. С. 160-162.

ВНЕШНЯЯ ТЕПЛООТДАЧА В КОРИДОРНЫХ ПУЧКАХ ТРУБ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ПРИ НАЛОЖЕНИИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ

Хайбуллина А.И.,
старший преподаватель кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий», Казанский государственный энергетический университет

Бадретдинова Г.Р.
студент кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий», Казанский государственный энергетический университет

В работе численным методом исследован внешний коэффициент теплоотдачи при поперечном обтекании пучков труб, пульсирующем потоком. Моделирование проводилось с помощью программы ANSYS Fluent 14.0. Числа Рейнольдса лежали в диапазоне $100 \le \mathrm{Re} \le 1000$, числа Прандтля $215 \le \mathrm{Pr} \le 363$, частота и безразмерная амплитуда пульсаций находилась в диапазоне $0{,}2 \le f \le 0{,}5$, Hz, $15 \le \beta \le 35$, скважность пульсаций $0{,}25 \le \psi \le 0{,}5$. Исследование внешней теплоотдачи при низкочастотных пульсациях проводилось для 3 коридорных пучков. По результатам моделирования получено критериальное уравнение позволяющее рассчитывать внешнюю теплоотдачу при пульсирующих течениях в пучках труб различной конфигурации.

Abstract

In this paper, the external heat transfer coefficient for cross flow around a tube bundle by a pulsating flow was studied numerically method. ANSYS Fluent 14.0 is used for the mathematical modeling. The Reynolds numbers lie in the range $100 \le \mathrm{Re} \le 1000$, the Prandtl number $215 \le \mathrm{Pr} \le 363$, the frequency and the dimensionless relative amplitude of the pulsations were in the range $0{,}2 \le f \le 0{,}5$, Hz, $15 \le \beta \le 35$, the pulsation ratio $0{,}25 \le \psi \le 0{,}5$. The external heat transfer was studied for low-frequency pulsations for 9 configurations of staggered tube bundles and 3 corridor tube bundles. Based on the simulation results, a criterial equation is obtained that allows calculating the external heat transfer in pulsating flows in tube bundles of different configurations.

Ключевые слова: пульсирующие течения, теплоотдача, коридорный пучок труб, шахматный пучок труб, несимметричные пульсации, численное моделирование.

Key words: pulsating flow, heat transfer, corridor tube bundle, staggered tube bundle, asymmetrical pulsations, numerical simulation.

Теплоотдача при пульсирующих течениях исследуется не одно десятилетие на данный момент имеется огромное количество работ посвященных исследованиям внешнего и внутреннего теплообмена при пульсирующих течениях, а именно течение жидкости в трубах круглого сечения [1], в каналах с углублениями [2], при обтекании одиночного цилиндра [3, 4], тандема цилиндров [5], различных выступов, блоков и других препятствий [6, 7].

В работе [8] численным и экспериментальным методом был исследован теплообмен при поперечном обтекании цилиндра с низкочастотными пульсациями синусоидального характера в диапазоне $0{,}2 \le f \le 1{,}1$, Hz и высокими относительными пульсациями $10 \le A/D \le 38$, при этом пульсационное число Рейнольдса находилось в диапазоне $40 < \mathrm{Re}_{os} < 810$.

В данной работе планируются исследовать теплообмен в пучках труб различной конфигурации, с симметричными и несимметричными пульсациями. Теплообмен одиночного цилиндра при пульсациях с различной скважностью ψ численным методом исследовался в работе [9], пучков труб в статье [10]. Показано, что скважность пульсаций ψ оказывает влияние на теплоотдачу при неизменных Re и частотах f.

Расчетная область модели (рис. 1) представлена на рис. 1.

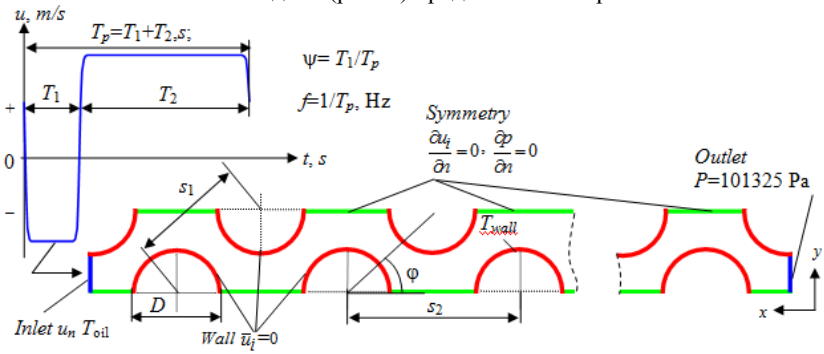

Рис. 1. Расчетная область модели

Течение несжимаемой жидкости описывается системой уравнений Навье-Стокса (Reynolds averaged Navier–Stokes RANS) осредненных по методу Рейнольдса, которая состоит из уравнения неразрывности [11]

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0, \tag{1}$$

и уравнения переноса для средних значений величин, случайным образом пульсирующих в турбулентном потоке с применением теории турбулентной вязкости предложенной Ж. Буссинеском

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left((\mu + \mu_t)\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right)\right), \tag{2}$$

где $\bar{u}_i$, $\bar{u}_j$ – компоненты осредненной скорости; ρ – плотность жидкости; μ – динамическая вязкость; $\bar{p}$ – давление; μ_t – турбулентная вязкость; ($i = 1, 2\, j, = 1, 2$).

Теплоперенос описывается уравнением конвективного теплообмена Фурье-Кирхгофа [14].

Для моделирования турбулентности на основе проведенного анализа [12, 13] была выбрана модель Спаларта-Аллмараса (Spalart-Allmaras, SA) в модифицированном виде SARC с поправкой на кривизну линии тока (RC).

Пульсирующие течения моделировались с помощью профиля скорости (зависимость скорости от времени $u(t)$), соответствующий необходимым относительным амплитудам β, частотам f, Re и скважностям ψ пульсаций, который задавался на входе пучок труб в качестве граничного условия (рис. 1). Относительная амплитуда рассчитывалась как $\beta = A/D$, где A – смещение частицы жидкости назад, м в самом узком сечение межтрубного пространства пучка; D – диаметр трубки пучка. Числа Re рассчитывалис как

$$\mathrm{Re} = \frac{uD}{\nu}, \tag{3}$$

где ν – кинематическая вязкость, м^2/с; u_p – скорость жидкости, м/с для пульсирующего течения осредненная за период пульсаций T_p была равна скорости стационарного течения u_{st}

$$u_{st} = u_p = \frac{1}{T_p}\int_0^{T_p} u_{p(t)}dt\,. \qquad (3)$$

Профиль скоростей получен с помощью математической модели гидравлической системы пульсатор–теплообменник [14]. В этой статье проводилось численное моделирование с целью выяснения реального профиля скорости в пучках труб теплообменного оборудования при генерации пульсаций с помощью пульсационного устройства.

Рабочей жидкостью было масло. Температур масла T_{oil} задавалась на входе в пучок труб в зависимости от необходимых чисел Прандтля $\mathrm{Pr} = \nu/a$, где температуропроводность м^2/с. Теплофизические свойства масла соответствовали маслу марки «Турбинное масла–Т22». На стенке центральной трубки в пучке (рис. 1) задавалась температура $T_{wall} = T_{oil} - 1$.

Численное моделирование проводилось для диапазона чисел Прандтля $215 \le \mathrm{Pr} \le 363$, скважности пульсаций $0{,}25 \le \psi \le 0{,}5$, при этом числа Re и частоты f лежали в диапазоне $100 \le \mathrm{Re} \le 1000$, $0{,}2 \le f \le 0{,}5$ Hz, относительная амплитуда $15 \le \beta \le 35$.

Варианты пучков соответствуют распространенным в теплообменном оборудовании. [15]

Численное моделирование выполнялось в программе ANSYS Fluent 14.0 методом конечных объемов finite volume method (FVM). Расчет оптимальной сетки произведен по методике, приведенной в работе [13]. При оценке результатов моделирования числа Нуссельта рассчитывались по формуле

$$\mathrm{Nu} = \alpha \cdot D/\lambda\,, \qquad (5)$$

где λ – теплопроводность, Вт/(м · К); $\alpha = q/(T_{oil} - T_{wall})$ – теплоотдача. Здесь q – тепловой поток, Вт/м^2 осредненный по поверхности центральной трубки в пучке и за период пульсаций. T_{oil} также осреднялась по всей расчетной области и за период пульсаций.

На рис. 2 показаны зависимости $\mathrm{Nu}_p/\mathrm{Nu}_{st}$ от Re при различных s_1/D для $\varphi = 90°$. С увеличением Re в диапазоне $100 \le \mathrm{Re} \le 600$ происходит резкое снижение $\mathrm{Nu}_p/\mathrm{Nu}_{st}$ независимо от s_1/D, по сравнению с диапазоном $600 \le \mathrm{Re} \le 1000$, где отношение $\mathrm{Nu}_p/\mathrm{Nu}_{st}$ меняется незначительно. Увеличение же s_1/D приводит к повышению $\mathrm{Nu}_p/\mathrm{Nu}_{st}$. Рассматривая влияние ψ на теплообмен видно, что интенсификация в основном наблюдается при режимах с меньшей ψ.

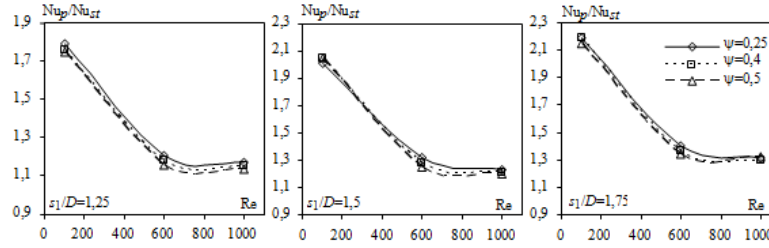

Рис. 2. Зависимость Nu_p/Nu_{st} от Re при Pr = 215, β = 15, f = 0,5 Hz, φ = 90°

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 ψ = 0,5 и с уменьшением s_1/D.

В результате обобщения данных численного моделирования получено критериальное уравнение следующего вида

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

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

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

Уравнение (6) получено для диапазонов $215 \le Pr \le 363$, $0{,}25 \le \psi \le 0{,}5$, $100 \le Re \le 1000$, $15 \le \beta \le 35$, $5{,}81\cdot10^{-4} \le Fo \le 14{,}53\cdot10^{-4}$. Коэффициент детерминации $R^2 = 0{,}906$, максимальная погрешность аппроксимации не более δmax = 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. Mikheev 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.

Трус И.Н., Гомеля Н.Д., Иваненко Е.И., Воробьева В.И. Математическое моделирование процесса очистки вод, содержащих ионы меди 251
Тукмакова Н.А., Тонконог В.Г., Тукмаков А.Л. Численное моделирование гидродинамики парокапельных систем с учетом коагуляции и дробления частиц 253
Филина О.А., Пасечник С.В., Гараева А.Р. Оперативная диагностика энергетических установок 257
Хайбуллина А.И., Бадретдинова Г.Р. Внешняя теплоотдача в коридорных пучках труб различной конфигурации при наложении низкочастотных пульсаций 261
Хайбуллина А.И., Чирухин К.В. Теплогидравлическая эффективность коридорного пучка труб в условиях пульсирующего потока жидкости 267

СЕКЦИЯ № 5
«Инновационные сварочные технологии в промышленности» 272

Беляев А.В., Галимов Э.Р., Аблясова А.Г., Мухамадеев И.М. О возможности использования методологии параметризации микроструктур для сварных соединений 273
Беляев А.В., Галимов Э.Р., Аблясова А.Г., Низамов Р.А., Новиков А.В. Тепловые расчеты для прогнозирования структуры сварных соединений в машиностроении 277
Звездин В.В., Клочкова К.В., Рахимов Р.Р., Саубанов Р.Р., Песошин В.А. Технологические особенности лазерной сварки чугунов с вермикулярным графитом 281
Колесников Д.Н., Солопова Е.А., Петров Р.В. Прогнозирование свойств сварного соединения и его геометрических параметров при лазерной сварке 284
Колесников Д.Н., Пискунов Е.Д., Ерахмадов С.Н. Воздействие лазерной сварки на основной и присадочный материал при сварке высоколегированных сталей и сравнение с дуговыми способами 288
Муратаев Ф.И. Адаптация содержания дисциплины «диагностика и контроль качества сварных соединений» к требованиям ФГОС ВПО 3+ 290
Солопова Е.А., Яппаров Е.М. Некоторые аспекты разработки технологии сварки трубопроводов для транспортировки агрессивных сред 295

СЕКЦИЯ № 6
«Инновационные разработки малых и средних предприятий» 299

Баскевич П.П. Научно-техническая деятельность малых предприятий, инновации, инвестиции, партнерство с предприятиями машиностроительного комплекса 300
Гилазов И.Н., Астащенко В.И., Емельянов Д.В. О возможности использования электролитно-плазменного борирования деталей 305