

1.2.2

А.И. Хайбуллина канд. техн. наук, А.Р. Хайруллин, А.Н. Долгова

Казанский государственный энергетический университет
Казань, haybullina.87@mail.ru

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ВОЛНИСТОМ КАНАЛЕ ПРИ
НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПУЛЬСАЦИЯХ**

В работе численным методом рассмотрен теплообмен при пульсациях потока теплоносителя. Геометрические параметры исследуемого канала были выбраны с целью имитации течения между пластинами пластинчатого теплообменника. Высота канала H составляла 4 мм, длина $22,5H$, высота выступов $1H$, шаг выступов $4,5H$. В качестве рабочей среды выступала вода. Численные исследования проводились в AnsysFluent. Для моделирования турбулентности применялась модель Spalart-Allmaras. Число Рейнольдса находилось в диапазоне от 100 до 400, частота пульсаций от 0,166 Гц до 0,5 Гц, относительная амплитуда пульсаций была постоянной 4,5H. В результате численных исследований получено, что при всех частотах и числе Рейнольдса наблюдается интенсификация теплообмена. Наиболее эффективному режиму интенсификации соответствовала частота 0,5 Гц при числе Рейнольдса 100. Наиболее неэффективному режиму интенсификации соответствовала частота 0,166 Гц при числе Рейнольдса 400.

Ключевые слова: пластинчатый теплообменник, волнистый канал, интенсификация теплообмена, пульсационное течение, численный эксперимент.

В составе энергетических установок, широко применяются крупногабаритные теплообменные аппараты. Повышение энергетической эффективности и компактности теплообменников напрямую зависит от применяемых методов интенсификацией теплообмена [1–3]. Одним из таких методов является пульсация потока, созданная преднамеренно с целью интенсификации теплообмена [4]. Создание пульсирующего потока теплоносителя, с целью повышения эффективности теплообменного устройства рассматривалось многими авторами. Теплообмен и гидродинамика в условиях пульсирующего течения исследован в трубах круглого сечения [5,6], в каналах с углублениями [7,8], при обтекании одиночного цилиндра [9,10], течения за выступом [11], пучков труб [12].

Практически во всех работах пульсации имеют симметричный характер. При этом работы с несимметричным характером пульсаций при возвратно поступательном движении теплоносителя ограничены. Несимметричные пульсации показали свою эффективность по сравнению с симметричными пульсациями в работах [13,14]. Целью данной работы является исследование возможности интенсификации теплообмена в волнистом канале в условиях несимметричных возвратно поступательных пульсаций.

Геометрические параметры исследуемого канала (рис. 1) были выбраны с целью имитации течения между пластинами пластинчатого теплообменника. Высота канала H составляла 4 мм, длина $22,5H$, высота выступов $1H$, шаг выступов $4,5H$. Течение несжимаемой жидкости моделировалось с помощью нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS). В качестве модели турбулентности была выбрана модель Spalart-Allmaras [15]. В качестве рабочей среды выступала вода.

При стационарном течении на входе в расчетную область (рис. 1) задавалась постоянная температура потока $t_f = 300$ °K, постоянная скорость потока u соответствующая числу Рейнольдса Re 100, 200, 300, 400. Число Рейнольдса рассчитывались следующим образом $Re = H \cdot u / \nu$, где ν – кинематическая вязкость воды. На нагреваемом участке канала (рис. 1) задавалось постоянная температура стенки $t_w = 315$ °K. На выходе постоянное давление $P = 101325$ Па.



Рис. 1 – Расчетная область модели.

В работе [16] экспериментальным путем была получена гидравлическая картина течения теплоносителя, при несимметричных пульсациях с возвратно-поступательным движением потока жидкости. Поэтому в данной работе для имитации подобных пульсаций применялась методика, предложенная в работе [16]. Характер пульсаций скорости задавался на входе в расчетную область канала с необходимой частотой f и относительной амплитудой A/H пульсаций, где A – обратный ход жидкости в канале, м. Частота пульсаций находилась по формуле $f = 1/T$ Гц, где $T = T_1 + T_2$ период пульсаций состоящий из двух полупериодов, с. Первый полупериод пульсаций был постоянной величиной $T_1 = 0.33$, с. Второй полупериод T_2 менялся в зависимости от частоты f . Скорость стационарного течения равнялась скорости пульсационного течения осредненного за период пульсаций. Частота пульсаций f находилась в диапазоне от 0,166 Гц до 0,5 Гц, относительная амплитуда пульсаций была постоянной $A/H = 4,5H$. Расчеты проводились в AnsysFluent. Количество элементов сетки составило 20404 элементов. Относительный средний размер одной ячейки составлял $y_n/H = 0,04$.

На рис. 2-3 представлены результаты численного эксперимента. Интенсификация теплообмена оценивалась по приросту числа Нуссельта в пульсационном течении по сравнению со стационарным течением. Число Нуссельта определялось по формуле $Nu = \alpha H / \lambda$, где α – теплоотдача канала находилась по уравнению Ньютона-Рихмана, Вт/м² К; λ – теплопроводность воды Вт/м К. Температурный напор в уравнении Ньютона-Рихмана определялась как разница между нагреваемым участком канала и средней температурой жидкости в нагреваемом участке (рис. 1).

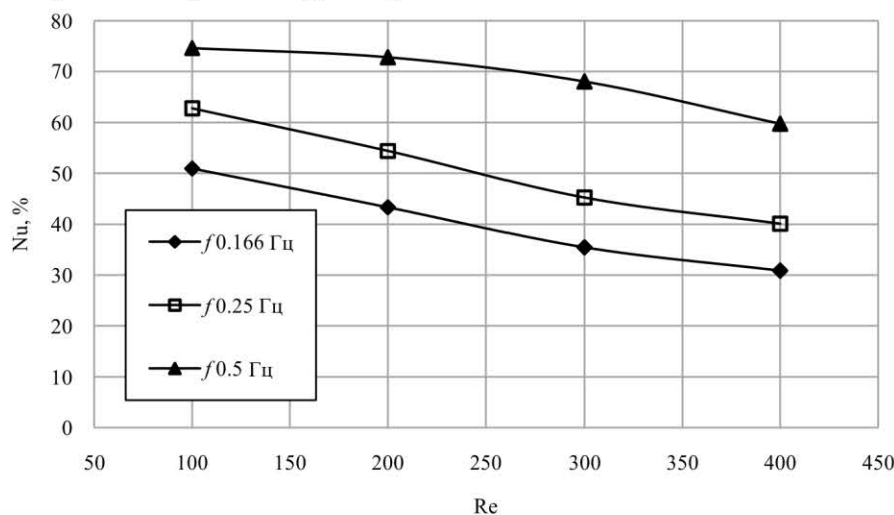


Рис. 2. – Зависимость прироста числа Нуссельта от числа Рейнольдса.

На рис. 2 представлена зависимость прироста числа Нуссельта от числа Рейнольдса при разных частотах пульсаций. Как видно по рис. 2 с увеличением числа Рейнольдса происходит снижение прироста числа Нуссельта при всех частотах пульсаций. Уменьшение прироста числа Нуссельта связано с уменьшением числа Струхала $Sh = fH/u$ при повышении числа Рейнольдса. Число Струхала снижается, поскольку при увеличении числа Рейнольдса скорость на входе в расчетную область повышается.

На рис. 3 показана зависимость прироста числа Нуссельта от частоты пульсаций. По рис. 3 видно, что с увеличением частоты пульсаций происходит увеличение приростов числа Нуссельта при всех числах Рейнольдса. Наиболее эффективным режимом пульсаций

оказался режим с частотой $f = 0,5 \text{ Гц}$ и $Re = 100$, наиболее неэффективному режиму соответствовал режим с частотой $f = 0,166 \text{ Гц}$ и $Re = 400$.

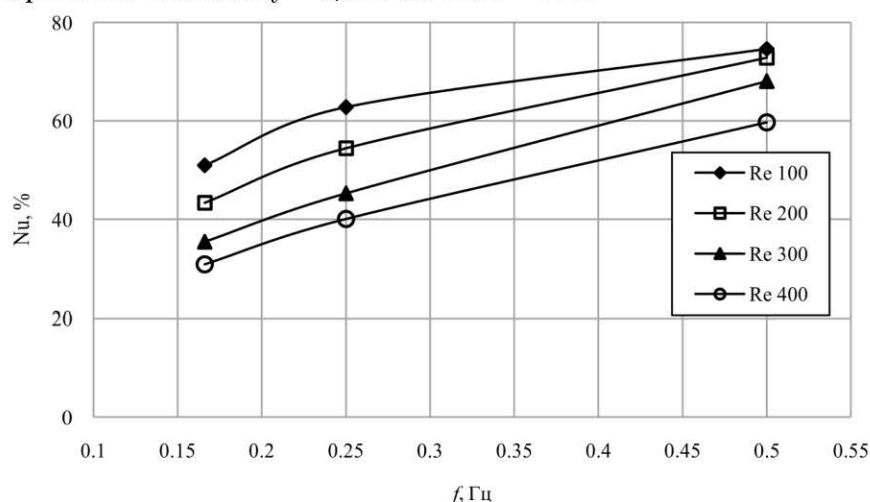


Рис. 3. – Зависимость прироста числа Нуссельта от частоты пульсаций.

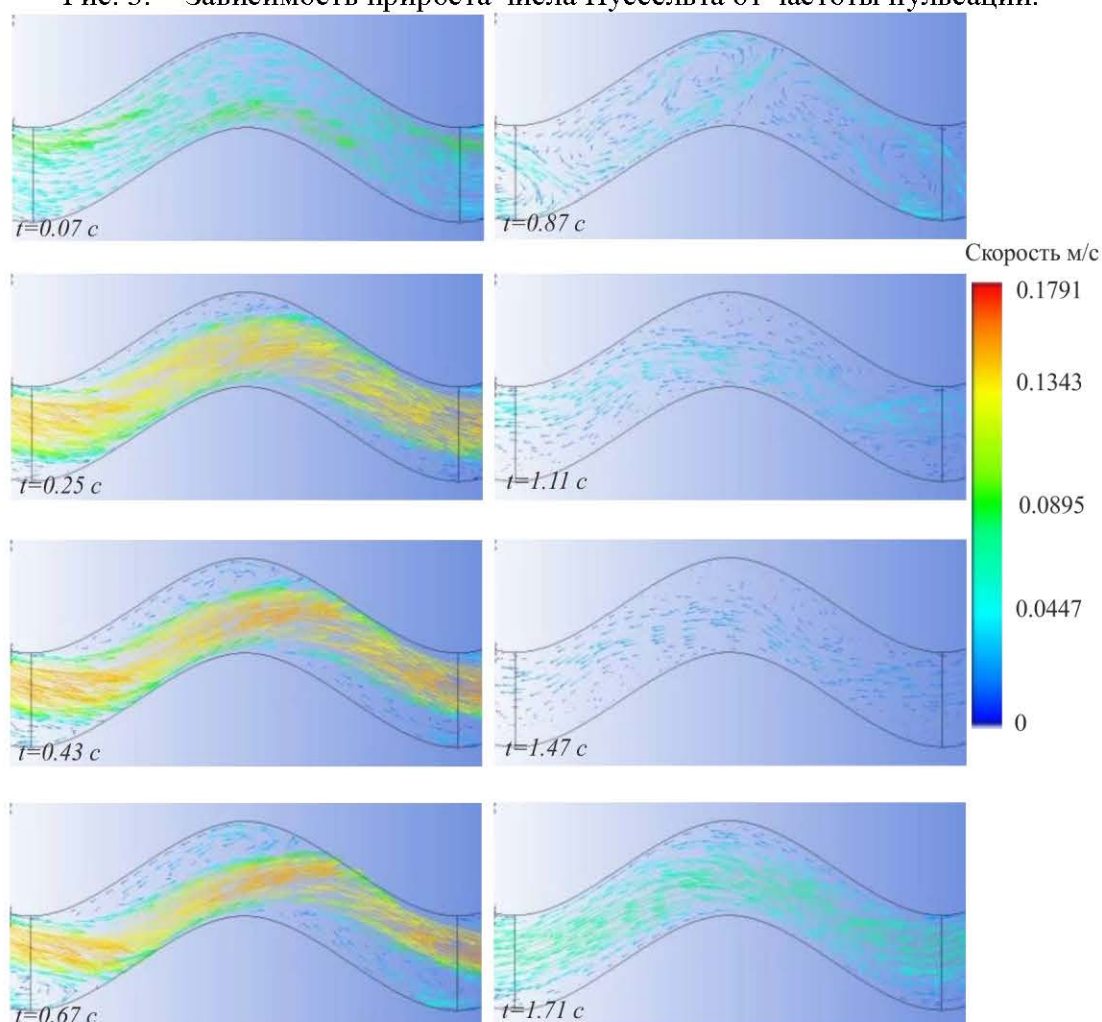


Рис. 4. – Мгновенные векторы скоростей для разных моментов времени при $Re = 100$, $f = 0,5 \text{ Гц}$.

На рис. 4 показаны мгновенные поля векторов скоростей при пульсационном течении. По рис. 4 отчетливо видна нестационарная картина течения в канале с переменной скоростью потока, приводящая к ее перестройке.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-79-10136 <https://rscf.ru/project/21-79-03028/>

Список литературы

1. Alam T., Kim M.-H. A comprehensive review on single phase heat transfer enhancement techniques in heat exchanger applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 81. P. 813–839.
2. Maradiya C., Vadher J., Agarwal R. The heat transfer enhancement techniques and their Thermal Performance Factor // *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*. 2018. Vol. 7, № 1. P. 1–21.
3. Nguyen D.H., Ahn H.S. A comprehensive review on micro/nanoscale surface modification techniques for heat transfer enhancement in heat exchanger // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 178. P. 121601.
4. Ye Q., Zhang Y., Wei J. A comprehensive review of pulsating flow on heat transfer enhancement // *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol. 196. P. 117275.
5. Badr H.M. Effect of free-stream fluctuations on laminar forced convection from a straight tube // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1997. Vol. 40, № 15. P. 3653–3662.
6. Bi H. et al. Heat transfer and flow characteristics of intermittent oscillating flow in tube // *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 225. P. 120233.
7. 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*. 2007. Vol. 50, № 15–16. P. 3062–3071.
8. Zontul H., Şahin B. Experimental investigation of convective heat transfer performance and hydrodynamics of pulsating flow through the rectangular grooved channel // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2023. Vol. 141. P. 110796.
9. Gaheen O.A. et al. Experimental investigation on the convection heat transfer enhancement for heated cylinder using pulsated flow // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2021. Vol. 26. P. 101055.
10. Sellappan P., Pottebaum T. Vortex shedding and heat transfer in rotationally oscillating cylinders // *J. Fluid Mech*. 2014. Vol. 748. P. 549–579.
11. Khanafer K. et al. Mixed convection analysis of laminar pulsating flow and heat transfer over a backward-facing step // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. Vol. 51, № 25–26. P. 5785–5793.
12. Zheng W. et al. Heating performance and spatial analysis of seawater-source heat pump with staggered tube-bundle heat exchanger // *Applied Energy*. 2022. Vol. 305. P. 117690.
13. Ilyin V.K. et al. Thermal and hydraulic efficiency of the corridor tube bundle in conditions of pulsating flow of fluid // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*. 2017. Vol. 240. P. 012025.
14. Ilyin V.K. et al. Factors influencing on the thermal flow with the cross-section of the corridor tube bundle in low-frequency non-symmetric pulsations // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*. 2017. Vol. 240. P. 012026.
15. Снегирёв А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений, Санкт-Петербург: Изд. Политехнический университет, 2009, 143 с.
16. Хайбуллина А.И., Хайруллин А.Р., Ильин В.К. Теплообмен в проточном канале с пучком труб коридорного расположения при наложении на поток жидкости противоточных низкочастотных несимметричных пульсаций // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2016. № 11-12. С. 56-67.