

УДК 621.43.016.4

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ПЛАСТИНЧАТОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ ЗА СЧЕТ ПУЛЬСАЦИИ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Кудашев С.Ф., Кудашева О.В., Душутина О.В., Равилов Р.Р.*ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарева», Саранск, e-mail: kudashev@mail.ru*

Статья посвящена теме влияния пульсирующей подачи теплоносителя на теплоотдачу. Проведенный анализ иностранных литературных источников не дает однозначного ответа на данный вопрос. Полученные различными авторами результаты экспериментов и математического моделирования можно разделить на три категории: усиление теплоотдачи; ослабление теплоотдачи; не влияет на теплоотдачу. Представленные данные результатов экспериментов, проведенных авторами данной статьи, указывают на то, что в диапазоне частот 0,45 и 2,23 Гц пульсирующая подача теплоносителя позволяет интенсифицировать теплоотдачу в пластинчатом теплообменнике при числах Рейнольдса пульсирующего потока (вычисленного по среднему расходу) от 1800 до 9000. В качестве устройства для создания пульсаций используется ударный клапан, мгновенно перекрывающий поток теплоносителя. Получено относительное увеличение коэффициента теплопередачи в импульсном режиме (в сравнении со стационарным) при равных расходах до 13%. На всех расходах наблюдаются максимумы экспериментальных графиков в области частоты 1,78 Гц. Начиная с данной частоты, коэффициент теплопередачи снижается при постоянном расходе нагреваемой и греющей сред. Число Рейнольдса в экспериментах изменялось от 1800 до 9000, число Прандтля – от 5,2 до 5,6.

Ключевые слова: теплоотдача, коэффициент теплопередачи, расход, теплоноситель, пульсации, число Рейнольдса, тепловая мощность, генератор пульсаций

PULSATING HEAT TRANSFER INTENSIFICATION IN A PLATE HEAT EXCHANGER

Kudashev S.F., Kudasheva O.V., Dushutina O.V., Ravilov R.R.*Ogarev Mordovia State University, Saransk, e-mail: kudashev@mail.ru*

The article is devoted to the effect of pulsating coolant supply on heat transfer. The analysis of foreign literary sources does not give an unambiguous answer to this question. The results of experiments and mathematical modeling obtained by various authors can be divided into three categories, i.e. heat transfer enhancement; weakening of heat transfer; does not affect heat transfer. The presented data of the results of experiments conducted by the authors of this article indicate that, in the frequency range 0.45 and 2.23 Hz, the pulsating flow of the heat carrier allows one to intensify the heat transfer in the plate heat exchanger at the Reynolds numbers of the pulsating flow (calculated from the average flow rate) from 1800 to 9000. A shock valve is used as a device for creating pulsations, instantly blocking the flow of coolant. A relative increase in the heat transfer coefficient in the pulsed mode (in comparison with the stationary one) with equal costs up to 13% is obtained. At all costs, the maximums of the experimental graphs are observed in the frequency domain 1.78 Hz. Starting from this frequency, the heat transfer coefficient decreases with a constant flow of heated and heating media. The Reynolds number in the experiments varied from 1800 to 9000, the Prandtl number from 5.2 to 5.6.

Keywords: heat transfer, heat transfer coefficient, flow rate, fluid, pulsations, Reynolds number, thermal power, pulsation generator

Передача тепла от пульсирующего потока имеет место во многих областях жизнедеятельности: двигатели Стирлинга; тепловые трубы, а также во многих системах с биологическими жидкостями. Согласно современным исследованиям, при переходе к пульсирующему режиму течения теплоносителя в части теплоотдачи возможно получение трех типов эффектов:

- 1) усиление теплоотдачи;
- 2) отсутствие заметного влияния на теплоотдачу;
- 3) снижение теплоотдачи.

Цель исследования: определение влияния пульсаций потока теплоносителя на теплопередачу в теплообменном оборудовании.

Материалы и методы исследования

Интенсификация теплопередачи при переходе к пульсирующему режиму наблюдается в условиях

ламинарного или переходного режима течения жидкости. При этом некоторые авторы не наблюдали увеличения мощности теплообменника в случае пульсаций расхода [1] и в расчетах используют формулы для расчета коэффициента теплоотдачи при стационарном режиме [2], а в некоторых публикациях указывается, наоборот, снижение теплообмена в процессе проведения экспериментов.

Факторами, влияющими на теплоотдачу от пульсирующей жидкости, являются число Рейнольдса, частота пульсации, амплитуда пульсации, скорость пульсации, геометрия канала, место расположения генератора пульсаций, форма волны пульсации, текучая среда, собственные физические параметры системы и т.д. Методы исследования теплоотдачи от пульсирующих сред в основном включают экспериментальные методы и методы численного моделирования. Для исследования влияния числа Рейнольдса на теплоотдачу от пульсирующей жидкости [3] использовал метод решеточных уравнений Больцмана. Исследования проводились при числах Рейнольдса 50, 100, 150 и числе Прандтля 3,103. Основным фактором, влияющим на

теплообмен в пульсирующем потоке, является скорость пульсации. При этом в полученных исследованиях установлено, что имеется оптимальная частота пульсаций, где теплопередача является наибольшей. Установлено также, что снижение скорости течения и увеличение частоты пульсаций снижают теплоотдачу. Низкая частота, низкая амплитуда, большое число Рейнольдса применяются для усиления теплообмена, а пульсации потока используются в качестве технологии активного усиления теплообмена. Усиление теплоотдачи зависит главным образом от числа Рейнольдса, при этом скорость пульсации также играет очень важную роль в усилении теплоотдачи [4]. Так как многие исследования в данной области практические, то зачастую об изменении теплоотдачи судят по величине теплового потока через теплообменную поверхность (или по изменению коэффициента теплопередачи).

В различных формах каналов теплоносителя: в ребристом канале [5, 6], цилиндрическом канале [7], в волнообразном канале пульсации потока теплоносителя оказывают различную степень интенсификации теплопередачи. Пульсации теплоносителя в волнообразном канале вызывают значительное усиление теплоотдачи по сравнению с другими формами каналов. Это связано со многими эффектами образования и рассеивания вихрей в условиях пульсации. Также установлено, что расположение генератора пульсаций оказывает влияние на теплоотдачу. В [5] генератор пульсаций установлен до теплообменника во время экспериментов с числом Рейнольдса от 150 до 1000, частотой от 0 до 2 Гц и амплитудой пульсаций в диапазоне от 155 до 400 мм. В результате экспериментов установили, что в теплообменнике типа «труба в трубе» при вышеуказанных параметрах пульсации потока увеличивают теплоотдачу на 300%.

В [6] экспериментально исследовали влияние пульсации на коэффициент теплоотдачи от воды в длинной горизонтальной трубе пароводяного теплообменника. Пульсации воды создавались с помощью поршневого насоса, расположенного перед теплообменником, число Рейнольдса варьировалось от 30000 до 85000, а частота пульсаций была установлена на уровне 1,6 Гц. Отношение амплитуд варьировалось от 1 до 1,56. Они зафиксировали увеличение коэффициента теплопередачи от 60% до 70% при амплитуде 1,42.

В работе [7] также установлено, что место расположения генератора пульсаций имеет значение. В данной статье сообщается об увеличении коэффициента теплопередачи на 90% при числе Рейнольдса 6000 и частоте пульсаций 160 циклов/мин, когда импульсы были введены перед нагревателями. Никакого улучшения коэффициента теплопередачи не наблюдалось в случае установки генератора импульсов после нагревателя.

А.Е. Зохир [8] провел экспериментальное исследование на концентрических двухтрубных теплообменниках, горячая вода (40–70 °C) пропусклась через внутреннюю трубу с фиксированным массовым расходом (число Рейнольдса $\approx 10\ 200$), а холодная вода проходила через кольцевое пространство с числом Рейнольдса от 2000 до 10200 в пульсирующем режиме. Частота пульсаций изменялась в диапазоне от 0 до 40 Гц, в то время как амплитуда поддерживалась постоянной. Генератор пульсаций установлен был после теплообменника. Максимальное увеличение числа Нуссельта для прямого течения составило 20%, в то время как для противотока было около 90%.

В [9] авторы проводили исследования по влиянию пульсаций расхода теплоносителя на теплопередачу при различных формах волн пульсаций: прямоугольные, синусоидальные и полусинусоидальные. Три различные формы волнового воздействия использовались в качестве граничных условий. Результат моделирования теплопередачи при пульсирующей подаче жидкости, при одном и том же среднем массовом расходе показал значительное улучшение общих тепловых характеристик. Кроме того, пульсирующее входное воздействие с синусоидальной формой волн привело к наивысшему коэффициенту теплопередачи среди трех рассматриваемых условий. Следовательно, при практическом применении синусоидальное входное воздействие более выгодно для усиления теплообмена.

В [10] представлены результаты исследования теплообмена в круглом изотермическом канале с наложенной пульсацией потока на входе. Число Рейнольдса фиксировано и равно 200, диапазон частот составляет 1–20 Гц. Обнаружен интересный факт, что, начиная с условий, когда длина впускного отверстия в два раза больше диаметра трубы, входная пульсация не оказывает положительного влияния на теплопередачу. В [11] представлены результаты влияния среднего числа Рейнольдса, амплитуды пульсации и безразмерной частоты на коэффициент трения и на увеличение коэффициента теплоотдачи. Делается вывод, что чем больше амплитуда пульсации и безразмерная частота пульсации, тем больше коэффициент трения в переходном диапазоне. Пульсации будут существенно влиять на критическое число Рейнольдса, поэтому в работе отмечается, что в области малых значений критического числа Рейнольдса и в области ламинарно-турбулентного переходного режима пульсации способствуют увеличению коэффициента трения. При этом не дается соотношение между величиной затрат энергии на перекачивание теплоносителя и увеличения тепловой мощности.

Исследования передачи тепла в случае пульсирующей подачи теплоносителя представлено во многих работах. При этом некоторые исследователи указывают отсутствие влияния пульсаций на теплопередачу, а некоторые утверждают о негативном влиянии пульсаций на данный процесс. В частности, в работе [12] в результате численного моделирования установлено незначительное увеличение числа Нуссельта. Представлены результаты численного моделирования влияния пульсаций на теплообмен при различных пульсирующих параметрах (амплитуде, числах Струхала и Рейнольдса). Графическое отображение результатов моделирования показывает увеличение частоты и амплитуды пульсаций, что приводит к незначительному увеличению числа Нуссельта. При этом в данной статье указано, что усиление теплопередачи из-за периодического пульсирующего потока сомнительно и в лучшем случае довольно ограничено.

Использование импульсного режима в системах теплоснабжения дает некоторые преимущества. Пульсации потока не только влияют на теплопередачу, но также данный режим позволяет полезно использовать энергию избыточного располагаемого напора. Если последнее утверждение неопровержимо, то, согласно проведенному анализу литературных источников, влияние пульсаций теплоносителя на теплообмен довольно противоречиво. Данный факт связан со множеством факторов: физических свойств теплоносителя, конфигурации каналов теплоносителя, теплопередающей поверхности, параметров, характеризующих пульсирующий поток, места распо-

Число Рейнольдса определялось для выяснения режима течения теплоносителя в каналах теплообменника. Необходимый характерный размер (гидравлический диаметр) канала определяется следующим образом [14]:

$$D_e = \frac{4bL_w}{2(b + L_w\varphi)} \approx \frac{2b}{\varphi}, \quad (1)$$

где φ – коэффициент, показывающий соотношение между длиной металлического листа, гнутого волнами к ширине волнообразной части пластины;

b – амплитуда гофр, м;

L_w – расстояние между портами пластины по ширине, м;

Скорость в каналах теплообменника оценивалась, исходя из толщины пластин, ширины пакета и количества каналов для каждого теплоносителя. Эксперименты проводились в стационарном и импульсном режимах течения теплоносителя. На основании полученных экспериментальных данных, согласно закону сохранения тепла, коэффициент те-

плопередачи пластинчатого теплообменника рассчитывается как

$$k_1 = \frac{Q}{A \cdot \Delta t_m}, \quad (2)$$

где A – площадь теплопередающей поверхности, м².
 Δt_m – средняя логарифмическая разность температур, °С.

Изменение коэффициента теплопередачи в пластинчатом теплообменнике может происходить только за счет изменения теплоотдачи (теплового потока) со стороны одного из теплоносителей. В результате, сравнивая коэффициенты теплопередачи в стационарном и импульсном режимах при различных частотах, определяли величину изменения коэффициента теплоотдачи.

Результаты исследования и их обсуждение

Изменение коэффициента теплопередачи трех разных массовых потоков на разных частотах пульсации показано на рис. 3.

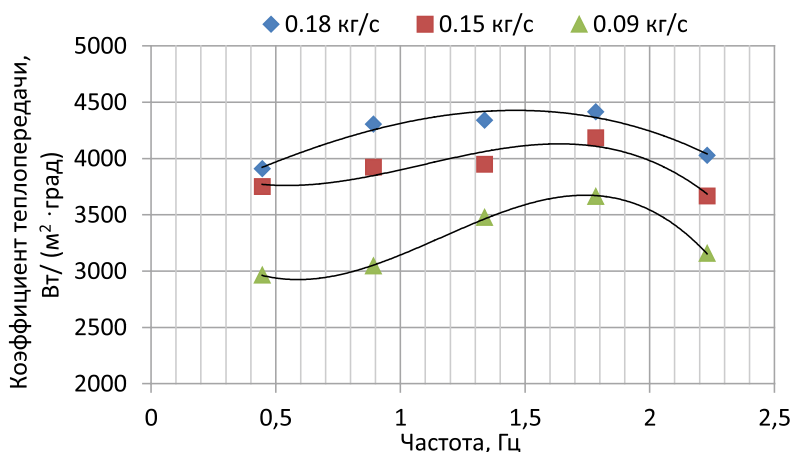


Рис. 2. Зависимости коэффициента теплопередачи от расхода

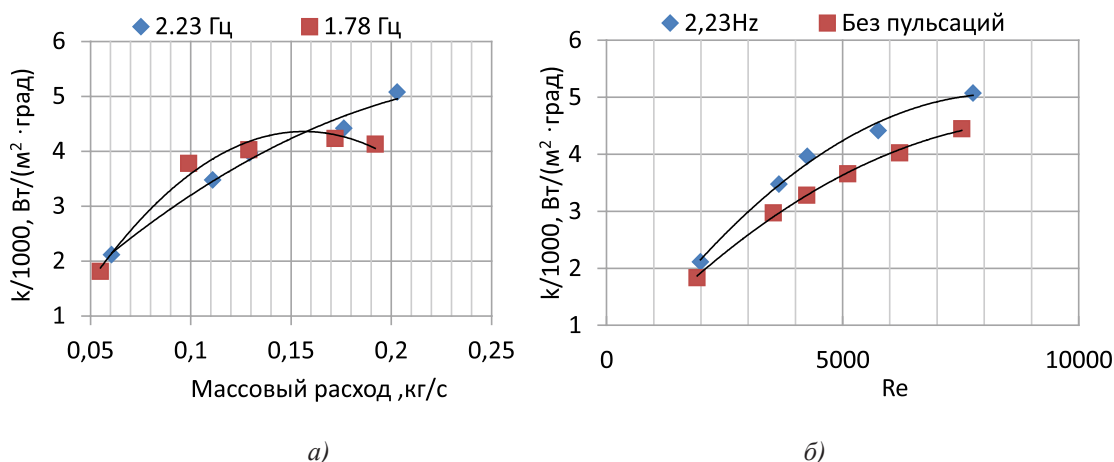


Рис. 3. Зависимости коэффициента теплопередачи: а) от массового расхода; б) от числа Рейнольдса

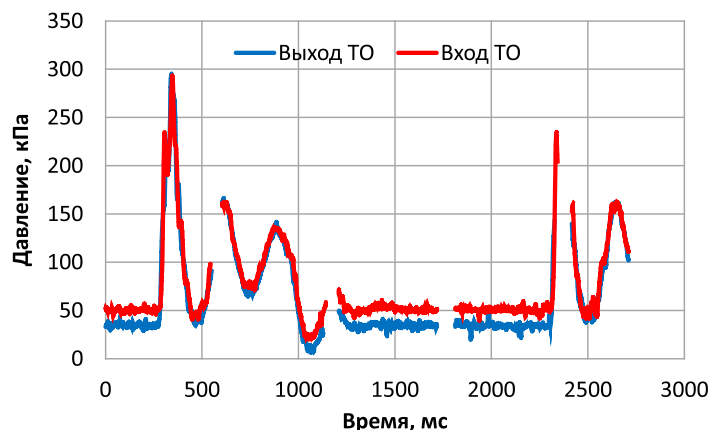


Рис. 4. Изменение давления при импульсном режиме, задаваемая частота 0,45 Гц

Замеры производились на пяти разных частотах и трех значениях расходов холодной воды. Как и следовало ожидать, из графиков видно, что на всех частотах с увеличением расхода теплоносителя коэффициент теплопередачи растет. При этом на всех расходах наблюдаются максимумы экспериментальных графиков в области частоты 1,78 Гц. На рис. 3 представлена зависимость коэффициента теплопередачи в пластинчатом теплообменнике от массового расхода теплоносителя при двух частотах 1,78 Гц и 2,23 Гц.

Из данного рисунка видно, что при частоте пульсации 1,78 Гц коэффициент теплопередачи монотонно возрастает с увеличением массового расхода. Для частоты 2,23 Гц график имеет изгиб при расходе 0,155 кг/с.

Наложение искусственных колебаний, создаваемых генератором пульсаций, и собственных колебаний гидравлической системы по-разному влияют на изменение расхода теплоносителя внутри теплообменника. На графике колебаний давления при частоте генератора пульсаций 0,45 Гц можно легко выделить свободные колебания системы, которые составили 5,2 Гц (рис. 4).

Вероятно, одним из факторов, влияющих на теплоотдачу, является величина фактической скорости теплоносителя, которая при импульсном режиме тем больше, чем меньше длительность открытого положения клапана генератора импульсов. График колебания давления в каналах теплообменника показывает, что в случае частоты 0,89 Гц скорость нарастания давления идет постепенно, занимает более длительный интервал времени по сравнению с частотой в 1,78 Гц. То есть сложение собственных колебаний системы и вынужденных, создаваемых генератором пульсаций, могут

по-разному влиять на разность давлений до теплообменника и после на момент открытия ударного клапана. Так как собственная частота системы малоизменна, то в зависимости от частоты генератора пульсаций разность давлений на теплообменнике на момент открытия ударного клапана может как усиливаться, так и ослабляться. За счет чего сокращается либо увеличивается продолжительность времени, за которое достигается максимальный расход в период открытия клапана.

Заключение

Сравнивая две модели потока, стационарную и пульсирующую, установлено, что пульсации потока теплоносителя усиливают теплоотдачу в пластинчатом теплообменнике. То есть итоговое влияние на теплопередачу в импульсном режиме оказывают несколько факторов, не только параметры колебаний, задаваемые генератором пульсаций, но также и место его расположения, свойства теплоносителя, режим течения. Важным фактором также является итоговая частота системы, которая может по-разному влиять на пропускную способность системы. Установлено, что имеется некоторая оптимальная частота пульсаций для данной системы (критерий оптимизации – теплоотдача), она равна 1,78 Гц. Начиная с данной частоты, коэффициент теплопередачи снижается при постоянном расходе нагреваемой и греющей сред. Число Рейнольдса в экспериментах изменялось от 1800 до 9000, число Прандтля – от 5,2 до 5,6.

Список литературы

1. Jiyang Li, Chaobin Dang, Eiji Hihara, Heat transfer enhancement in a parallel, finless heat exchanger using a longitudinal vortex generator, Part A: Numerical investigation. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. T. 128. P. 87–97.

2. Карелин Д.Л., Болдырев А.В., Гуреев В.М., Болдырев С.В. Моделирование динамических процессов в пароконденсационной системе охлаждения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 4. С. 61–69.
3. Jafari M., Farhadi M., Sedighi K. Pulsating flow effects on convection heat transfer in a corrugated channel: A LBM approach. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2013. V. 45. P. 146–154. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.04.006.
4. Shuai X., Cheng S., Antonini G. Amélioration du transfert convectif de chaleur par l'écoulement pulse dans un fluide visqueux. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 1994. V. 72(3). P. 468–475. DOI: 10.1002/cjce.5450720312.
5. West F.B., Taylor A.T. The effect of pulsations on heat transfer-turbulent flow of water inside tubes. *Chemical Engineering Progress*. 1952. V. 48(1). P. 39–43.
6. Darling G.B. Heat transfer to liquids in intermittent flow. *Petroleum*. 1959. V. 22. 177 p.
7. Zohir A.E. The influence of pulsation on heat transfer in a heat exchanger for parallel and counter water flows. *New York Science Journal*. 2011. V. 4(6). P. 61–71. [Electronic resource]. URL: <http://www.sciencepub.net/newyork> (date of access: 03.09.2019).
8. 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*. 2016. V. 37(6). P. 535–544. DOI: 10.1080/01457632.2015.1060758.
9. Chattopadhyay H., Durst F., Ray S. Analysis of heat transfer in simultaneously developing pulsating laminar flow in a pipe with constant wall temperature. *International communications in heat and mass transfer*. 2006. V. 33(4). P. 475–481. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.12.008.
10. Zhang H. et al. Numerical study on the pulsating effect on heat transfer performance of pseudo-plastic fluid flow in a manifold microchannel heat sink. *Applied Thermal Engineering*. 2018. V. 129. P. 1092–1105. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.10.124.
11. Mehta B., Khandekar S. Local experimental heat transfer of single-phase pulsating laminar flow in a square mini-channel // *International Journal of Thermal Sciences*. 2015. V. 91. P. 157–166. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2015.01.008.
12. Пат. РФ № 183591, МПК F24D3/02, F15B21/12. Ударный узел / Макеев А.Н., Левцев А.П., Голянин А.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный – Т МИ й университет им. Н.П. Огарёва». № 2018112914; заявл. 10.04.2018; опубл. 26.09.2018, Бюл. № 27.
13. Imran M., Pambudi N.A., Farooq M. Thermal and hydraulic optimization of plate heat exchanger using multi objective genetic algorithm // *Case studies in thermal engineering*. 2017. V. 10. P. 570–578. DOI: 10.1016/j.csite.2017.10.003.