

УДК 621.1
DOI 10.47367/0021-3497_2022_1_271

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ
ВОЗДЕЙСТВИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ПОТОКА
НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА
В ПЛАСТИНЧАТОМ ТЕПЛООБМЕННОМ АППАРАТЕ***

**EXPERIMENTAL STUDIES OF THE EFFECT OF THE ACTION
OF FLOW PULSATIONS ON THE INTENSITY
OF HEAT EXCHANGE IN A PLATE HEAT EXCHANGER**

Н.В. ДЕРЮГИН, Е.С. БОРОДИНА, М.П. ТЮРИН, О.И. СЕДЛЯРОВ, С.А. ТРУБАЕВ
N.V. DERYUGIN, E.S. BORODINA, M.P. TYURIN, O.I. SEDLYAROV, S.A. TRUBAEV

(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))
(Russian State University named after A.N. Kosygina (Technologies. Design. Art))

E-mail: info@rguk.ru, kaf_peg@rguk.ru.

В современной энергетической отрасли огромное влияние уделяется энергоэффективности тепломеханического оборудования, используемого на тепло- и электрогенерирующих объектах. Использование ВЭР, а также сокращение энергетических затрат на собственные нужды – позволяет увеличить КПД как одного конкретного оборудования, так и электростанции в целом.

Одним из наиболее эффективных способов повышения эффективности работы тепломеханического оборудования является использование активных и пассивных методов интенсификации теплообмена в теплообменных аппаратах. Принимая во внимание конструктивные особенности теплообменного оборудования, использование активного метода интенсификации теплообмена является наиболее эффективным. Так, в статье представлены результаты экспериментальной части работы, в рамках которой рассматривалось повышение интенсификации теплообмена в пластинчатом

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект № 19-38-90297/19.

теплообменном аппарате за счет наложения на поток охлаждающего теплоносителя – пульсаций разной частоты. При анализе исследований, касающихся интенсификации теплообмена в теплообменных аппаратах, наблюдаются как положительный, так и отрицательный результаты.

In the modern energy industry, a huge influence is paid to the energy efficiency of thermal mechanical equipment used in heat and power generating facilities. The use of secondary energy resources as well as the reduction of energy costs for own needs — allows to increase the efficiency of both one specific equipment and the power plant.

One of the most effective ways to improve the efficiency of thermal mechanical equipment is the use of active and passive methods of intensifying heat transfer in heat exchangers. Considering the design features of heat exchange equipment, the use of an active method of intensifying heat transfer is the most effective. So, the paper presents the results of the experimental part of the work, within the framework of which an increase in the intensification of heat transfer in a plate heat exchanger was considered, due to the imposition of pulsations of different frequencies on the flow of a cooling coolant. When analyzing studies concerning the intensification of heat transfer in heat exchangers, both positive and negative results are observed.

Ключевые слова: интенсификация теплообмена, пластинчатый теплообменный аппарат, пульсации, теплопроводность, теплопередача, генератор импульсов.

Keywords: heat exchange intensification, plate heat exchanger, pulsations, thermal conductivity, heat transfer, pulse generator.

На основании ранее изученного материала [1], [8] можно сделать вывод, что интенсификация теплообмена за счет применения активных методов воздействия имеет как положительный, так и отрицательный результат. Рассматривая явление интенсификации теплообмена в пластинчатых теплообменных аппаратах, большое влияние на результат оказывают следующие факторы: характер оребрения пластин, расстояние между рядами ребер пластин; расстояние между пластинами; наличие/отсутствие гладких выступов в непосредственной близости к впускным отверстиям пластин теплообменника.

При использовании генератора импульсов различных типов особое значение имеет место его расположения. Так, в работе [2] приведены результаты исследования, в которых при установке генератора импульсов на стороне подачи охлаждающей воды коэффициент теплопередачи увеличивался на 80...90% при частоте генерируемых пульсаций 160 ц/м. В [3] были про-

ведены экспериментальные исследования влияния величины пульсации на коэффициент теплоотдачи от воды в горизонтальной трубе кожухотрубного теплообменника. Пульсации воды, получаемые в результате работы генератора пульсаций, расположенного перед теплообменником, создавали колебания давления воды и расхода. При этом число Рейнольдса достигало значения 85000, а задаваемая частота пульсаций была установлена на уровне 1,5...1,6 Гц. Отношение амплитуд варьировалось от 1 до 1,56. В результате проведенных исследований, было установлено, что при амплитуде колебаний 1,42 коэффициент теплопередачи увеличивался на 60...70%.

Описание эксперимента

Схема экспериментальной установки (рис. 1) состоит из двух независимых контуров: 1 – контур основной охлаждающей; 2 – замкнутый контур охлаждения основного и вспомогательного оборудования; генератора пульсаций (1), пластинчатого теплообменника ALFA LAVAL (2), насосов

основной охлаждающей воды (3) и насосов холодной воды ЗКО (4). Вода первого контура, пройдя через систему орошения вентиляторных градирен, имеет температуру в интервале 15...27°C. Установленные насосы обеспечивают циркуляцию воды через конденсатор паровой турбины, что обусловлено условиями эксплуатации. Перед конденсатором паровой турбины в подающих трубопроводах выполнены врезки трубопроводов меньшего сечения для отбора охлаждающей воды на пластинчатый теп-

лообменник (2) системы ЗКО. Вода второго контура циркулирует по замкнутому контуру и имеет температуру на выходе из теплообменника от 25 до 38°C (в зависимости от температуры наружного воздуха). После пластинчатого теплообменника вода подается в общий коллектор, из которого происходят отборы охлажденной воды на теплообменники потребителей. Из условий эксплуатации пластинчатого теплообменника известно, что расходы охлаждаемой и охлаждающей воды одинаковы.

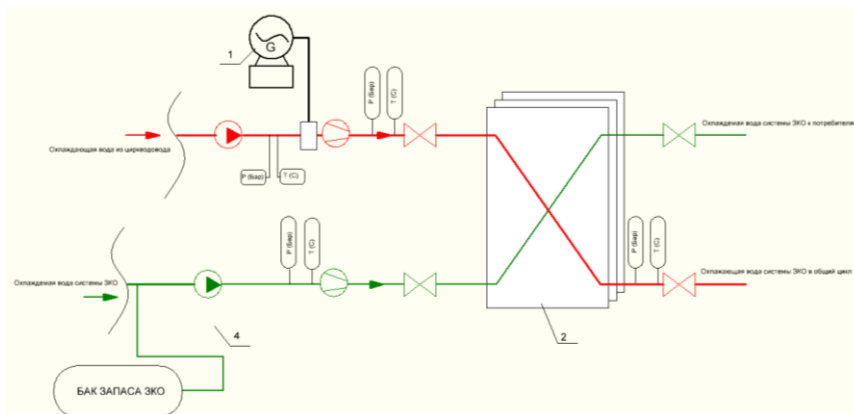


Рис. 1

Ход эксперимента.

Основная охлаждающая вода циркуляционными насосами (3) подавалась на пластинчатый водо-водяной теплообменник. На линии подачи воды после насосов был установлен генератор импульсов (1), который позволяет резко изменять величину расхода и давления охлаждающей жидкости в подающем трубопроводе посредством возникающих колебаний рабочего поршня клапана. Включение в работу генератора импульсов производилось кратковременно в течение 8 ч работы системы. В ходе эксперимента проводились измерения температуры охлаждаемой и охлаждающей воды на входе и выходе из теплообменника, давление и изменение расхода охлаждающей и охлаждаемой воды. При работающем генераторе импульсов в течение 2 ч параметры расхода воды не учитывались, а величина расхода охлаждающей жидкости рассчитывалась, исходя из имевшегося уравнения теплового баланса. Генератор импульсов

представляет собой клапан, усовершенствованной конструкции с возможностью использования пневматического и электропривода. Во время работы клапана происходит резкое открытие и закрытие запорного элемента, что создает колебания давления и расхода в трубопроводе охлаждающей воды. Специфика клапана подразумевает использование разных частот генерации импульсных колебаний.

В табл. 1 приведены технические характеристики пластинчатого теплообменного аппарата.

Данные эксперимента включают в себя характеристики теплоносителя, достигаемые в результате работы системы в импульсном и стационарном режиме. Справедливо отметить, что интенсификация теплообмена в пластинчатом теплообменном аппарате может происходить только в результате изменения коэффициента теплоотдачи со стороны охлаждаемой, либо охлаждающей жидкости [4], [10].

Таблица 1

Параметры	Горячая сторона	Холодная сторона
Массовый расход, кг/ч	1461579	1465247
Объемный расход, м ³ /ч	1473,00	1473,00
t на входе, °С	45	28
t на выходе, °С	35	38
P на входе, бар	6,0	6,0
Тип пластин	NT350KS HVDS	
Количество пластин	425 шт	
Толщина пластин	0,6 мм	

В ходе эксперимента использовались значения, полученные при шести разных значениях частоты и двух расходах холодной воды (табл. 2 – результаты расчета коэффициента теплопроводности при наложении пульсации на поток охлаждающей воды).

На графике (рис. 2 – графическое отображение зависимости коэффициента теплопередачи от частоты колебаний, при 2-х разных массовых расходах) видно, что на всех используемых частотах при увеличении расхода теплоносителя коэффициент теплопередачи растет. При этом при достижении частоты $\approx 1,8$ Гц наблюдается мак-

симальное значение величины коэффициента теплопередачи. После чего значения коэффициента теплопередачи при увеличении частоты начинают снижаться.

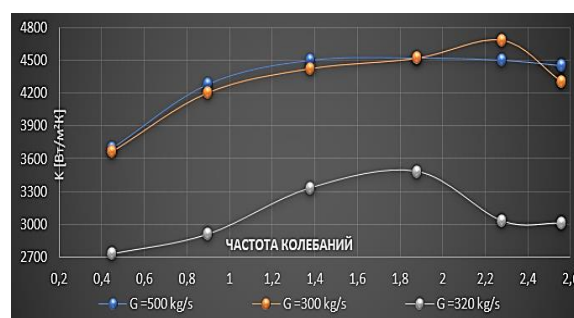


Рис. 2

Таблица 2

Частота, Гц	Массовый расход		
	G=500 кг/с	G=300 кг/с	G=320 кг/с
	K [Вт·м²/К]	K [Вт·м²/К]	K [Вт·м²/К]
0,45	3690	3660	2730
0,9	4280	4200	2910
1,38	4500	4420	3330
1,88	4520	4515	3480
2,28	4500	4680	3030
2,56	4450	4300	3010

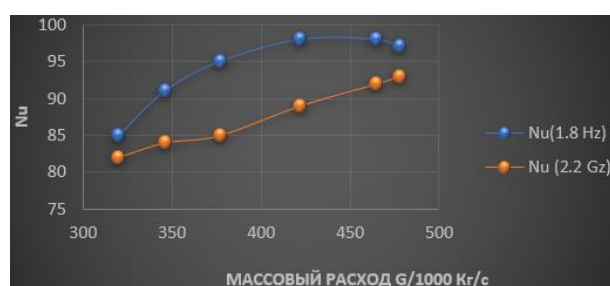


Рис. 3

По результатам проведенных расчетов представлена зависимость массового расхода охлаждающей воды при двух частотах (рис. 4 – графическое отображение зависимости коэффициента теплопередачи от массового расхода охлаждающей воды) от коэффициента теплопередачи в теплооб-

меннике, а также зависимость массового расхода от критерия Нуссельта (рис. 3 – графическое отображение величины числа Нуссельта и массового расхода охлаждающей воды).

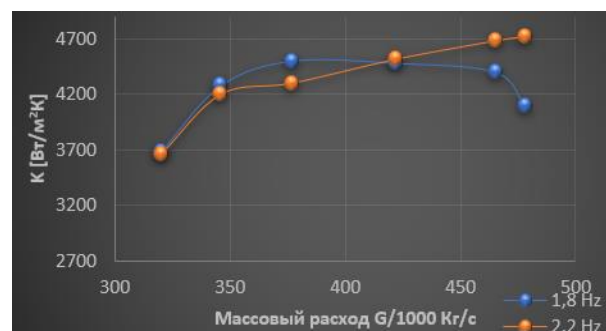


Рис. 4

Из рис. 4 видно, что при наложенной пульсации до 2,2 Гц коэффициент теплопередачи возрастает, с увеличением массового расхода, а при частоте 1,8 Гц характерно уменьшается при значениях массового расхода от 380 до 420 кг/с.

В табл. 3 приведены результаты расчета числа Нуссельта при наложении пульсации на поток охлаждающей воды и при изменении массового расхода.

Т а б л и ц а 3

Н=1,8 Гц		Н=2,2 Гц	
Массовый расход [кг/с]	Число Nu	Массовый расход [кг/с]	Число Nu
320	85	320	82
346	91	346	84
377	95	377	85
422	98	422	89
465	98	465	92

На рис 5 графически отображены величины числа Рейнольдса и коэффициента теплопередачи.

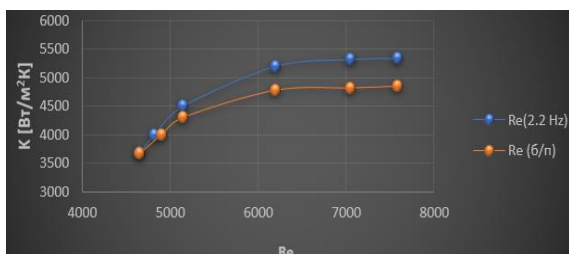


Рис. 5

ВЫВОДЫ

На основании графиков можно наблюдать, что, несмотря на увеличение частоты колебаний, скорость теплоносителя, которая при импульсном режиме тем больше, чем меньше длительность открытого положения клапана генератора импульсов, оказывает существенное влияние на интенсификацию теплообмена. График изменения расхода в каналах теплообменника демонстрирует, что при достижении частоты 1,4 Гц увеличение коэффициента теплопередачи происходит плавно. Во время работы генератора пульсаций значительно изменяется число Рейнольдса, что в свою очередь оказывает влияние на изменение коэффициента теплопередачи. При анализе полученных значений (табл. 4) видно, что интенсификация теплообмена при частоте 2,2 Гц значительно увеличивается при $Re=4500...6200$, а далее с усилением турбулентности [7], [9] потока остается практиче-

ски неизменной. При сравнении двух режимов потока охлаждающих жидкостей с наложением пульсации и без видно, что пульсация потока действительно увеличивает коэффициент теплопередачи в ребристых каналах [5], [6] теплообменника. Однако при достижении частоты 1,8 Гц происходит плавное снижение коэффициента теплопередачи, в первую очередь, это обусловлено снижением расхода охлаждающей жидкости через теплообменник. Наложение пульсаций с частотой 1,4...1,8 Гц является наиболее эффективным методом интенсификации теплообмена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абзалова Д.А., Абишенов Х.А., Мырзалиев Д.С., Молдагалиев А.Б., Жылкыбаева С.К., Альмуханов М.А., Жолбарыс Н.Н. Новые антикоррозионные защитные покрытия на основе промышленных отходов производства регионов Казахстана для защиты оборудования текстильной промышленности // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, №4. С. 28...33.
2. Кудашев С.Ф. и др. Интенсификация теплопередачи в пластинчатом теплообменнике за счет пульсации потока теплоносителя // Современные наукоемкие технологии. – 2019, №. 10-2. С.262...267.
3. Zohir A.E., Aziz A.A.A., Habib M.A. Heat transfer characteristics and pressure drop of the concentric tube equipped with coiled wires for pulsating turbulent flow // Experimental Thermal and Fluid Science. – V. 65, 2015. P.41...51. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.03.003>
4. Долгов А.А. Исследование эффективности ультразвукового метода снижения скорости образования накипи в паяных пластинчатых теплообменниках // ББК 31.38+ 38 Н 72. – 2010. С. 121.

5. Li J., Dang C., Hihara E. Heat transfer enhancement in a parallel, finless heat exchanger using a longitudinal vortex generator, Part B: Experimental investigation on the performance of finless and fin-tube heat exchangers // International journal of heat and mass transfer. – V. 128, 2019. P. 66...75.

6. 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. – V. 10, 2017. P. 570...578.

7. Huang X.J., Li Y.R., Zhang L., Hu Y.P. Turbulent rayleigh-bénard convection in a cubical container filled with cold water near its maximum density// International journal of heat and mass transfer. – V. 127, 2018. P. 21...31.

8. Вдовин А.В., Голянин А.А. Обзор методов интенсификации теплообмена // ББК 3 П27. – 2020. С.25.

9. Кудашев С.Ф. и др. Интенсификация теплопередачи в пластинчатом теплообменнике за счет пульсации потока теплоносителя // Современные наукоемкие технологии. – 2019, № 10-2. С. 262...267.

10. Лобанов И.Е. Математическая модель интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в кольцевых каналах с турбулизаторами "Выступ-канавка" // Наука. Мысль: электронный периодический журнал. – 2017, №2. С.108...122.

REFERENCES

1. Abzalova D.A., Abshenov Kh.A., Myrzaliev D.S., Moldagaliev A.B., Zhylkybaeva S.K., Al'mukhanov M.A., Zholbarys N.N. Novye antikorrozionnye zashchitnye pokrytiya na osnove promyshlennykh otkhodov proizvodstva regionov Kazakhstana dlya zashchity oborudovaniya tekstil'noy promyshlennosti // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2020, №4. S. 28...33.

2. Kudashev S.F. i dr. Intensifikatsiya teplopere-dachi v plastinchatom teploobmennike za schet pul'sa-

tsii potoka teplonositelya // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. – 2019, №. 10-2. S.262...267.

3. Zohir A.E., Aziz A.A.A., Habib M.A. Heat transfer characteristics and pressure drop of the concentric tube equipped with coiled wires for pulsating turbulent flow // Experimental Thermal and Fluid Science. – V.65, 2015. P.41...51. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.03.003>

4. Dolgov A.A. Issledovanie effektivnosti ul'trazvukovogo metoda snizheniya skorosti obrazovaniya nakipi v payanykh plastinchatykh teploobmennikakh // ББК 31.38+ 38 N 72. – 2010. S. 121.

5. Li J., Dang C., Hihara E. Heat transfer enhancement in a parallel, finless heat exchanger using a longitudinal vortex generator, Part B: Experimental investigation on the performance of finless and fintube heat exchangers // International journal of heat and mass transfer. – V. 128, 2019. P. 66...75.

6. 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. – V. 10, 2017. P. 570...578.

7. Huang X.J., Li Y.R., Zhang L., Hu Y.P. Turbulent rayleigh-bénard convection in a cubical container filled with cold water near its maximum density// International journal of heat and mass transfer. – V. 127, 2018. P. 21...31.

8. Vdovin A.V., Golyanin A.A. Obzor metodov intensifikatsii teploobmena // ББК 3 П27. – 2020. С.25.

9. Kudashev S.F. i dr. Intensifikatsiya teplopere-dachi v plastinchatom teploobmennike za schet pul'satsii potoka teplonositelya // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. – 2019, № 10-2. S. 262...267.

10. Lobanov I.E. Matematicheskaya model' intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kol'tsevykh kanalakh s turbulizatorami "Vystup-kanavka" // Nauka. Mysl': elektronnyy periodicheskiy zhurnal. – 2017, №2. S.108...122.

Статья опубликована по материалам Косыгинского форума . Поступила 18.01.22.