

Повышение интенсификации теплообмена в кожухотрубных теплообменниках

*П.Н. Кузнецов, К.А. Миндров, А.А. Кузнецов, И.Ю. Бекшаев, А.А. Инчин,
А.В. Охотников, С.В. Чугунов*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва», Саранск

Аннотация: В работе изучаются проблемы интенсификации теплоотдачи в кожухотрубных теплообменных аппаратах, применяемых в теплоснабжении зданий. Решением данной проблемы является использование циркуляции потока теплоносителя в импульсном режиме, при различных частотных пульсациях. На основании экспериментальных исследований по определению эффективности кожухотрубного водоводяного теплообменника предложена методика, в соответствии с которой доказано, что импульсный режим, по сравнению со стационарным является наиболее эффективным по основным показателям, таким как коэффициент теплопередачи и тепловой мощности.

Ключевые слова: интенсификации, теплоотдача, теплообменный аппарат, теплоноситель, колебания, эффективность, тепловая мощность

Основным типом теплообменных аппаратов в системах горячего водоснабжения в некоторых городах до сих пор являются кожухотрубные подогреватели. К данному оборудованию относятся водо-водяные подогреватели горизонтального исполнения по ГОСТ 27590-99; горизонтальные пароводяные по ОСТ 108.271.105-76. Конструкция данных теплообменных аппаратов была разработана в 50-х годах и на сегодняшний момент сильно устарела. Поэтому повышения эффективности кожухотрубных подогревателей в системах ГВС в настоящее время является актуальной задачей. Повышение эффективности кожухотрубных теплообменников в теплоэнергетических установках осуществляется за счет интенсификации их работы, с использованием самых современных методов.

В настоящее время существует более десяти методов интенсификации теплоотдачи, которые можно отнести к двум основным группам: активные и пассивные [1]. Главным отличием между ними является то, что, для

пассивных методов требуется использование дополнительной энергии для обеспечения процесса интенсификации.

Актуальные проблемы интенсификации в процессах теплообмена изучаются в работах многих известных учёных, например, Поповым И.А. [1, 2, 3]. Процессы интенсификации при пульсациях потока жидкости, подробно исследуются в трубах с термически проницаемыми стенками. Проводя подобные исследования, авторы приходят к выводу об увеличении интенсивности теплообмена при создании колебаний [4, 5, 6].

Экспериментальные исследования протекания тепломассообменных процессов в нестационарных условиях проводятся как в России, так и за рубежом. Основным отличием ранее описанных исследований, является создание потока жидкости с высокой частотой пульсаций, т.е. значительно превышающей 1 Гц. При этом диапазон частот ниже этой величины мало изучен.

Таким образом основной целью настоящей работы, является оценка влияния в теплообменных процессах, низкочастотных пульсаций с частотой около 0,5 Гц. Краткий результат тепловых испытаний кожухотрубного аппарата в стационарном и импульсном режимах циркуляции нагреваемого теплоносителя представлены в таблице 1 [2]. Испытание кожухотрубного теплообменника проводилось в лаборатории на кафедре теплоэнергетических систем ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва».

Таблица 1 – Экспериментальные среднестатистические данные тепловых испытаний

Параметры	Теплоноситель горячий (греющий)				Теплоноситель холодный (нагреваемый)				Режим циркуляции нагреваемого теплоносителя
	1	2	3	ср.	1	2	3	ср.	
Расход, кг/с	0,183	0,183	0,183	0,180	0,234	0,228	0,227	0,230	стационарный
T _{вх} , °С	45,79	45,38	45,61	45,59	9,86	9,87	9,88	9,87	
T _{вых} , °С	34,05	34,24	34,21	34,17	26,65	26,69	26,69	26,67	
Расход, кг/с	0,183	0,183	0,183	0,180	0,236	0,229	0,229	0,230	импульсный
T _{вх} , °С	46,85	47,31	46,00	46,72	9,86	9,85	9,88	9,86	
T _{вых} , °С	33,6	33,12	33,49	33,40	27,86	28,32	28,09	28,09	

Эффективность кожухотрубного водо-водяного теплообменника можно определить по ниже представленной методике [7].

Слева расчет ведется для стационарного режима циркуляции теплоносителя, а с права для импульсного режима.

1. Средняя температура нагреваемого теплоносителя в теплообменнике:

$$t_{x.cp} = \frac{9,87 + 26,67}{2} = 18,27^{\circ}C \qquad t_{x.cp} = \frac{9,86 + 28,09}{2} = 18,98^{\circ}C$$

По справочнику [8] определяем теплоемкость нагреваемого теплоносителя, для стационарного режима она составила 4,183 кДж/(кг·°C), а для импульсного режима 4,182 кДж/(кг·C).

Средняя температура греющего теплоносителя в теплообменнике:

$$t_{z.cp} = \frac{45,59 + 34,17}{2} = 39,88^{\circ}C \qquad t_{z.cp} = \frac{46,72 + 33,40}{2} = 40,06^{\circ}C$$

По справочнику [8] определяем теплоемкость греющего теплоносителя, для стационарного режима она составила 4,179 кДж/(кг·°C), а для импульсного режима 4,179 кДж/(кг·C).

Водяные эквиваленты принимают значения:

$$W_x = 0,23 \cdot 4,183 = 0,962 \text{кВт} / ^{\circ}C \qquad W_x = 0,23 \cdot 4,182 = 0,962 \text{кВт} / ^{\circ}C$$

$$W_z = 0,18 \cdot 4,179 = 0,752 \text{кВт} / ^{\circ}C \qquad W_z = 0,18 \cdot 4,179 = 0,752 \text{кВт} / ^{\circ}C$$

$$W_z < W_x$$

$$W_z < W_x$$

2. Мощность теплообменника по нагреваемой среде составит:

$$Q_x = 0,962 \cdot (26,67 - 9,87) = 16,16 \text{кВт} \qquad Q_x = 0,962 \cdot (28,09 - 9,86) = 17,54 \text{кВт}$$

3. Учитывая прямоточную схему организации движения греющего и нагреваемого теплоносителей с учетом соотношения водяных эквивалентов определяем среднюю разность температур:

$$\Delta t_{cp} = \frac{t_{\bar{z}} - t_{\bar{x}}}{2,3 \cdot \lg\left(\frac{t_{\bar{z}}}{t_{\bar{x}}}\right)}$$

где Δt_{θ} - большая разность температур между нагреваемой и греющей средой, $^{\circ}\text{C}$;

Δt_{μ} - меньшая разность температур между нагреваемой и греющей средой, $^{\circ}\text{C}$;

$$\Delta t_{\min} = 34,17 - 26,67 = 7,5^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{\min} = 33,4 - 28,09 = 5,31^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{\max} = 45,59 - 9,87 = 35,72^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{\max} = 46,72 - 9,86 = 36,86^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{cp} = \frac{34,17 - 7,5}{2,3 \cdot \lg\left(\frac{35,72}{7,5}\right)} = 18,1^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{cp} = \frac{36,86 - 5,31}{2,3 \cdot \lg\left(\frac{36,86}{5,31}\right)} = 16,3^{\circ}\text{C}$$

4. Расчетный диаметр единичной трубки трубной решетки:

$$d_p = (d_{\text{вн}} + d_{\text{н}}) / 2,$$

где $d_{\text{вн}}$ - диаметр трубки внутренний, м;

$d_{\text{н}}$ - диаметр трубки наружный, м;

$$d_p = \frac{0,016 + 0,018}{2} = 0,017 \text{ м}$$

Таким образом площадь теплопередающей поверхности теплообменника будет определяться:

$$F = \pi d_p n,$$

где d_p - расчетный диаметр трубки, м;

l - длина трубки, м;

n - количество трубок в трубной решетке, шт.

$$F = 3,14 \cdot 0,017 \cdot 2 \cdot 5 = 0,53 \text{ м}^2$$

5. Коэффициент теплопередачи по нагреваемой среде:

$$K = \frac{Q_x}{F \Delta t_{cp}},$$

$$K = \frac{16,16}{0,53 \cdot 18,1} = 1,67 \text{ кВт} / (\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$$

$$K = \frac{17,54}{0,53 \cdot 16,3} = 2,02 \text{ кВт} / (\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$$

6. Число единиц переноса для греющего и нагреваемого теплоносителей:

$$N_x = \frac{KF}{W_x},$$

$$N_z = \frac{KF}{W_z},$$

$$N_x = \frac{1,67 \cdot 0,53}{0,962} = 0,93$$

$$N_x = \frac{2,02 \cdot 0,53}{0,962} = 1,12$$

$$N_z = \frac{1,67 \cdot 0,53}{0,752} = 1,19$$

$$N_z = \frac{2,02 \cdot 0,53}{0,752} = 1,43$$

Для дальнейших расчетов принимаем наименьшее значение числа переноса.

$$N_z = \begin{cases} N_x, N_x < N_z, \\ N_z, N_x > N_z, \\ N_x = N_z, N_x > N_z, \end{cases}$$

$$N_{\min} = N_x = 0,93$$

$$N_{\min} = N_x = 1,12$$

7. Максимальный температурный напор в теплообменнике:

$$\Delta t_{\max} = t'_z - t'_x,$$

где t'_z – температура греющего теплоносителя на входе в теплообменный аппарат, °С;

t'_x – температура греющего теплоносителя на выходе в теплообменный аппарат, °С;

$$\Delta t_{\max} = 45,53 - 9,87 = 35,72^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\max} = 46,72 - 9,86 = 36,86^\circ\text{C}$$

8. Эффективность теплообменника в случае стационарной и импульсной циркуляции теплоносителя [9, 10]:

$$E = N_{\min} \frac{\Delta t_{cp}}{\Delta t_{\max}},$$

$$E = 0,93 \frac{18,1}{35,72} = 0,471$$

$$E = 1,12 \frac{16,3}{36,86} = 0,495$$

Основные расчетные данные, полученные в ходе определения эффективности работы горизонтального кожухотрубного теплообменника в

импульсном и стационарном режиме, для большей наглядности изобразим в виде диаграммы (рис.1).



(а)



(б)

Рисунок 1. – Расчетные данные исследования (а), разница расчетных данных между импульсным и стационарным режимах циркуляции (б)

На диаграмме представлены сводные данные, о проведённых результатах исследований, выполненные в стационарном и импульсном режимах течения теплоносителя. Таким образом, можно однозначно сказать, что по основным показателям, таким, как коэффициент теплопередачи

(превышение на 5,1 %), тепловой мощности (превышение на 8,61 %), импульсный режим работы является более эффективным. Кроме того, использование импульсного режима циркуляции теплоносителя приводит к интенсификации теплообмена по сравнению со стационарным режимом в среднем на 20 %.

Литература

1. Попов И.А. Махьянов Х.М., Гуреев В.М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. 560 с.
 2. Макеев А.Н. Импульсные технологии в энергетике: проектирование систем теплоснабжения. Саранск: Изд-во Мордов. Ун-та, 2020. 248с.
 3. Левцев А.П. Макеев А.Н. Импульсные системы тепло- и водоснабжения. Саранск: Изд-во Мордов. Ун-та, 2015. 172с.
 4. Панов А.В., Кузнецов А.А. Исследование конвективных процессов в емкостных теплообменниках // Инженерный вестник Дона, 2015, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3134.
 5. Кузнецов А.А., Миндров К.А. Разработка схемного решения элеваторного узла с импульсным подмесом теплоносителя // Инженерный вестник Дона, 2021, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6903.
 6. Бакластов А.М. Горбенко В. А., Удыма П. Г. Проектирование, монтаж и эксплуатация тепломассообменных установок. М.: Энергоиздат, 1981. 336 с.
 7. Бухмиров В.В., Ракутина Д.В., Солнышкова Ю.С. Пророкова М.В. Тепловой расчет рекуперативного теплообменного аппарата. Иваново, Издательство Ивановского Университетата 2013. 124 с.
 8. Бухмиров В.В., Ракутина Д.В., Солнышкова Ю.С. Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен». Иваново, Издательство Ивановского Университетата 2009. 102 с.
-

9. Hartmann H. Wärmeübergang bei der Kondensation strömender Sattdämpfe in senkrechten Rohren. Chemie-Ingenieur-Technic. Berlin, 1961. Bd. 33, volume 5. ss. 343-348.

10. Skripov P.V., Starostin A.A., Volosnikov D.V., Zhelezny V.P. Comparison of thermophysical properties for oil/refrigerant mixtures by use the pulse heating method // International Journal of Refrigeration. 2003. Vol.26.

References

1. Popov I.A. Makhyanov Kh.M., Gureev V.M. Fizicheskie osnovy i promyshlennoe primeneniye intensivatsii teploobmena [Physical basis and industrial application of heat exchange intensification]. Kazan': Tsentr innovatsionnykh tekhnologiy, 2009. 560 p.

2. Makeev A.N. Impul'snye tekhnologii v energetike: proektirovaniye sistem teplosnabzheniya [Pulse technologies in the energy sector: design of heat supply systems]. Saransk: Izd-vo Mordov. Un-ta, 2020. 248p.

3. Levitsev A.P. Makeev A.N. Impul'snye sistemy teplo- i vodosnabzheniya [Pulse heat and water supply systems]. Saransk: Izd-vo Mordov. Un-ta, 2015. 172p.

4. Panov A.V., Kuznetsov A.A. Inzhenernyy vestnik Dona, 2015, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3134.

5. Kuznetsov A.A., Mindrov K.A. Inzhenernyy vestnik Dona, 2021, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6903.

6. Baklastov A.M. Gorbenko V. A., Udyma P. G. Proektirovaniye, montazh i ekspluatatsiya teplomassoobmennykh ustanovok [Design, installation and operation of heat and mass transfer installations]. M.: Energoizdat, 1981. 336 p.

7. Bukhmirov V.V., Rakutina D.V., Solnyshkova Yu.S. Prorokova M.V. Teplovoy raschet rekuperativnogo teploobmennogo apparata [Thermal calculation



of the regenerative heat exchanger]. Ivanovo, Izdatel'stvo Ivanovskogo Universitetata 2013. 124 p.

8. Bukhmirov V.V., Rakutina D.V., Solnyshkova Yu.S. Spravochnye materialy dlya resheniya zadach po kursu «Teplomassoobmen» [Reference materials for solving problems in the course «Heat and mass transfer»]. Ivanovo, Izdatel'stvo Ivanovskogo Universitetata 209. 102 p.

9. Hartmann H. Wärmeübergang bei der Kondensation strömender Sattdämpfe in senkrechten Rohren. Chemie-Ingenieur-Technic. Berlin, 1961. Bd. 33, volume 5. pp. 343-348.

10. Skripov P.V., Starostin A.A., Volosnikov D.V., Zhelezny V.P. International Journal of Refrigeration. 2003. Vol.26.