

## Разработка лабораторного контура с теплообменником-нагнетателем

*А.Г.Бажанов, И.К. Суняйкин*

*Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, Саранск*

**Аннотация:** Разработана лабораторная схема установки с теплообменником-нагнетателем в контуре горячей воды котла. Проведенные исследования показали, что температура горячей воды на выходе изменяется в зависимости от частоты колебаний электромагнитного клапана при заданном расходе, а наибольшая эффективность нагрева воды наблюдается при частоте 1.75 Гц. Расчет коэффициента теплопередачи показал, что при стационарном режиме течения коэффициент теплопередачи теплообменника-нагнетателя равен  $180 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$ . Затем с ростом частоты коэффициент теплопередачи плавно уменьшается и достигает минимума  $173 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$  при 1.0 Гц. При дальнейшем увеличении частоты коэффициент теплопередачи начинает увеличиваться и достигает максимума  $188 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$  при 1.75 Гц.

В результате эксперимента также установлено, что с ростом частоты расход в контуре горячей воды возрастает и достигает максимума на частоте 1.75 Гц  $Q = 0.6 \frac{\text{л}}{\text{сек}}$ . Т.е. при такой частоте теплообменник-нагнетатель за счет колебаний потока жидкости в первом контуре (контуре холодной воды) наиболее эффективно передает колебания потока во второй контур (контур горячей воды), что можно использовать для уменьшения мощности насоса в контуре горячей воды на данной частоте.

**Ключевые слова:** теплообменник-нагнетатель, коэффициент теплопередачи, электромагнитный клапан, гидроудар.

### Введение

Плоские теплообменники играют важную роль в различных отраслях промышленности, обеспечивая эффективную передачу тепла между средами. Они используются для охлаждения и нагревания жидкостей, газов и паров, что делает их важным элементом схем теплопередачи [1-3]. Плоские теплообменники являются эффективными устройствами для передачи тепла между двумя жидкостями через металлические пластины. Они широко используются в различных промышленных отраслях благодаря своим высоким теплопередающим свойствам [4-6].

В данной работе представлена лабораторная схема установки с плоским теплообменником-нагнетателем в контуре горячей воды котла. Лабораторная схема представляет собой компактную систему, включающую:

котел, теплообменник-нагнетатель, электромагнитный клапан, установленный в контур холодной воды, насосы в двух контурах, регулируемую арматуру и контрольно-измерительные приборы.

### Эксперимент

Экспериментальные исследования проводились с использованием различных режимов работы системы (стационарный и импульсный режимы), что позволило получить данные по теплопередаче в зависимости от частоты колебаний горячего потока, рассчитать КПД схемы и выбрать оптимальные параметры работы установки (рис. 1) [7-9]. На рис.2 представлена схема теплообменника-нагнетателя.



Рис.1. Лабораторная схема с теплообменником-нагнетателем для дополнительного нагрева воды в контуре горячей воды котла.

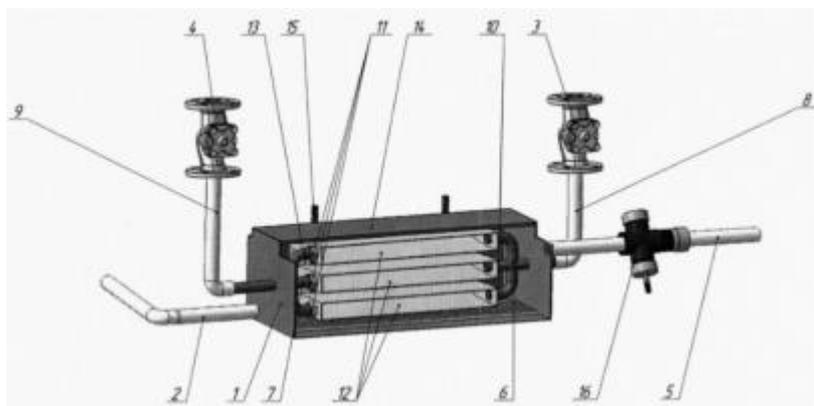


Рис. 2. Функциональная схема теплообменника-нагнетателя.

Импульсный теплообменник-нагнетатель, включает в себя: полый корпус 1, к торцу которого жестко присоединен входной патрубок 2 рабочей среды, обратные клапаны входной 3 и выходной 4 закачиваемой среды, выходной патрубок рабочей среды 5, входной 6 и выходной 7 коллекторы закачиваемой среды, соединенные с внешней стороны с входом 8 и выходом 9, а с внутренней стороны посредством быстросъемных резьбовых соединений 10, 11 с медными оболочками 12, на которых установлены демпфирующие элементы 13, крышка 14, закрепленная посредством шпилек 15 и ударного узла 16.

Импульсный теплообменник-нагнетатель работает следующим образом. До начала работы, медные конверты 12 должны быть заполнены перекачиваемой жидкостью (в середине схемы): необходимо проверить впускной клапан 3, впускную трубу 8, впускной коллектор 6, медные конверты 12, выходной коллектор 7, выпускную трубу 9, выходной клапан 4. Далее, рабочая жидкость (холодная вода) подается во внутренний объем полости 1 через входное отверстие патрубка 2, когда он заполняется, рабочая жидкость вытекает через выходное отверстие 5 и проходит через ударный клапан 16.

При закрытии ударного клапана 16, поток резко прерывается и происходит гидравлический удар. В этом случае кинетическая энергия рабочего потока переходит в потенциальную энергию с кратным повышением давления. Далее, накопленный потенциал во время обратного хода волны гидравлического удара передается потоку в противоположном направлении, и этот процесс приводит к дополнительному перемещению жидкости в контуре горячей воды. В дальнейшем процесс повторяется, возникают пульсации расхода в контуре горячей воды за счет колебаний потока в контуре холодной воды. Производительность теплообменника-нагнетателя и интенсивность теплопередачи зависят от разницы давлений

---

между средами и частоты прерывания потока. Внешний вид теплообменника-нагнетателя показан на рисунке 3.

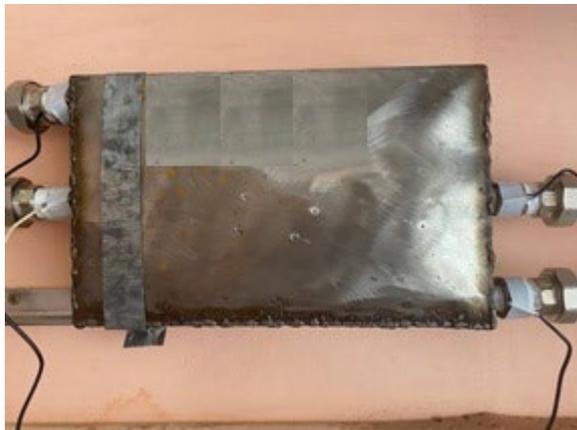


Рис. 3. Пластинчатый теплообменник-нагнетатель

Для создания лабораторной установки было выбрано следующее оборудование. Были выбраны 2 циркуляционных насоса General Hydraulic GRS 25/4-1, которые обеспечивают циркуляцию рабочих жидкостей (горячей и холодной воды) в замкнутых контурах. Для создания пульсирующего движения жидкости (холодной воды) был выбран электромагнитный клапан "1/2" на 220 В (нормально закрытый), который электромагнитно управляет потоком жидкости. Внешний вид поверхностного насоса и электромагнитного клапана показан на рисунке 4.



Рис. 4. Поверхностный насос гидравлический GRS 25/4-1 и соленоидный электромагнитный клапан

Для регистрации показаний расхода применялись водосчетчики Бетар СГВ-15. Для регистрации показаний давления использовался манометр МПЗ-УУ2. Для регистрации показаний температуры использовались электронные термометры с выносным датчиком. Внешний вид счетчиков воды, манометров и датчиков температуры показан на рисунке 3.8.



Рис.5. Счетчик воды Бетар СГВ-15, манометр МПЗ-УУ2  
и датчики температуры

### Результаты и их обсуждение

Используя экспериментальные данные было рассчитано значение коэффициента теплопередачи для различных частот колебания потока холодной жидкости [10-12].

Данные для стационарного режима:

Площадь поверхности теплообмена  $F=0,5526 \text{ м}^2$

Температура горячей воды на входе  $T_1=57,7333 \text{ }^\circ\text{C}$

Температура холодной воды на входе в систему  $T_2=9,9 \text{ }^\circ\text{C}$

Температура горячей воды на выходе  $T_3=53,4116 \text{ }^\circ\text{C}$

Температура холодной воды на выходе  $T_4=16,093 \text{ }^\circ\text{C}$

Тепловая нагрузка теплообменника  $Q = 0.00015 \text{ м}^3/\text{с}$

$k$  - средний коэффициент теплопередачи через стенку, разделяющую теплоносители, рассчитываемый по формуле (1):

$$K_{\text{exp}} = \frac{Q_1}{F \cdot \Delta t}, \quad K_{\text{exp}} = \frac{2728}{0,5526 \cdot 42,406} = 116,41 \quad (1)$$

Теплоемкость теплообменника рассчитывали по формуле (2):

$$Q_1 = c Q \rho \Delta t, \quad Q_1 = 4200 \cdot 0,00015 \cdot 1000 \cdot (57,73 - 53,4) = 2728 \text{ Вт} \quad (2)$$

Среднее логарифмическое температурное значение:

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t_{\text{max}} - \Delta t_{\text{min}}}{2,3 \lg \frac{\Delta t_{\text{max}}}{\Delta t_{\text{min}}}}, \quad \overline{\Delta t} = \frac{47,833 - 37,3186}{2,3 \lg \frac{47,833}{37,3186}} = 42,41 \quad (3)$$

Максимальное изменение температуры рассчитывали по формуле (4):

$$\Delta t_{\text{max}} = T_1 - T_2, \quad \Delta t_{\text{max}} = 57,33 - 9,9 = 47,83. \quad (4)$$

Минимальное изменение температуры рассчитывали по формуле (5):

$$\Delta t_{\text{min}} = T_3 - T_4, \quad \Delta t_{\text{min}} = 53,41 - 16,09 = 37,32. \quad (5)$$

Теоретический коэффициент теплопередачи рассчитывали по формуле (6):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} + \frac{\delta}{\lambda}} \quad (6)$$
$$K = \frac{1}{\frac{1}{2446} + \frac{1}{2203} + \frac{3 \cdot 10^{-3}}{0,84 \cdot 10^5}} = 180,1 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

При это значение коэффициента теплоотдачи для горячей воды определяли по формуле (7):

$$a_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}; \quad a_1 = \frac{53,5 \cdot 0,64}{0,014} = 2446; \quad (7)$$

Критерий Нуссельта определяли по формуле (8):

$$Nu = 0.021 \cdot Re^{0,73} \cdot Pr_{water}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{water}}{Pr_{wll}}\right)^{0,25}; \quad (8)$$

$$Nu = 0.021 \cdot 24450^{0,73} \cdot 3.59_{water}^{0,43} \cdot \left(\frac{3,59}{5,7}\right)^{0,25} = 53.5$$

Критерий Рейнольдса для потока воды определяется по формуле (9):

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, Re = \frac{0,974 \cdot 0,014}{0,556 \cdot 10^{-6}} = 24450 \quad (9)$$

Средняя скорость движения воды в контуре определяется по формуле (10):

$$v = \frac{Q}{\frac{\pi d^2}{4}}, v = \frac{0,00015}{\frac{3,14 \cdot 0,014^2}{4}} = 0,974 \quad (10)$$

Коэффициент теплоотдачи холодной воды определяли по формуле:

$$a_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}, a_2 = \frac{54.11 \cdot 0,57}{0,014} = 2203 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C} \quad (11)$$

Критерий Рейнольдса для потока холодной воды определяли по формуле (9):

$$Re = \frac{0,974 \cdot 0,014}{1,306 \cdot 10^{-6}} = 10490$$

Критерий Нуссельта определяли по формуле (8):

$$Nu = 0,021 \cdot 10490^{0,73} \cdot 9.5_{water}^{0,43} \cdot \left(\frac{9.5}{5.7}\right)^{0,25} = 54.11$$

В данной работе выполнен расчет коэффициента теплопередачи пластинчатого теплообменника для стационарного и импульсного режима работы теплоносителя. Аналогичные расчеты проведены для следующих частот: 0,20 Гц; 0,3 Гц; 0,5 Гц; 0,8 Гц. Расчеты показали, что число Рейнольдса больше 10000 для всех частот, поэтому формула расчета числа Нуссельта остается неизменной, исходя из этого, все остальные расчеты коэффициента теплопередачи были аналогичны.

Также в работе были исследованы временные зависимости дельта (разности) температуры входной и выходной воды в стационарном и импульсном режимах при различных частотах колебаний электромагнитного клапана в контуре холодной воды (рисунки 6-9).

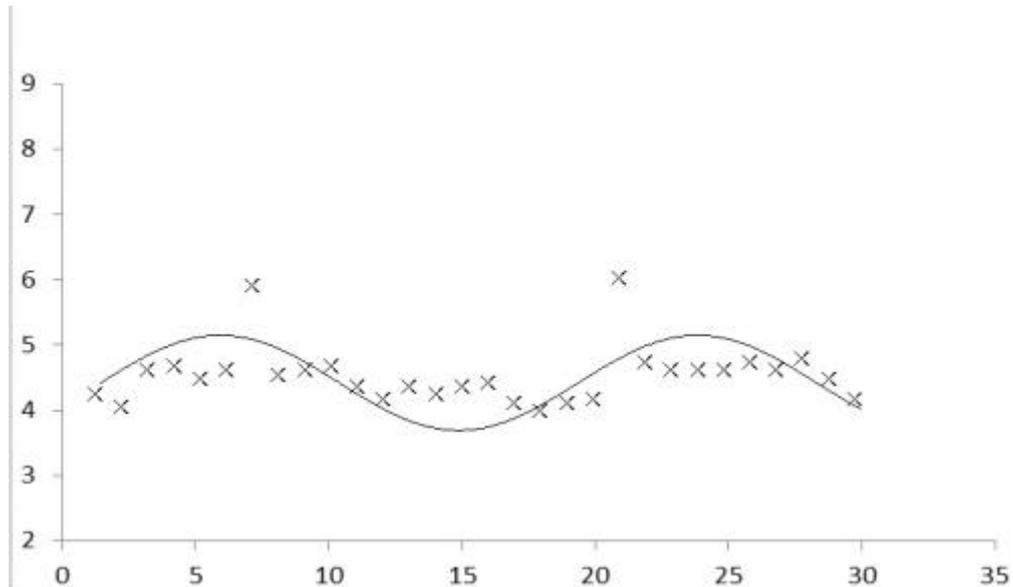


Рис.6. Зависимость дельта  $t$  горячей воды от времени на частоте 1.0 Гц.

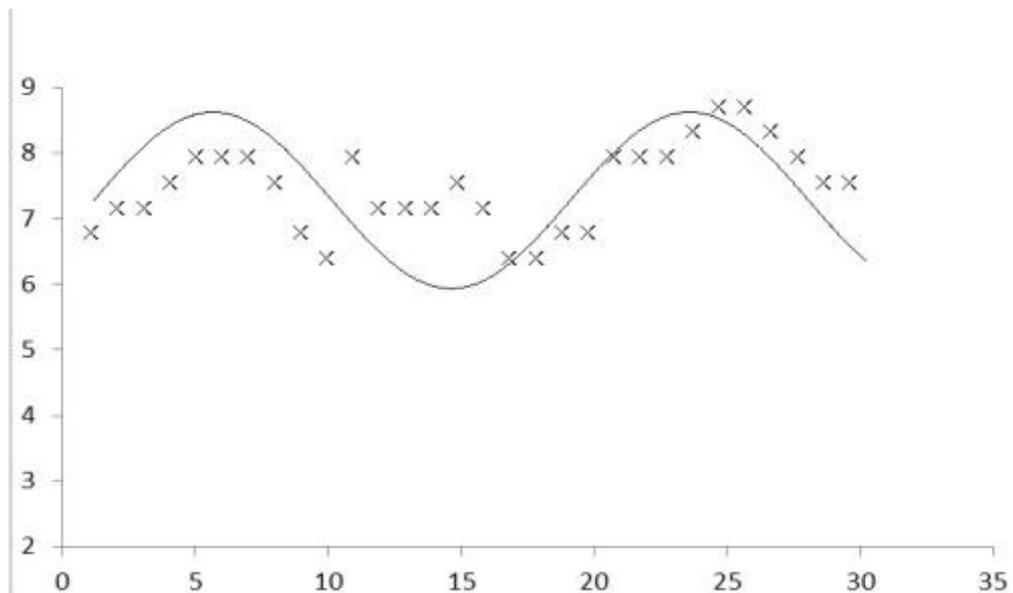


Рис.7. Зависимость дельта  $t$  холодной воды от времени на частоте 1.0 Гц

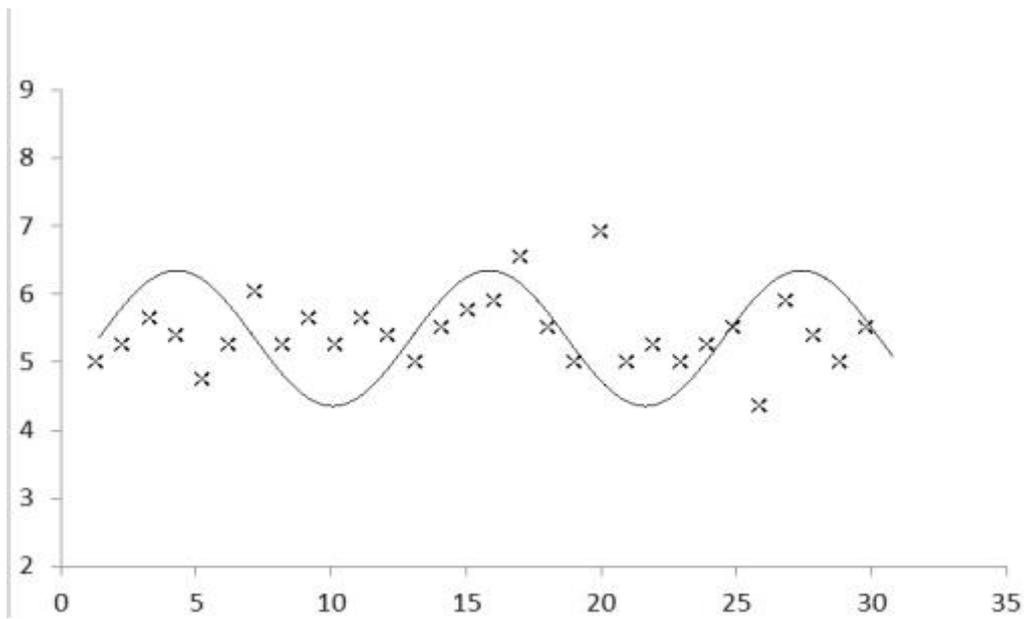


Рис.8. Зависимость дельта t горячей воды от времени на частоте 1.5 Гц.

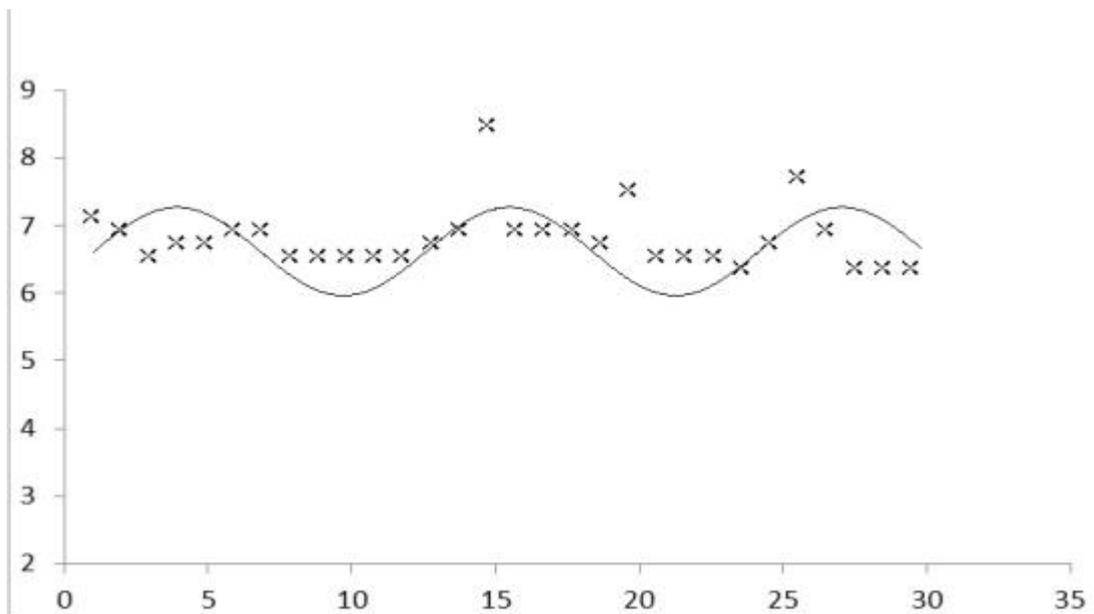


Рис.9. Зависимость дельта t холодной воды от времени на частоте 1.5 Гц

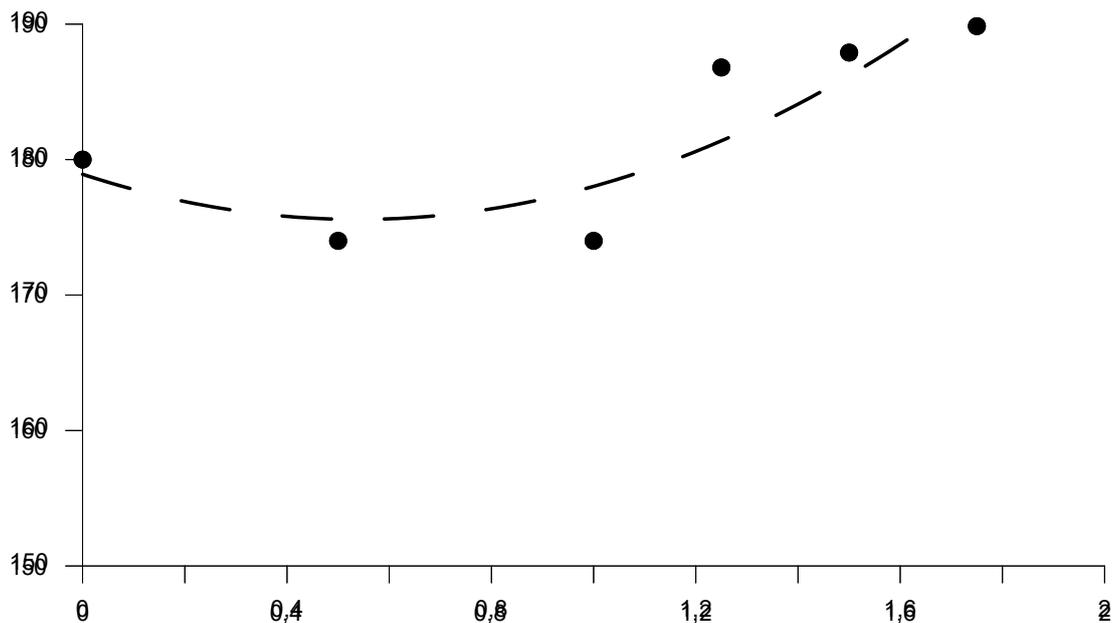


Рис. 10. Теоретический коэффициент теплопередачи

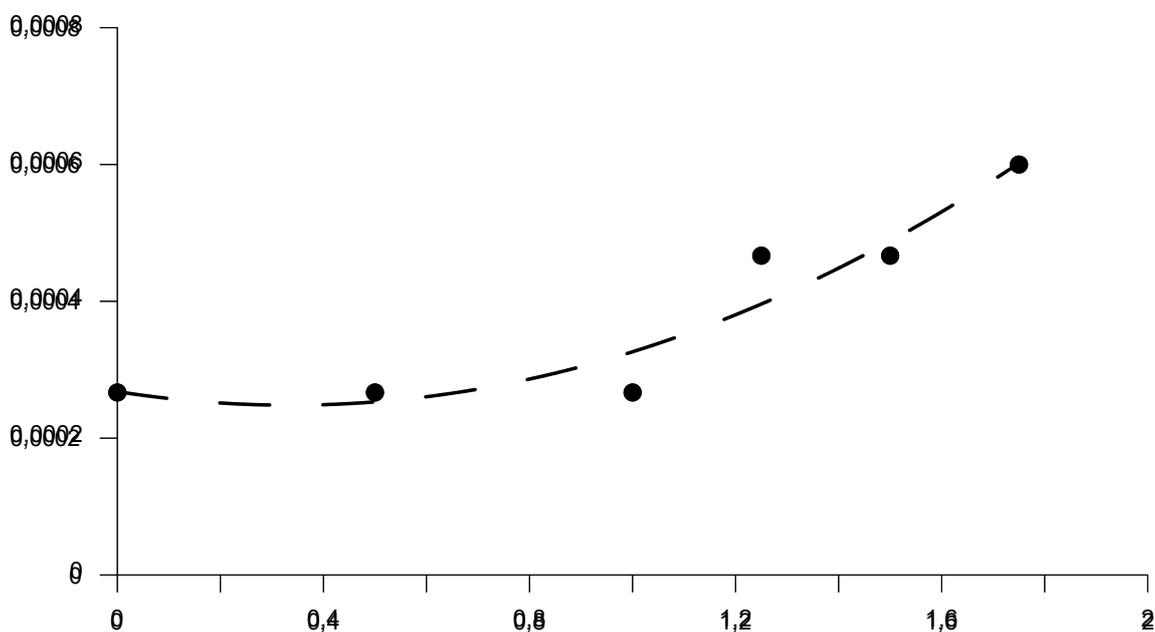


Рис. 11. Зависимость расхода горячей воды от частоты колебаний электромагнитного клапана.

### Заключение и выводы

Проведенные исследования показали, что колебания дельта-температуры горячей воды пропорциональны колебаниям дельта-

температуры холодной воды, которые, в свою очередь, зависят от частоты колебаний электромагнитного клапана. Наибольшая эффективность нагрева (наибольший коэффициент теплопередачи) воды наблюдается при частоте электромагнитного клапана 1,75 Гц. Расчет коэффициента теплопередачи показал, что при стационарном режиме течения коэффициент теплопередачи теплообменника-нагнетателя равен  $180 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$ . Затем с ростом частоты коэффициент теплопередачи плавно уменьшается и достигает минимума  $173 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$  при 1.0 Гц. При дальнейшем увеличении частоты коэффициент теплопередачи начинает увеличиваться и достигает максимума  $188 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$  при 1.75 Гц.

В результате эксперимента также установлено, что с ростом частоты расход в контуре горячей воды возрастает и достигает максимума на частоте 1.75 Гц  $Q = 0.6 \frac{\text{л}}{\text{сек}}$ . Т.е. при такой частоте теплообменник-нагнетатель за счет колебаний потока жидкости в первом контуре (контуре холодной воды) наиболее эффективно передает колебания потока во второй контур (контур горячей воды). Это можно использовать для уменьшения мощности насоса в контуре горячей воды на данной частоте.

Таким образом, использование лабораторной установки с оптимальными параметрами и на заданных частотах может приводить к уменьшению потребляемой мощности, т.е. позволяет увеличить энергоэффективность установки.

### Литература

1. Лобанов И.Е. Теория интенсифицированного теплообмена и эффективности его применения для перспективных компактных теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом

производстве // Альманах современной науки и образования. 2010. № 3(34). С. 24-42.

2. Чичиндаев, А. В. Тепломассообмен в компактных пластинчато-ребристых теплообменниках // Новосибирск. Изд-во НГТУ, 2009. 298 с.

3. Зиберт Г.К. Перспективные технологии и оборудование для подготовки и переработки углеводородных газов и конденсата // М.: Недра, 2005. 366 с.

4. Скобло А.И., Молоканов Ю.К., Владимиров А.И., Щелкунов В.А. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии // М.: Недра-Бизнес центр, 2000. 677 с.

5. Sarkar, M., Velusamy, K., Munshi, P., Singh, O. Analysis of flow and heat transfer through a partially blocked fuel subassembly of fast breeder reactor // Progress in Nuclear Energy. 2020. Vol. 118. DOI: 10.1134/S0040601519040049.

6. Lu X. Effect of flow regime on convective heat transfer in porous copper manufactured by lost carbonate sintering // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2019. Vol. 80. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.108482.

7. Левцев А.П., Кудашев С.Ф., Макеев А.Н., Лысяков А.И. Влияние импульсного режима течения теплоносителя на коэффициент теплопередачи в пластинчатом теплообменнике системы горячего водоснабжения // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2. С. 89-97.

8. Левцев А.П., Импульсные системы тепло- и водоснабжения: монография // Саранск: Издательство Мордов. Университета, 2015. 172 с.

9. Бажанов А.Г., Уездин А.В. Разработка схемы с пульсирующей циркуляцией жидкого теплоносителя в контуре пластинчатого теплообменника // Инженерный вестник Дона. 2024. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/9023

10. Бажанов А.Г., Бойков В.Е. Контур с пульсирующей циркуляцией жидкого теплоносителя для охлаждения масляного трансформатора //

---

Инженерный вестник Дона. 2023. №2. URL:  
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2023/8214.

11. Аксенов Б.Г. Экспериментальное исследование и математическая модель теплообменного аппарата со вставками из пористого металла // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Т. 6. № 2(22). С. 22-40. DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-2-22-40.

12. Фарахов Т.М. Моделирование температурных профилей и эффективности теплообменных аппаратов с интенсификаторами // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 2. С. 12-18.

### References

1. Lobanov I.E. Al'manah sovremennoj nauki i obrazovaniya. 2010. № 3(34). pp. 24-42.

2. Chichindaev, A. V. Teplomassoobmen v kompaktnyh plastinchatorebristyh teploobmennikah [Heat and mass transfer in compact plate-fin heat exchangers]. Novosibirsk. Izd-vo NGTU, 2009. 298 p.

3. Zibert G.K. Perspektivnye tekhnologii i oborudovanie dlya podgotovki i pererabotki uglevodorodnyh gazov i kondensata [Advanced technologies and equipment for the preparation and processing of hydrocarbon gases and condensate]. M.: Nedra, 2005. 366 p.

4. Skoblo A.I., Molokanov Yu.K., Vladimirov A.I., Shchelkunov V.A. Processy i apparaty neftegazopererabotki i neftekhimii [Processes and equipment for oil and gas refining and petrochemistry]. M.: Nedra-Biznes centr, 2000. 677 p.

5. Sarkar, M., Velusamy, K., Munshi, P., Singh, O. Progress in Nuclear Energy. 2020. Vol. 118. DOI: 10.1134/S0040601519040049.

6. Lu X. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2019. Vol. 80. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.108482.

---



7. Levcev A.P., Kudashev P.F., Makeev A.N., Lysyakov A.I. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. № 2. pp. 89-97.

8. Levcev A.P., Impul'snye sistemy teplo- i vodosnabzheniya: monografiya. [Impulse systems of heat and water supply: a monograph]. Saransk: Izdatel'stvo Mordov. Universiteta, 2015. 172 p.

9. Bazhanov A.G., Uezdin A.V. Inzhenernyj vestnik dona. 2024. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/9023](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/9023)

10. Bazhanov A.G., Bojkov V.E. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2023/8214](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2023/8214).

11. Aksenov B.G. Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika. 2020. T. 6. № 2(22). pp. 22-40. DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-2-22-40.

12. Farahov T.M. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki. 2020. T. 22. № 2. pp. 12-18.

**Дата поступления: 30.12.2024**

**Дата публикации: 25.02.2025**