



УДК 658.264

**А. К. КЛОЧКО, канд. техн. наук, доц. кафедры теплоэнергоснабжения
и вентиляции**

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Тел.: (916) 377-33-07; факс: (916) 377-33-07; эл. почта: klo4ko_aleksey@mail.ru

Ключевые слова: теплоснабжение, удельная тепловая нагрузка, теплообменный аппарат, эффективность применения теплообменника, коэффициент теплопередачи, характеристика теплообменного аппарата.

В статье приведен порядок испытаний тепловой мощности теплообменных аппаратов тепловых пунктов централизованных систем теплоснабжения. Проанализировано влияние отклонений в их работе на энергоэффективность систем теплоснабжения. Предложены расчетные зависимости и последовательность их применения для пересчета параметров работы теплообменников с испытательного на эксплуатационный режимы работы.

Введение

Современные системы теплоснабжения представляют собой совокупность технологически взаимосвязанных между собой источников теплоты, тепловых сетей и сооружений на них, а также систем теплопотребления [1–3]. Многообразие теплопотребляющего оборудования и различные требования к параметрам теплоносителя в нем (например, давление, температура и др.) приводят к практической невозможности подключения от одного централизованного источника тепловой энергии к теплосети всех систем теплопотребления без применения дополнительных технических устройств. Данными устройствами в системах теплофикации являются теплообменные аппараты, в которых осуществляется передача теплоты от теплоносителя с «высокими» параметрами к теплоносителю, циркулирующему в контуре системы теплопотребления.

Теплообменники являются ключевыми элементами, от качественной работы которых зависит энергоэффективность и надежность эксплуатации всей системы теплоснабжения.

Материалы и методы

При проектном конструировании теплообменных аппаратов задаются следующими исходными параметрами: расчетное количество тепла с учетом климатических норм [4–6], передающееся в теплообменнике; расчетные температуры теплоносителя на входе и выходе на стороне обоих контуров теплообменника [7–9]; расходы теплообменивающихся сред при расчетном режиме работы теплообменника; максимально допустимые потери давления в потоках теплоносителей.



В некоторых случаях к установке принимают теплообменные аппараты с несколько большей поверхностью нагрева:

- в случае применения кожухотрубных теплообменников общее количество последовательно устанавливаемых их секций принимается с округлением до ближайшего большего числа;
- при конструировании пластинчатого теплообменного аппарата программа расчета предлагает установить дополнительные пластины поверхности нагрева с увеличением количества параллельных каналов в потоках теплоносителей.

Резервирование поверхности нагрева приводит к тому, что фактические теплогидравлические характеристики установленного теплообменника будут несколько отличаться от их расчетных величин на основе принятых исходных данных для расчета теплообменника.

Определяющее влияние на отклонение от расчетных параметров теплообмена оказывает эксплуатационное загрязнение поверхности нагрева накипью, ржавчиной, маслянистой пленкой, теплопроводность которых в десятки раз меньше теплопроводности материала теплопередающей стенки теплообменника и снижает коэффициент теплопередачи k , ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$).

На начальном этапе загрязнения система количественного регулирования теплопередачи компенсирует потерю тепловой мощности путем увеличения расхода греющего теплоносителя, сопровождающегося повышением его температуры на выходе из теплообменника и снижением энергоэффективности его применения. Также загрязнение способствует росту не только термического, но и гидравлического сопротивления теплообменника с увеличением потребления электроэнергии сетевыми насосами при прокачке большего количества теплоносителя. При достижении критических значений сопротивлений наступает фаза технических ограничений поставок тепловой энергии потребителям.

При эксплуатации кожухотрубных теплообменных устройств с течением времени имеет место негерметичность поверхности нагрева, из-за чего происходит переток теплоносителя между теплообменывающимися потоками. Для восстановления целостности элементов поверхности нагрева производят «отглушку» (вывод из работы) теплообменных труб с уменьшением поверхности нагрева и снижением теплопроизводительности и энергоэффективности теплообменника. В результате коррозионных процессов и термической деформации элементов нарушается конструкция трубного пучка теплообменника, что снижает эффективность омывания его поверхности нагрева теплоносителем и уменьшает коэффициент теплопередачи и теплопроизводительность теплообменника.

Для своевременного выявления отклонений от расчетных режимов и параметров эксплуатации проводят испытания теплообменных устройств на теплопроизводительность. Рекомендуется проводить эти испытания и при вводе теплообменника в эксплуатацию после монтажа или капитального ремонта для фиксации его фактических начальных теплогидравлических характеристик.

Результаты исследований

Целью таких испытаний является определение максимальной фактической теплопроизводительности теплообменника и энергоэффективности его применения.

Теоретической основой для выполнения теплотехнических расчетов при испытаниях теплообменников являются [10–12]: уравнение теплового баланса



теплообменника; основное уравнение теплопередачи; уравнение массового расхода теплоносителя; уравнение характеристики теплообменного аппарата.

Благодаря предложенной профессором Е. Я. Соколовым [5, 13, 14] замене экспоненциальной зависимости разности температур теплообменывающихся сред на линейную функцию от максимальной разности температур теплоносителей на входе в теплообменное устройство, теплотехнические расчеты теплообменников существенно упрощаются и становится возможной аналитическая обработка результатов их испытаний, включая корректный пересчет показателей теплообмена с экспериментального на расчетный и эксплуатационный режимы работы с целью анализа фактического технического состояния теплообменника.

Для записи параметров теплоносителей в теплообменниках применяют следующие условные обозначения: τ_1 – температура греющего теплоносителя из тепловой сети на входе в теплообменник, $^{\circ}\text{C}$; τ_2 – то же на выходе из теплообменника в теплосеть, $^{\circ}\text{C}$; T_1 – температура нагреваемого теплоносителя на выходе из теплообменника в систему теплопотребления, $^{\circ}\text{C}$; T_2 – то же на входе в теплообменник из системы теплопотребления, $^{\circ}\text{C}$; G_r – расход греющего теплоносителя из тепловой сети на теплообменник, кг/час; G_h – расход нагреваемого теплоносителя из системы теплопотребления в теплообменник, кг/час; $Q_{t/o}$ – теплопроизводительность теплообменника, Вт.

Для обозначения фиксируемых или рассчитываемых параметров при различных режимах работы теплообменника применяют «верхний» индекс при основном условном обозначении:

- «и» – испытательный режим: любой текущий режим работы теплообменника, при котором параметры теплоносителей фиксируются измерительными приборами;
- «р» – расчетный режим: задаваемые входные параметры теплоносителей соответствуют условиям проектирования теплообменника [5], а выходные параметры и теплопроизводительность теплообменника рассчитываются;
- «э» – эксплуатационный режим: параметры нагреваемого теплоносителя, температура греющего теплоносителя на входе в теплообменник и его теплопроизводительность соответствуют проектным величинам, а расход и температура греющего теплоносителя после теплообменника рассчитываются [9];
- «п» – проектная величина при расчетном режиме.

Функциональные зависимости, применяемые в теплотехнических расчетах теплообменников, являются частью следующей методики.

1. Уравнение теплового баланса (тепловыми потерями пренебрегают):

$$Q_{t/o} = c \cdot G_r \cdot (\tau_1 - \tau_2) = c \cdot G_h \cdot (T_1 - T_2), \text{ Вт}, \quad (1)$$

где c – удельная массовая изобарная теплоемкость воды, $\text{kДж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$.

2. Максимальная разность температур теплоносителей на входе в теплообменник:

$$\nabla = \tau_1 - T_2, \text{ } ^{\circ}\text{C}. \quad (2)$$

3. Уравнение характеристики теплообменного аппарата:

$$Q_{t/o} = \varepsilon \cdot W_m \cdot \nabla, \text{ Вт}, \quad (3)$$

где $W_m = c \cdot G_m$, $\text{Вт}/^{\circ}\text{C}$ – меньший по величине водяной эквивалент одной из двух теплообменывающихся сред;

G_m – расход теплоносителя, кг/ч.

4. Среднелогарифмический температурный напор в теплообменнике:



$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4)$$

где Δt_6 , Δt_m – большая и меньшая разности температур двух теплоносителей на концах теплообменника, $^\circ\text{C}$.

5. Основное уравнение теплопередачи:

$$Q_{\text{T/o}} = k \cdot F \cdot \Delta t_{\text{cp}}, \text{ Вт}, \quad (5)$$

где k – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$;

F – площадь поверхности нагрева, м^2 .

6. Безразмерный параметр подогревателя Φ , отражающий единство его тепловых (k), конструктивных (F , схема присоединения) и гидравлических (W_1 , W_2) характеристик в его текущем состоянии:

$$\Phi = \frac{k \cdot F}{\sqrt{W_1 \cdot W_2}}, \quad (6)$$

где W_1 , W_2 – водяные эквиваленты теплообменяющихся сред, $\text{Вт}/^\circ\text{C}$.

7. Безразмерная удельная тепловая нагрузка противоточного водоводяного теплообменника ε (для расчетного режима):

$$\varepsilon = \frac{1}{0,35 \cdot \frac{W_m}{W_6} + 0,65 + \frac{1}{\Phi} \sqrt{\frac{W_m}{W_6}}} \leq 1, \quad (7)$$

где W_6 , $\text{Вт}/^\circ\text{C}$ – больший по величине водяной эквивалент одной из двух теплообменяющихся сред;

8. Условная тепловая нагрузка теплообменника Q^* при равенстве водяных эквивалентов греющего (W_h – искомая величина) и нагреваемого (W_3 – заданная величина) теплоносителей:

$$Q^* = \nabla \cdot W_3 \cdot \frac{\Phi}{1 + \Phi}, \text{ Вт}. \quad (8)$$

9. Определяем водяной эквивалент греющего теплоносителя:

– случай 1 ($Q_{\text{T/o}} > Q^*$), что соответствует $W_h > W_3$ (I-я ступень теплообменника ГВС смешанной схемы):

$$W_h = W_3 \cdot \frac{4 \cdot a^2 \cdot \Phi^2}{\left[-1 + \sqrt{1 + 4 \cdot a \cdot \Phi^2 \cdot \left(\frac{\nabla \cdot W_3}{Q_{\text{T/o}}} - b \right)} \right]^2}, \text{ Вт}/^\circ\text{C}, \quad (9a)$$

где $a = 0,35$, $b = 0,65$ – расчетные коэффициенты для противоточной схемы подключения теплообменников;

– случай 2 ($Q_{\text{T/o}} < Q^*$), что соответствует $W_h < W_3$ (сетевой водоподогреватель):

$$W_h = W_3 \cdot \frac{4 \cdot b^2 \cdot \Phi^2}{\left[-1 + \sqrt{1 + 4 \cdot b \cdot \Phi^2 \cdot \left(\frac{\nabla \cdot W_3}{Q_{\text{T/o}}} - a \right)} \right]^2}, \text{ Вт}/^\circ\text{C}; \quad (9b)$$

– случай 3 ($Q_{\text{T/o}} = Q^*$), что соответствует $W_h = W_3$ (теплообменник химически очищенной воды в котельной, II-я ступень теплообменника ГВС смешанной схемы).



10. Коэффициент теплопередачи и фактор загрязнения поверхности нагрева:

$$\frac{1}{k_3} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda} + R_f = \frac{1}{k_q} + R_f, \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}, \quad (10)$$

где k_3 – эксплуатационный коэффициент теплопередачи поверхности нагрева, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$;

α_1 – коэффициент теплоотдачи от греющего теплоносителя к разделяющей стенке, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$;

α_2 – коэффициент теплоотдачи от разделяющей стенки к нагреваемому теплоносителю, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$;

δ – толщина разделяющей теплопередающей стенки, м;

λ – коэффициент теплопроводности материала стенки, $\text{Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$;

k_q – коэффициент теплопередачи «чистой» поверхности нагрева, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$;

R_f – фактор загрязнения, или сопротивление теплопроводности отложений на поверхности нагрева теплообменника, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

11. Гидравлическое сопротивление теплообменника:

$$\Delta p = S \cdot G^2, \text{ Па}, \quad (11)$$

где S – сопротивление теплообменника, $\text{Па} \cdot \text{с}^2/\text{кг}^2$;

G – массовый расход теплоносителя через теплообменник, $\text{кг}/\text{с}$.

12. Показатель энергоэффективности «чистого» теплообменника:

$$E_q = \frac{\tau_1^n - \tau_2^n}{\tau_1^n - T_2^n}. \quad (12)$$

13. Снижение энергоэффективности теплообменника в процессе эксплуатации определяется по зависимости:

$$\Delta E = \frac{E_q - \varepsilon^3}{E_q} \cdot 100, \%, \quad (13)$$

Автором приводится уточненный порядок выполнения работ при испытаниях теплообменников на тепловую эффективность.

1. Стабилизация параметров теплоносителей за счет отключения из работы на период испытаний системы автоматического регулирования (САР) тепловой нагрузки теплообменника.

2. Снятие показаний измерительных приборов при работе теплообменника на фиксированной тепловой нагрузке (согласно схеме, представленной на рис. 1) и последующее включение в работу САР.

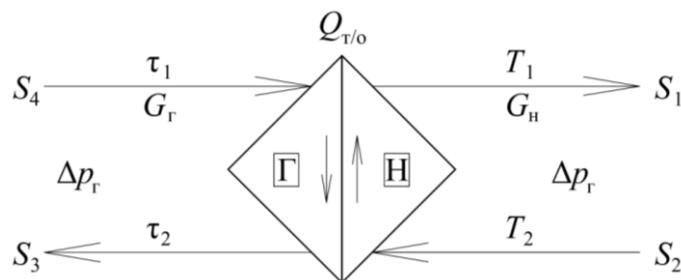


Рис. 1. Принципиальная схема испытываемого теплообменника и перечень основных фиксируемых или рассчитываемых параметров



2. Расчет основных технологических и термодинамических характеристик работы рассматриваемого теплообменника в соответствии с предложенным на рис. 2 алгоритмом (методикой).

3. Проведение анализа результатов испытаний и расчетов с последующей разработкой рекомендаций по эксплуатации.

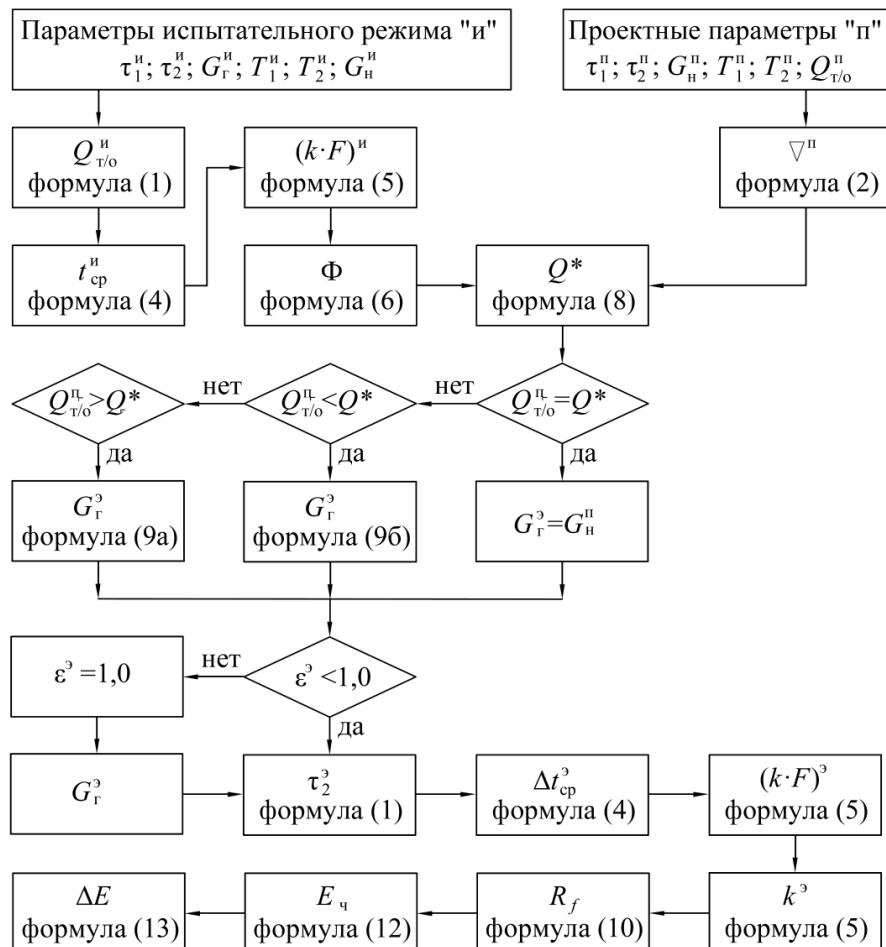


Рис. 2. Алгоритм (методика) расчета характеристик работы теплообменника

Заключение

В качестве выводов по проведенным численным исследованиям отметим, что предложенный порядок испытаний и расчетные зависимости применимы для водоводяных подогревателей всех конструкций и функционального назначения.

Перед проведением тепловых испытаний теплообменника в обязательном порядке следует провести его гидравлическое испытание на герметичность поверхности нагрева с целью исключения искажений исходных данных для расчетов из-за перетока теплоносителей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пермяков, К. В. Опыт модернизации подогревателей высокого давления для турбоустановок малой мощности / К. В. Пермяков, Т. П. Наревич, Е. В. Емельянов. – // Электрические станции. – 2024. – № 1 (1110). – С. 53–57. –



DOI 10.34831/EP.2024.1110.1.008.

2. Баранов, А. Е. Исследование работы энергонапряженных теплообменных аппаратов с большим количеством пластин / А. Е. Баранов, А. Е. Белов, Д. Н. Ильмов, В. А. Мавров. // Теплоэнергетика. – 2024. – № 6. – С. 34–48. – DOI 10.56304/S004036362406002X.

3. Лобанов, И. Е. Теоретическое аналитическое решение задачи о стационарном докритическом течении газообразного теплоносителя в разветвлениях трубопроводов теплообменных аппаратов / И. Е. Лобанов. // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 9 (82). – С. 25–35. – DOI 10.30987/article_5d9317b27868a4.78923465.

4. Исследование гидродинамики криволинейных каналов с интенсификаторами для теплообменного аппарата / А. В. Муравьев, Н. Н. Кожухов, А. А. Надеев, В. Ю. Дубанин // Энергосбережение и водоподготовка. – 2023. – № 4 (144). – С. 51–53.

5. Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети / Е. Я. Соколов – Москва : МЭИ, 2009. – 472 с. – ISBN 978-5-383-00337-4.

6. Лабинский, А. Ю. Оптимизация параметров теплообменных аппаратов с использованием генетического алгоритма / А. Ю. Лабинский // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). – 2021. – № 3 (39). – С. 32–38.

7. Maltsev, M. V. Laboratory-Scale Plant for Demonstration and Study of the Film Heat Exchanger Operation / M. V. Maltsev, V. V. Vlasov, N. N. Lobacheva // Components of Scientific and Technological Progress. – 2022. – № 2 (68). – Р. 5–7.

8. Короли, М. А. Анализ влияния накипеобразования на процесс теплопередачи в теплообменных аппаратах действующих котельных / М. А. Короли, О. Абдулаев. – // Приоритетные научные направления: от теории к практике. – 2016. – № 32-1. – С. 162–167.

9. Грачева, А. Д. Сравнение различных типов теплообменных аппаратов, использующихся в тепловых пунктах / А. Д. Грачева // Матрица научного познания. – 2024. – № 11-2. – С. 16–20.

10. Боброва, О. Д. Сравнение кожухотрубных и разборных пластинчатых теплообменников для использования в существующих тепловых пунктах / О. Д. Боброва, А. В. Гришкова // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2021. – Том 1. – С. 198–203.

11. Саввин, Н. Ю. Моделирование теплообменного процесса в оригинальном пластинчатом теплообменнике / Н. Ю. Саввин // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2023. – № 2 (25). – С. 37–46. – DOI 10.36622/VSTU.2023.41.58.004.

12. Моделирование теплообменного процесса в пластинчатом аппарате / Л. А. Кущев, В. Н. Мелькумов, В. П. Воронов, Н. Ю. Саввин // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2023. – № 2 (70). – С. 32–46. – DOI 10.36622/VSTU.2023.70.2.003.

13. Саввин, Н. Ю. Теплотехнические и гидродинамические исследования модифицированного пластинчатого теплообменника / Н. Ю. Саввин, Л. А. Кущев. – // Инженерные системы и сооружения. – 2023. – № 2(52). – С. 13–21.

14. Основы конструирования и расчета теплообменных аппаратов : учебное пособие / М. В. Бодров, В. П. Болдин, И. П. Грималовская, В. В. Сухов ; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2024. – 81 с. – ISBN 978-5-528-00602-4.

KLOCHKO Aleksey Konstantinovich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of heat and gas supply and ventilation

OPERATIONAL TESTS OF HEAT EXCHANGE APPARATUSES TO DETERMINE THEIR ENERGY EFFICIENCY



Moscow State University of Civil Engineering.
26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russia.

Tel.: (916) 377-33-07; fax: (916) 377-33-07; e-mail: klo4ko_aleksey@mail.ru

Key words: heat supply, specific heat load, heat exchanger, heat exchanger efficiency, heat transfer coefficient, heat exchanger characteristics.

The article describes the procedure for testing the thermal capacity of heat exchangers in centralized heating systems. It analyzes the impact of deviations in their operation on the energy efficiency of heating systems. The article proposes calculation equations and a sequence for converting the operating parameters of heat exchangers from test to operational modes.

REFERENCES

1. Permyakov K. V., Narevich T. P., Yemelyanov E. V. Opit modernizatsii podogrevateley visokogo davleniya dlya turboustanovok maloy moshchnosti [Experience of modernization of high-pressure heaters for low-power turbine installations]. Elektricheskiye stantsii [Electric stations]. 2024, № 1 (1110). P. 53–57. DOI 10.34831/EP.2024.1110.1.008.
2. Baranov A. E., Belov A. E., Ilmov D. N., Mavrov V. A. Issledovanie raboty energonapryazhennikh teploobmennikh apparatov s bolshim kolichestvom plastin [Investigation of the operation of energy-stressed heat exchangers with a large number of plates]. Teploenergetika [Heat and Power Engineering]. 2024, № 6, P. 34–48. DOI 10.56304/S004036362406002X.
3. Lobanov I. E. Teoreticheskoe analiticheskoe reshenie zadachi o statsionarnom dokriticheskem techenii gazoobraznogo teplonositelya v razvetvleniyakh truboprovodov teploobmennikh apparatov [Theoretical analytical solution of the problem of stationary subcritical flow of a gaseous coolant in the branches of pipelines of heat exchangers]. Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Bryansk State Technical University]. 2019, № 9 (82), P. 25–35. DOI 10.30987/article_5d9317b27868a4.78923465.
4. Muravyov A. V., Kozhukhov N. N., Nadeev A. A., Dubanin V. Yu. Issledovanie gidrodinamiki krivolineinikh kanalov s intensifikatorami dlya teploobmennogo apparata [Investigation of the hydrodynamics of curved channels with intensifiers for a heat exchanger]. Energosberezeniye i vodopodgotovka [Energy saving and water treatment]. 2023, № 4 (144), P. 51–53.
5. Sokolov E. Ya. Teplofikatsiya i teplovye seti [Heating and heating networks]: uchebnik dlya vuzov. Moscow, Izdatelskiy dom MEI, 2009, 472 p. ISBN 978-5-383-00337-4.
6. Labinsky A. Y. Optimizatsiya parametrov teploobmennikh apparatov s ispolzovaniem geneticheskogo algoritma [Optimization of parameters of heat exchangers using a genetic algorithm]. Prirodnyye i tekhnogeniye riski (fiziko-matematicheskiye i prikladnyye aspekty) [Natural and anthropogenic risks (physico-mathematical and applied aspects)]. 2021, № 3 (39), P. 32–38.
7. Maltsev M. V., Vlasov V. V., Lobacheva N. N. Laboratory-Scale Plant for Demonstration and Study of the Film Heat Exchanger Operation. Components of Scientific and Technological Progress. 2022, № 2 (68), P. 5–7.
8. Koroli M. A., Abdullaev O. Analiz vliyaniya nakipeobrazovaniya na protsess teploperedachi v teploobmennikh apparatakh deistvuyushchikh kotelnikh [Analysis of the effect of scale formation on the heat transfer process in heat exchangers of existing boiler houses]. Prioritetnyye nauchnyye napravleniya: ot teorii k praktike [Priority scientific directions: from theory to practice]. 2016, № 32-1, P. 162–167.
9. Gracheva A. D. Sravnenie razlichnykh tipov teploobmennikh apparatov, ispolzuyushchikhsya v teplovikh punktakh [Comparison of different types of heat exchangers



used in heating points]. Matritsa nauchnogo poznaniya [The matrix of scientific knowledge]. 2024, № 11-2, P. 16–20.

10. Bobrova O. D., Grishkova A. V. Sravnenie kozhukhotrubnikh i razbornikh plastinchatikh teploobmennikov dlya ispolzovaniya v sushchestvuyushchikh teplovikh punktakh [Comparison of shell-and-tube and collapsible plate heat exchangers for use in existing heating facilities]. Sovremennyye tekhnologii v stroitelstve. Teoriya i praktika [Modern technologies in construction. Theory and practice]. 2021, Vol. 1, P. 198–203.

11. Savvin, N. Y. Modelirovanie teploobmennogo protsessa v originalnom plastinchatom teploobmennike [Modeling of the heat exchange process in an original plate heat exchanger]. Zhilishchnoye khozyaystvo i kommunalnaya infrastruktura [Housing and communal infrastructure]. 2023, № 2 (25). P. 37–46. DOI 10.36622/VSTU.2023.41.58.004.

12. Kushchev L. A., Melkumov V. N., Voronov V. P., Savvin N. Yu. Modelirovanie teploobmennogo protsessa v plastinchatom apparate [Modeling of the heat exchange process in a plate apparatus]. Nauchny zhurnal stroitelstva i arkhitektury [Scientific Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, № 2 (70), P. 32–46. DOI 10.36622/VSTU.2023.70.2.003.

13. Savvin N. Y., Kushchev L. A. Teplotekhnicheskie i gidrodinamicheskie issledovaniya modifitsirovannogo plastinchatogo teploobmennika [Thermal engineering and hydrodynamic studies of a modified plate heat exchanger]. Nauchny zhurnal. Inzhenernye sistemy i sooruzheniya [Scientific Journal. Engineering systems and structures]. 2023, № 2 (52), P. 13–21.

14. Boldin V. P., Bodrov M. V., Grimalovskaya I. P. Sukhov V.V. Osnovy konstruirovaniya i raschyota teploobmennikh apparatov [Fundamentals of the design and calculation of heat exchangers]. NNGASU, Nizhny Novgorod, 2024, 81 p. ISBN 978-5-528-00602-4.

© А. К. Ключко, 2025

Получено: 12.11.2025 г.