

Разработка алгоритма расчета эффективности эксплуатации и ремонта пластинчатого теплообменника

Сергей Михайлович Чекардовский¹, Константин Николаевич Илюхин¹,
Андрей Александрович Мелехин², Михаил Николаевич Чекардовский¹

¹ Тюменский индустриальный университет (ТИУ); г. Тюмень, Россия;

² Научно-технический центр «Строительство и эксплуатация инженерных систем» (НТЦ «СЭИС»);
г. Мытищи, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность темы обусловлена определением эффективности проектирования и эксплуатации теплообменных аппаратов в результате развития цифровых технологий в науке и технике, в том числе после плановых и внеплановых ремонтов аппаратов. В настоящее время разработано много нормативной, учебной и методической документации. Проблемой является недостаточная достоверность определения эффективности теплообменных аппаратов.

Материалы и методы. Для решения проблемы разработан алгоритм расчета эффективности эксплуатации и ремонта пластинчатого теплообменника. Авторами созданы алгоритмы и программа в Microsoft Excel для проектного расчета теплообменника, включающего тепловой, конструкторский и гидравлический расчеты теплообменника, а также расчет эксергии проектируемого аппарата по данным программы проектного расчета теплообменника. В качестве реализации расчета эксергетического КПД пластинчатого теплообменника может быть применено веб-приложение ntcseis.ru на основе языка программирования Ukit.

Результаты. Выполнен проектный расчет пластинчатого теплообменника с помощью программы Microsoft Excel, включающий тепловой, конструкторский и гидравлический расчеты теплообменника. Осуществлен ручной расчет эксергии проектируемого аппарата в качестве решения прикладной задачи для определения эффективности проектируемого теплообменника. Разработано веб-приложение ntcseis.ru расчета эксергетического КПД пластинчатого теплообменника.

Выводы. В процессе выполнения работы поставлены и решены следующие задачи: рассчитаны тепловые, конструкторские и гидравлические параметры теплообменника на базе известной классической методики. Результаты расчета использовались для определения потерь эксергии проектируемого теплообменника с помощью рассчитанных значений среднелогарифмических температур и других параметров греющего и нагреваемого теплоносителей; потерь эксергии от теплообмена с окружающей средой, от конечной разности температур теплоносителей, от гидравлических сопротивлений в трактах теплоносителей; удельных термических эксергий теплоносителей на входе и выходе теплообменного аппарата; потока эксергии на входе и выходе аппарата; эксергетического коэффициента теплообменника. Разработано веб-приложение ntcseis.ru расчета эксергетического КПД пластинчатого теплообменника.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: алгоритм, эффективность, теплообменник, эксергия, расчет, проектируемые фактические параметры

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чекардовский С.М., Илюхин К.Н., Мелехин А.А., Чекардовский М.Н. Разработка алгоритма расчета эффективности эксплуатации и ремонта пластинчатого теплообменника // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 1. С. 84–93. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.1.84-93

Автор, ответственный за переписку: Андрей Александрович Мелехин, melehin2006@yandex.ru.

Development of algorithm for calculation of operation and repair efficiency of a plate heat exchanger

Sergey M. Chekardovsky¹, Konstantin N. Ilyukhin¹,
Andrey A. Melekhin², Mikhail N. Chekardovsky¹

¹ Industrial University of Tyumen (IUT); Tyumen, Russian Federation;

² Scientific and Technical Center "Construction and Operation of Engineering Systems";
Mytishchi, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the topic is due to the determination of the efficiency of the design and operation of heat exchangers as a result of the development of digital technologies in science and technology, including after scheduled and unscheduled repairs of devices. At the present time, a lot of normative, educational and methodological documentation has been developed. The problem is insufficient reliability of determination of efficiency of heat exchangers.

Materials and methods. To solve the problem, an algorithm for calculating the efficiency of operation and repair of a plate heat exchanger is developed. The authors have created algorithms and a programme in Microsoft Excel for the design calculation of the heat exchanger, including thermal, design and hydraulic calculations of the heat exchanger, as well as the calculation of exergy the designed apparatus according to the heat exchanger design calculation programme. The web application ntcseis.ru based on the Ukit programming language can be used as an implementation of the calculation of the exergy efficiency of a plate heat exchanger.

Results. Design calculation of a plate heat exchanger was performed using the Microsoft Excel programme, including thermal, design and hydraulic calculations of the heat exchanger. A manual calculation of the exergy of the designed apparatus was performed as a solution to an applied problem to determine the efficiency of the designed heat exchanger. The web application ntcseis.ru of calculation of exergy efficiency of a plate heat exchanger was developed.

Conclusions. In the process of the work, the following tasks were set and solved: thermal, design and hydraulic parameters of the heat exchanger were calculated on the basis of the well-known classical methodology. The calculation results were used to determine the exergy losses of the designed heat exchanger using the calculated values of the average logarithmic temperatures and other parameters of the heating and heated heat carriers; exergy losses from heat exchange with the environment, from the final temperature difference of heat carriers, from hydraulic resistances in the paths of heat carriers; specific thermal exergy of heat carriers at the inlet and outlet of the heat exchanger; exergy flow at the inlet and outlet of the apparatus; exergy coefficient of the heat exchanger. A web application ntcseis.ru of calculation of the exergy efficiency of a plate heat exchanger is developed.

KEYWORDS: algorithm, efficiency, heat exchanger, exergy, calculation, projected actual parameters

FOR CITATION: Chekardovsky S.M., Ilyukhin K.N., Melekhin A.A., Chekardovsky M.N. Development of algorithm for calculation of operation and repair efficiency of a plate heat exchanger. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(1):84-93. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.1.84-93 (rus.).

Corresponding authors: Andrey A. Melekhin, melehin2006@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день существует ряд нормативных документов для проектирования зарубежных промежуточных теплообменных аппаратов (ПТА), а также ничем не уступающих по эффективности отечественных кожухотрубчатых теплообменников (например, тонкостенные теплообменные аппараты интенсифицированные — ТТАИ, Россия) для тепловых пунктов.

При проектировании ПТА для инженерных расчетов принимается значение термического коэффициента, равное единице ($\eta_t = 1$), и уравнение теплового баланса превращается в уравнение, когда греющий теплоноситель столько отдает тепла, сколько его воспринимает нагреваемый теплоноситель, поступающий к потребителю. На самом деле такое уравнение не учитывает потери тепла в процессе теплообмена и гидравлических сопротивлений ПТА [1].

Показатели качества эксплуатации теплообменников:

- критерий оценки эффективности обслуживания теплообменного оборудования, η_r [2];
- эксергетический коэффициент, $\eta_{\text{экс}}$;
- критерий М.В. Кирпичева Э;
- показатель интенсивности эксплуатации теплообменника А.С. Горшенина;
- критерии материалоемкости и компактности [3];
- новый коэффициент рекуперации R [4];
- совершенствованная безразмерная удельная тепловая нагрузка аппарата [1];
- совершенствованное число единиц переноса теплоты [4].

Недостатки критериев эффективности:

- термический коэффициент η_t имеет ограниченную область применения;

- энергетический коэффициент Э М.В. Кирпичева с доработкой профессора В.М. Антупьева имеет различную энергетическую ценность (тепловая и электрическая энергия);

- на величину воспринятой теплоты влияет главным образом переданная теплота;

- утверждение, что на коэффициент теплоотдачи температурный напор не оказывает влияние, а следовательно, является универсальным, служит дискуссионным;

- критерий оценки интенсивности интенсификации ТА и критерий компактности направлены на технико-экономическую оценку ТА.

Указанные недостатки можно устранить, если в качестве универсальной использовать методику определения эксергии проектируемого и эксплуатируемого ТА по исходным данным как классического проектного расчета ТА, так и модернизированного расчета ТА [1, 4].

Дополнительная информация может быть получена с помощью:

- нового коэффициента рекуперации, полученного авторами [4]:

$$R = 1 - \frac{\Theta_m}{t_1 - \tau_1},$$

где Θ_m — среднелогарифмическая разность температур греющего (ГТ) и нагреваемого теплоносителей (НТ), °С; t_1 и τ_1 — температуры ГТ и НТ на входе в ТА, °С.

Для оценки эффективности работы ТА рекомендуется выполнить достоверный проектный расчет теплообменника, включающий тепловой, конструктивный и гидравлический расчеты [4].

Следует учесть, что поверочный расчет рекомендуется использовать при исследовании экс-

Результаты расчета ПТА по классической методике [4–8]

The results of the calculation of PTA according to the classical method [4–8]

| Исходные данные, пластина 0,6 Initial data, plate 0.6 | | | | Тепловой расчет Thermal calculation | | | |
|--|---------------------|---|---------------------------------|---|------------------------------|---|-----------|
| Q | 2 181 892 | Вт / W | 1 | t_b / t_v | 38,6 | °C | |
| M_1 | 109,15 | т/ч / t/h | 2 | ρ_1 | 990,71 | кг/м ³ / kg/ m ³ | |
| M_2 | 46,91 | т/ч / t/h | 3 | ν_1 | 7,32E-07 | м ² /с / m ² /s | |
| t_1 | 47,2 | °C | 4 | λ_1 | 0,6256 | Вт/м·K / W/(m·K) | |
| t_2 | 30 | °C | 5 | C_{p1} | 4190,081 | Дж/(кг·K) / J/(kg·K) | |
| τ_1 | 5 | °C | 6 | Pr_1 | 4,38515 | – | |
| τ_2 | 45 | °C | 7 | τ_b / τ_v | 25 | °C | |
| ΔP_1 | 41 000 | Па / Pa | 8 | ρ_2 | 995,39 | кг/м ³ / kg/ m ³ | |
| ΔP_2 | 92 000 | Па / Pa | 9 | ν_2 | 1,13E-06 | м ² /с / m ² /s | |
| K_{up} / K_{ac} | 1584 | Вт/(м ² ·K) W/(m ² ·K) | 10 | λ_2 | 0,60795 | Вт/м·K / W/(m·K) | |
| ξ_{1up} / ξ_{1ac} | 3,76 | – | 11 | C_{p2} | 4188,361 | Дж/(кг·°C) / J/(kg·K) | |
| d_3 / d_e | 0,0096 | м / m | 12 | Pr_2 | 6,4037 | – | |
| B | 28,8 | – | 13 | Pr_{ct} / Pr_{st} | 31,8 | – | |
| β | 0,84 | – | 14 | 2 185 104 | = | 2 183 067 | |
| δ | 0,001 | м / m | 15 | Θ_m | 9,381 | °C | |
| $\lambda_{ct} / \lambda_{st}$ | 16,3 | Вт/(м·°C) W/(m·°C) | 16 | ω_1 | 0,263 | м/с / m/s | |
| f_0 | 0,003 | м ² / m ² | 17 | Re_1 | 3448,7 | – | |
| F_1 | 0,6 | м ² / m ² | 18 | ξ_1 | 3,758 | – | |
| F_2 | 0,6 | м ² / m ² | 19 | Nu_1 | 69,146 | – | |
| L_{up} / L_{ac} | 0,836 | м / m | 20 | α_1 | 4506,2 | Вт/(м ² ·K) / W/(m ² ·K) | |
| $\xi_{шт} / \xi_p$ | 1,5 | – | 21 | ω_2 | 0,2498 | м/с / m/s | |
| D_y | 0,2 | м / m | 22 | Re_2 | 2130,85 | – | |
| T_0 | 293 | K | 23 | ξ_2 | 4,24 | – | |
| | | | 24 | Nu_2 | 62,97 | – | |
| | | | 25 | α_2 | 3987,8 | Вт/м ² ·K / W/(m ² ·K) | |
| | | | 26 | K | 1572,96 | Вт/м ² ·K / W/(m ² ·K) | |
| | | | 27 | F_a | 147,864 | м ² / m ² | |
| | | | | F_{pac} / F_c | 148 | м ² / m ² | |
| | | | | K_{pac} / F_c | 1573 | Вт/(м ² ·K) / W/(m ² ·K) | |
| Конструкторский расчет / Design calculation | | | | Гидравлический расчет / Hydraulic calculation | | | |
| 1 | f_1 | 0,11635 | м ² / m ² | 1 | ΔP_{1p} | 33 649 | Па / Pa |
| 2 | f_2 | 0,0524 | м ² / m ² | 2 | ΔP_{2p} | 80 217 | Па / Pa |
| 3 | m_1 | 38,783 | 39 | 3 | $\omega_{шт1} / \omega_{p1}$ | 0,97 | м/с / m/s |
| 4 | m_2 | 17,472 | 17 | 4 | $\omega_{шт2} / \omega_{p2}$ | 0,42 | м/с / m/s |
| 5 | n_1 | 78 | – | 5 | ΔP_{a1} | 33 649 | Па / Pa |
| 6 | n_2 | 34 | – | 6 | ΔP_{a2} | 80 217 | Па / Pa |
| 7 | $F_{n,r} / F_{n,g}$ | 46,8 | м ² / m ² | | | | |
| 8 | $F_{n,x} / F_{n,h}$ | 21,6 | м ² / m ² | | | | |
| 9 | X_1 | 3,1624 | 3 | | | | |
| 10 | X_2 | 7,255 | 7 | | | | |
| 11 | N_a | 247,667 | 248 | | | | |

платирующегося ТА, так как при проектировании ТА для обучения студентов в образовательных учреждениях результаты теплового расчета практически совпадают с результатами поверочного расчета [4, 5]. Поэтому необходимо использовать методику и алгоритм поверочного расчета ТА для исследования его эксплуатационного технического состояния.

В виде примера представлены результаты расчета в таблице [1, 4, 6–9].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для определения эксергетического коэффициента теплообменника, определяющего эффективность ПТА с учетом потерь теплоты (эксергии), предложен алгоритм, включающий параметры проектного расчета ПТА. Алгоритм расчета описан ниже.

Тепловые потери ПТА в закрытых помещениях при $\Delta t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ [3, 5], Вт:

$$Q_{\text{пот}} = a \cdot F \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где $F = 1,01 \cdot F_{\text{рас}}$, м^2 ; $F = 1,01 \cdot 148 = 149,48 \text{ м}^2$ (принято); $F_{\text{рас}} = 148 \text{ м}^2$ — расчетная поверхность ПТА (табл., раздел Тепловой расчет [4]); Δt — разность средних температур изоляции аппарата и окружающей среды, $^\circ\text{C}$ (принято $\Delta t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$); a — коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ [5]:

$$a = 9,74 + 0,07\Delta t = 10,44. \quad (2)$$

Значит: $Q_{\text{пот}} = 15\,597,36 \text{ Вт}$.

По заданным температурам теплоносителей (ТН) определяем среднелогарифмические (ср. лог) температуры ТН, К:

- греющего теплоносителя [4]:

$$T_{1\text{ср.лог}} = \frac{T_1' - T_1''}{\ln(T_1'/T_1'')}; \quad (3)$$

где $T_1' = t_1 + 273,15$ — температура входа ГТ ПТА; $T_1'' = t_2 + 273$ — температура выхода ГТ ПТА; t_1, t_2 и τ_1, τ_2 (табл., раздел Исходные данные, пластина 0,6 [4]).

- нагреваемого теплоносителя [4]:

$$T_{2\text{ср.лог}} = \frac{T_2'' - T_2'}{\ln(T_2'' - T_2')}; \quad (4)$$

где $T_2' = \tau_1 + 273$ — температура входа НТ ПТА; $T_2'' = \tau_2 + 273$ — температура выхода НТ ПТА.

Значит: $T_{1\text{ср.лог}} = 311,59 \text{ К}$; $T_{2\text{ср.лог}} = 297,62 \text{ К}$.

Потеря эксергии в окружающую среду [10, 11]:

$$D_{\text{о.с}} = Q_{\text{пот}} \frac{1 - T_0}{T_{1\text{ср.лог}}} + Q_{\text{пот}} \frac{1 - T_0}{T_{2\text{ср.лог}}}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{пот}} = 15\,597,36 \text{ Вт}$ — потери теплоты теплоносителей, Вт; $T_0, \text{К}$ — измеренная и осредненная температура окружающей среды в тепловом пункте (табл., раздел Исходные данные, пластина 0,6 [4]).

Так как принято $T_0 = 293,15 \text{ К}$, согласно литературе [10, 11], то:

$$D_{\text{о.с}} = 1157,62 \text{ Вт}.$$

Потеря эксергии от среднелогарифмической разности температур теплоносителей:

$$D_{\Delta T} = T_0 Q_{\text{тпн}} \left(\frac{1}{T_{2\text{ср.лог}}} - \frac{1}{T_{1\text{ср.лог}}} \right), \quad (6)$$

где $Q_{\text{тпн}}$ — тепловой поток, Вт (табл., раздел Исходные данные [4]):

$$Q_{\text{тпн}} = Q - Q_{\text{пот}} = 2\,166\,294,64 \text{ Вт}.$$

Значит: $D_{\Delta T} = 95\,666,13 \text{ Вт}$.

Удельная энтропия при изменении давления для жидкостей [11]:

$$\Delta S_{\Delta P_1} = \frac{-\beta_{r1}(P_1'' - P_1')}{\rho_1} \text{ или} \quad (7)$$

$$\Delta S_{\Delta P_1} = \frac{\beta_{r1}(P_1' - P_1'')}{\rho_1} = \beta_{r1} \cdot \frac{\Delta P_{1p}}{\rho_1}.$$

Потери эксергии от гидросопротивлений [11]:

$$D_{\Delta P_1} = T_0 M_1 \Delta S_{\Delta P_1} = T_0 M_1 + \beta_{r1} \cdot \frac{\Delta P_{1p}}{\rho_1}; \quad (8)$$

$$D_{\Delta P_2} = T_0 M_2 + \beta_{r2} \cdot \frac{\Delta P_{2p}}{\rho_2},$$

где $M_1 = 109,15 \text{ т/ч} = 30,3194 \text{ кг/с}$ — массовый расход ГТ (табл., раздел Исходные данные [4]); $M_2 = 46,91 \text{ т/ч} = 13,031 \text{ кг/с}$ — массовый расход НТ (табл., раздел Исходные данные [4]); $\Delta P_{1p} = 33\,649 \text{ Па}$ — расчетный перепад давления по ГТ, Па (табл., раздел Гидравлический расчет [4]); $\Delta P_{2p} = 80\,217 \text{ Па}$ — расчетный перепад давления по НТ, Па (табл., раздел Гидравлический расчет [4]); $\rho_1 = 990,71 \text{ кг/м}^3$ — средняя плотность ГТ (табл., раздел Тепловой расчет [4]); $\rho_2 = 995,39 \text{ кг/м}^3$ — средняя плотность НТ (табл., Тепловой расчет [4]); β_{r1} и β_{r2} — коэффициенты объемного (термического) расширения для ГТ и НТ, $1/\text{K}$ (табл. 1 [11]). Для расчетов принято $\beta_{r1} = \beta_{r2} = 4,22 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}$.

Температурное расширение воды характеризуется соответственным коэффициентом температурного расширения воды, β_t [11], и с увеличением давления коэффициент уменьшается.

Значит:

$$D_{\Delta P_1} = \frac{T_0 M_1 + \beta_{r1} \cdot \Delta P_{1p}}{\rho_1} = 8902,51 \text{ Вт};$$

$$D_{\Delta P_2} = 3820,07 \text{ Вт}.$$

Сумма потерь эксергии, Вт [12, 13]:

$$\Sigma D = D_{\text{о.с}} + D_{\Delta T} + (D_{\Delta P_1} + D_{\Delta P_2}), \quad (9)$$

где $D_{\text{о.с}}$ — потери эксергии от теплообмена с окружающей средой, Вт; $D_{\Delta T}$ — потери эксергии от конечной разности температур, Вт; $D_{\Delta P_1}$ и $D_{\Delta P_2}$ — потери эксергии от гидросопротивлений в трактах ГТ и НТ, Вт.

Значит: $\Sigma D = 109\,546,33 \text{ Вт}$.

По реальным результатам расчета ПТА (табл.) и расчета суммы потерь эксергии по уравнению (9) выполнили расчеты удельных термических эксергий теплоносителей (ТН) на входе ПТА.

В зависимости от:

- полных потоков эксергии ТН на входе $E_{\text{вх}}$, Вт;
- полной суммы потерь эксергии ΣD , Вт;
- теплообмена с окружающей средой D_{OC} , Вт;
- конечной разности температур $D_{\Delta T}$, Вт;
- гидравлических сопротивлений в трактах ГТ и НТ $D_{\Delta P1}$ и $D_{\Delta P2}$, Вт, определили эксергетический коэффициент аппарата $\eta_{\text{экс}}$.

Удельная термическая эксергия для воды [11, 14]:

$$e_i = C_{pi} (T_i - T_0) - T_0 \left[\ln C_{pi} \ln (T_i / T_0) - \frac{\beta_i \cdot \Delta P_i}{\rho_i} \right], \quad (10)$$

где C_{pi} — средняя теплоемкость компонента, Дж/(кг·К) (табл., Тепловой расчет [4]); T_i и T_0 — температуры компонента и окружающей среды, К (табл., Исходные данные, пластина 0,6 [4]); β_i — коэффициент объемного расширения, K^{-1} ; ΔP_i — перепад давления, Па (табл., Гидравлический расчет [4]); ρ_i — плотность теплоносителя, $\text{кг}/\text{м}^3$ (табл., Тепловой расчет [4]).

Для стандартных условий $T_0 = 293,15$ К и $P_0 = 101,325$ кПа [15].

Удельная термическая эксергия ГТ на входе ТА, Дж/кг [16]:

$$e'_1 = C'_{p1} (T'_1 - T_0) - T_0 \left[\ln C'_{p1} \ln (T'_1 / T_0) - \frac{\beta_{t1} \cdot \Delta P_{1p}}{\rho'_1} \right], \quad (11)$$

где $C'_{p1} = 4190,1$ Дж/(кг·К); $T'_1 = t_1 + 273,15 = 318,35$ К; $T_0 = 293,15$ К; $\beta_{t1} = 0,000422$ 1/К; $\Delta P_{1p} = 33\,649$ Па; $\rho'_1 = 990,71$ $\text{кг}/\text{м}^3$.

Значит: $e'_1 = 105\,393,1$ Дж/кг.

Удельная термическая эксергия НТ на выходе ТА [16], Дж/кг:

$$e'_2 = C'_{p2} (T'_2 - T_0) - T_0 \left[\ln C'_{p2} \ln (T'_2 / T_0) - \frac{\beta_{t2} \cdot \Delta P_{2p}}{\rho'_2} \right], \quad (12)$$

где $C'_{p2} = 4188,4$ Дж/(кг·К); $T'_2 = t_2 + 273,15 = 303,15$ К; $\beta_{t2} = 0,000422$ 1/К; $\Delta P_{2p} = 80\,217$ Па; $\rho'_2 = 995,39$ $\text{кг}/\text{м}^3$.

Значит: $e'_2 = 41\,807$ Дж/кг.

Поток эксергии на входе в ПТА, Вт [16, 17]:

$$E_{\text{вх}} = M_1 \cdot e'_1 + M_2 \cdot e'_2, \quad (13)$$

где $M_1 = 109,15$ т/ч = $30,3194$ кг/с — массовый расход ГТ (табл., Исходные данные [4]); $M_2 = 46,91$ т/ч = $13,031$ кг/с — массовый расход НТ (табл., Исходные данные [4]).

Значит: $E_{\text{вх}} = 3\,740\,239,52$ Вт.

Поток эксергии на выходе из аппарата, Вт:

$$E_{\text{вых}} = M_1 \cdot e''_1 + M_2 \cdot e''_2, \quad (14)$$

где e''_1 и e''_2 — удельные термические эксергии компонентов на выходе теплообменника соответственно, Дж/кг.

Существует уравнение расчета эксергетического коэффициента теплообменника [16–19]:

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{E_{\text{вых}} / E_{\text{вх}} (E_{\text{вх}} \cdot \Sigma D)}{E_{\text{вх}}} = 1 - (\Sigma D / E_{\text{вх}}), \quad (15)$$

где ΣD — сумма потерь эксергии, Вт (уравнение (9)).

Значит:

$$\eta_{\text{экс}} = 1 - (\Sigma D / E_{\text{вх}}), \quad (16)$$

где $\Sigma D = 109\,546,33$ Вт; $E_{\text{вх}} = 3\,740\,239,52$ Вт.

Итого эксергетический коэффициент теплообменника:

$$\eta_{\text{экс}} = 1 - (\Sigma D / E_{\text{вх}}) = 0,971.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве реализации расчета эксергетического КПД пластинчатого теплообменника может быть применено веб-приложение ntcseis.ru на основе языка программирования Ukit [20].

На рис. 1, 2 представлены исходные данные для расчета эксергетического КПД пластинчатого теплообменника в веб-приложении ntcseis.ru. Технические параметры расчета эксергетического КПД пластинчатого теплообменника переводятся в математические данные (A, C, D, \dots).

| | |
|---|---|
| A | F (площадь), м ² insulation surface area, m ² |
| C | дельта t, the temperature difference between the insulation of the apparatus, degrees |
| D | t1 (температура входа ГТ ПТА), град. inlet temperature GT PTA, degrees |
| E | t2 (температура выхода ГТ ПТА), град. outlet temperature GT PTA, degrees |
| F | T1 (температура входа НТ ПТА), град. inlet temperature NT PTA, degrees |
| G | T2 (температура выхода НТ ПТА), град. outlet temperature NT PTA, degrees |
| H | T0 (измеренная температура) K the measured ambient temperature, K |
| I | Q (общий тепловой поток), Вт Total heat flow according to the classical method, Wt |
| K | M1 (массовый расход ГТ), кг/с mass consumption GT, kg/s |
| L | M2 (массовый расход НТ), кг/с mass consumption NT, kg/s |
| M | ΔP1p (расчетный перепад давления по ГТ), Па calculated pressure drop according |
| N | ΔP2p (расчетный перепад давления по НТ), Па calculated pressure drop according |

Рис. 1. Исходные данные для расчета эксергетического КПД пластинчатого теплообменника в веб-приложении ntcseis.ru

Fig. 1. Initial data for calculating the exergetic efficiency of a plate heat exchanger in a web-application ntcseis.ru

| | | |
|----|---|---------------------------------|
| AJ | $\ln(t1/t2)$ (натуральный логарифм) | natural logarithm |
| AK | $\ln(T1/T2)$ (натуральный логарифм) | natural logarithm |
| O | q1 (плотность ГТ), кг/куб.м. | density GT , kg/m3 |
| P | q2 (плотность НТ), кг/куб.м. | density NT, kg/m3 |
| Q | b1 (коэффициент для ГТ), 1/К | the coefficient for G, 1/K |
| R | b2 (коэффициент для НТ), 1/К | the coefficient for NK, 1/K |
| S | Cp1 (теплоемкость компонента ГТ), Дж/кг*К | heat capacity of the GT, D/kg*K |
| AA | Cp2 (теплоемкость компонента НТ), Дж/кг*К | heat capacity of the NT, D/kg*K |
| Y | $\ln Cp1$ (натуральный логарифм Cp1) | the natural logarithm of Cp1 |
| AF | $\ln Cp2$ (натуральный логарифм Cp2) | the natural logarithm of Cp2 |
| Z | $\ln T1/T0$ (натуральный логарифм) | the natural logarithm |
| AG | $\ln t2/T0$ (натуральный логарифм) | the natural logarithm |

Рис. 2. Исходные данные для расчета эксергетического КПД пластинчатого теплообменника в веб-приложении ntseis.ru
Fig. 2. Initial data for calculating the exergy efficiency of a plate heat exchanger in a web-application ntseis.ru

| | |
|-----|--|
| R11 | Qтпп, heat, Watt I-J |
| R6 | Doc , Watt $R1 * (1 - R4 / R3) + R1 * (1 - R4 / R3)$ |
| R5 | a , W/sq.m.*K $9.74 + 0.07 * C$ |
| R4 | T2cp. logarithmic temperature , degre $((G + 273.15) + (F + 273.15)) / 2$ |
| R3 | T1cp. logarithmic temperature, degre $((D + 273.15) + (E + 273)) / 2$ |
| R1 | Qпотери , Вт thermal losses , Watt $A * R5 * C$ |

Рис. 3. Алгоритмы расчета эксергетического КПД пластинчатого теплообменника в веб-приложении ntseis.ru
Fig. 3. Algorithms for calculating the exergy efficiency of a plate heat exchanger in a web-application ntseis.ru

Расчет эксергетического КПД пластинчатого теплообменника
Calculation of the exergetic efficiency of the heat exchanger

F (площадь поверхности изоляции), кв.м.
Insulation surface area, m3
149.68

дельта t (разность температур изоляции аппарата и окружающей среды), град.
the temperature difference between the insulation of the apparatus and the environment, degrees
10

t1 (температура входа ГТ ПТА), град.
inlet temperature GT PTA, degrees
47.2

t2 (температура выхода ГТ ПТА), град.
outlet temperature GT PTA, degrees
30

T1 (температура входа НТ ПТА), град.
inlet temperature NT PTA, degrees
5

T2 (температура выхода НТ ПТА), град.
outlet temperature NT PTA, degrees
45

T0 (измеренная температура окружающей среды в тепловом пункте), К
the measured ambient temperature in the heating point, K
293.15

Q (общий тепловой поток по классической методике), Вт
total heat flow according to the classical method, Watt
2181892

M1 (массовый расход ГТ), кг/с
mass consumption GT, kg/s
30.3194

M2 (массовый расход НТ), кг/с
mass consumption NT, kg/s
13.031

VP1p (расчетный перепад давления по ГТ), Па
calculated pressure drop according to GT, Pa
33649

VP2p (расчетный перепад давления по НТ), Па
calculated pressure drop according to NT, Pa
80217

Ln (t1/t2) (натуральный логарифм)
natural logarithm
0.056

Ln (T1/T2) (натуральный логарифм)
natural logarithm
0.136

q1 (плотность ГТ), кг/куб.м.
density GT , kg/m3
990.71

q2 (плотность НТ), кг/куб.м.
density NT, kg/m3
995.39

b1 (коэффициент объемного (термического) расширения для ГТ), 1/К
the coefficient of volumetric (thermal) expansion for G, 1/K
0.000422

b2 (коэффициент объемного (термического) расширения для НТ), 1/К
the coefficient of volumetric (thermal) expansion for NK, 1/K
0.000422

Рис. 4. Фрагмент расчета КПД пластинчатого теплообменника в веб-приложении ntseis.ru
Fig. 4. Fragment of calculating the efficiency of a plate heat exchanger in a web-application ntseis.ru

| | |
|---|-----------|
| Q _{пот} (тепловые потери ПТА), Вт thermal losses of PTA, Watt | 15 606 |
| T _{Тср} (средняя логарифмическая разность температур входа и выхода ГТ ПТА), град. the average logarithmic temperature difference between the input and output of GT PTA, degrees | 312 |
| T _{2ср} (средняя логарифмическая разность температур выхода и входа НТ ПТА), град. the average logarithmic temperature difference between the input and output of NT PTA, degrees | 298 |
| α (суммарный коэффициент теплоотдачи лучевоспусканием и конвекцией), Вт/кв.м.*К total heat transfer coefficient by radiation and convection, W/sq.m.*K | 10.44 |
| Q _{ср} (потери теплоты в окружающую среду), Вт heat loss to the environment, Watt | 1 401 |
| Q _{стп} (тепловые потери), Вт heat losses, Watt | 2 181 892 |
| Q _{вт} (потери эксергии от конечной разности температур), Вт loss of exergy from a finite temperature difference, Watt | 96 312 |
| Q _{вп1} (поток потерь эксергии от гидравлических сопротивлений в тракте ГТ), Вт the flow of exergy losses from hydraulic resistances in the GT path, Watt | 8 888 |
| Q _{вп2} (поток потерь эксергии от гидравлических сопротивлений в тракте НТ), Вт the flow of exergy losses from hydraulic resistances in the NT path, Watt | 3 820 |
| Q _{сум} (сумма потерь эксергии), Вт the amount of exergy losses, Watt | 110 421 |

Рис. 5. Фрагмент расчета КПД пластинчатого теплообменника в веб-приложении ntceseis.ru

Fig. 5. Fragment of calculating the efficiency of a plate heat exchanger in a web-application ntceseis.ru

Далее теплотехнические зависимости по классической методике переводятся в математические алгоритмы. На рис. 3 приведены алгоритмы расчета эксергетического КПД пластинчатого теплообменника в веб-приложении ntceseis.ru.

На рис. 4, 5 представлена реализация расчета КПД пластинчатого теплообменника в веб-приложении ntceseis.ru. Расчет в веб-приложении позволил сократить время расчета при изменении различных параметров и оценить эксергетический КПД пластинчатого теплообменника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с цифровизацией при решении проблем в системе теплоснабжения по определению технического состояния теплообменных аппаратов тепловых пунктов разработан алгоритм расчета эффективности эксплуатации и ремонта теплообменников. В состав алгоритма входят уравнения классического теплового, конструкторского и гидравлического расчетов теплообменников, вошедшие в программу расчета Microsoft Excel (пример результатов расчета приведен в таблице). Представленный алгоритм расчета может быть трансформирован в любом программном средстве. В процессе исследования авторами определены и разработаны: результаты классического проектного расчета ТА; результаты расчета использовались для установления потерь эксергии проектируемого теплообменника с помощью рассчитанных значений параметров греющего и нагреваемого теплоносителей при классическом тепловом, конструкторском и гидравлическом расчете; разработано веб-приложение ntceseis.ru расчета эксергетического КПД ПТА на основе языка программирования Ukit.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mota F.A.S., Carvalho E.P., Ravagnani M.A.S.S. Modeling and design of plate heat exchanger // Heat Transfer Studies and Applications. 2015. DOI: 10.5772/60885
2. Чабарева Ю.А., Булеков А.П., Сажин В.Б., Попов И.А., Беднякова А.А. Критерии эффективности теплообменников // Успехи в химии и химической технологии. 2012. Т. 26. № 5 (134). С. 112–115. EDN RCCGWP.
3. Столяренко В.И., Жерносек С.В., Ольшанский В.И., Марущак А.С., Мовсесян В.Ю. Исследование эффективности пластинчатого теплообменника // Материалы и технологии. 2020. № 1 (5). С. 33–38. DOI: 10.24412/2617-149X-2020-1-33-38. EDN DPUCLA.
4. Чекардовский М.Н., Илюхин К.Н., Чекардовский С.М., Харламова Н.А. Проектирование и исследование теплообменных аппаратов : учебное пособие. Тюмень, 2015. 124 с. EDN TXLIMB.
5. Мазо А.Б. Основы теории и методы расчета теплопередачи : учебное пособие. Казань, 2013. 144 с.
6. Savvin N.Yu., Kushchev L.A., Alifanova A.I. Modern methods of intensification of heat exchange processes in plate apparatuses // IOP Conference Series: Materi-

als Science and Engineering. 2020. Vol. 945. Issue 1. P. 012001. DOI: 10.1088/1757-899x/945/1/012001

7. Cai H., Su L., Liao Y., Weng Z. Numerical and experimental study on the influence of top bypass flow on the performance of plate fin heat exchanger // Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 146. Pp. 356–363. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.10.007

8. Sventitskiy I. The logical-mathematical analysis for substantiation of efficiency of heat pumps and refrigerators // Research in Agricultural Electric Engineering. 2015. No. 4. Pp. 138–142. EDN VLQYXT.

9. Prathyusha B.G.R. Numerical investigation on shell, tube heat exchanger with segmental and helix baffles // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. 2018. Vol. 8. Issue 3. Pp. 183–192. DOI: 10.24247/ijmperdjun201821

10. Serth R.W., Lestina T. Process heat transfer. 2nd ed. Principles, Applications and Rules of Thumb. Oxford, UK : Elsevier, 2014.

11. Загорный С.В., Наумчик И.В., Дзитоев М.С., Михайленко А.В. Эксергетический анализ элементов

систем термостатирования // Труды МАИ. 2021. № 121. С. 11. DOI: 10.34759/trd-2021-121-11. EDN HNCRDP.

12. Кирюшатов А.И., Катков Д.С. Оценка термодинамической эффективности теплонасосных установок // Аграрный научный журнал. 2015. № 10. С. 39–41. EDN ULZYIV.

13. Chehade G., Dincer I. Exergy analysis and assessment of a new integrated industrial based energy system for power, steam and ammonia production // Energy. 2019. P. 116277. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2019.116277

14. Нечитайлов В.В. Теплоэнергетические системы и энергетические балансы промышленных предприятий. Часть 2. Энергетические балансы промышленных предприятий : учебное пособие. СПб. : ВШТЭСБГУПТД, 2023. 75 с.

15. Russo J., Akahane K., Tanaka H. Water-like anomalies as a function of tetrahedrality // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2018. Vol. 115. Issue 15. DOI: 10.1073/pnas.1722339115

16. Зыков С.В. Эксергетическая оптимизация режимов работы ТЭЦ : дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск : НГТУ, 2017. 114 с.

17. Александров А.А. Эксергия термодинамических систем // Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок. URL: <http://tw.t.mpei.ac.ru/ТТНВ/2/Aleksandrov/Chapter-6/6-1.pdf>

18. Chekardovskiy M.N., Chekardovskiy S.M., Chekardovskaya I.A. Evaluation development method of production efficiency level // Asia Life Sciences. 2019. № 1. Pp. 527–538. EDN AZSTVO.

19. Rashidi J., Yoo C. Exergy, exergo-economic, and exergy-pinch analyses (EXPA) of the kalina power-cooling cycle with an ejector // Energy. 2018. Vol. 155. Pp. 504–520. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2018.04.178

20. Мелехин А.А. Разработка технико-экономических алгоритмов расчета для калькуляторов инженерных систем : монография. М. : Издательство МИСИ – МГСУ, 2021.

Поступила в редакцию 11 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 21 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 29 октября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Сергей Михайлович Чекардовский — кандидат технических наук, доцент кафедры транспорта углеводородных ресурсов (ТУР), Институт транспорта; Тюменский индустриальный университет (ТИУ); 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; РИНЦ ID: 471357, Scopus: 57190858464, ResearcherID: T-2928-2017, ORCID: 0000-0001-9303-5648; ldgtd@mail.ru;

Константин Николаевич Илюхин — кандидат технических наук, доцент кафедры инженерных систем и сооружений (ИСИС), Строительный институт; Тюменский индустриальный университет (ТИУ); 625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, д. 2а; РИНЦ ID: 331663, Scopus: 6505533163, ResearcherID: B-9075-2016, ORCID: 0000-0001-9856-6915; iljuhinkn@tyuiu.ru;

Андрей Александрович Мелехин — кандидат технических наук, доцент, генеральный директор; Научно-технический центр «Строительство и эксплуатация инженерных систем» (НТЦ «СЭИС»); 141006, Московская область, г. Мытищи, ул. Разведчика Абеля, д. 5; РИНЦ ID: 663785, Scopus: 57191952249, ResearcherID: N-3616-2016; melehin2006@yandex.ru;

Михаил Николаевич Чекардовский — доктор технических наук, доцент кафедры инженерных систем и сооружений (ИСИС), Строительный институт; Тюменский индустриальный университет (ТИУ); 625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, д. 2а; РИНЦ ID: 471356, Scopus: 57192297387, ResearcherID: C-3414-2019, ORCID: 0000-0002-7166-1936; chekardovskijmn@tyuiu.ru.

Вклад авторов:

Чекардовский С.М. — определение параметров теплообменных аппаратов при проектировании и эксплуатации в результате развития цифровых технологий в науке и технике, в том числе после плановых и внеплановых ремонтов аппаратов.

Илюхин К.Н. — анализ нормативной, учебной и методической документации по определению эффективности ТА.

Мелехин А.А. — создание программы расчета эксергетического КПД пластинчатого теплообменника в веб-приложении ntseis.ru.

Чекардовский М.Н. — научное руководство, участие в разработке алгоритма расчета эффективности эксплуатации и ремонта пластинчатого теплообменника, корректировка расчетов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Mota F.A.S., Carvalho E.P., Ravagnani M.A.S.S. Modeling and design of plate heat exchanger. *Heat Transfer Studies and Applications*. 2015. DOI: 10.5772/60885

2. Chabaeva Yu.A., Bulekov A.P., Sazhin V.B., Popov I.A., Bednyakova A.A. Criteria for the efficiency of heat exchangers. *Successes in chemistry and chemi-*

cal technology. 2012; 26(5):112-115. EDN RCCGWP. (rus.).

3. Stolyarenko V., Zhernosek S., Olshansky V., Marushchak A., Movsesyan V. Development of research methods for performance properties of composite layered materials. *Materials and Technologies*. 2020; 1(5):33-38. DOI: 10.24412/2617-149X-2020-1-33-38. EDN DPUCLA. (rus.).

4. Chekardovsky M.N., Ilyukhin K.N., Chekardovsky S.M., Kharlamova N.A. *Design and research of heat exchangers : textbook for students*. Tyumen, 2015; 124. EDN TXLIMB. (rus.).

5. Mazo A.B. *Fundamentals of theory and methods of calculation of heat transfer : textbook*. Kazan, 2013; 144. (rus.).

6. Savvin N.Yu., Kushchev L.A., Alifanova A.I. Modern methods of intensification of heat exchange processes in plate apparatuses. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 945(1):012001. DOI: 10.1088/1757-899x/945/1/012001

7. Cai H., Su L., Liao Y., Weng Z. Numerical and experimental study on the influence of top bypass flow on the performance of plate fin heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 2019; 146:356-363. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.10.007

8. Sventitskiy I. The logical-mathematical analysis for substantiation of efficiency of heat pumps and refrigerators. *Research in Agricultural Electric Engineering*. 2015; 4:138-142. EDN VLQYXT.

9. Prathyusha B.G.R. Numerical Investigation on Shell, Tube Heat Exchanger with Segmental and Helix Baffles. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2018; 8(3):183-192. DOI: 10.24247/ijmperdjun201821

10. Serth R.W., Lestina T. *Process Heat Transfer. 2nd Edition, Principles, Applications and Rules of Thumb*. Oxford, UK, Elsevier, 2014.

Received September 11, 2023.

Adopted in revised form on October 21, 2023.

Approved for publication on October 29, 2023.

B I O N O T E S : **Sergey M. Chekardovsky** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Institute of Transport; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Volodarsky st., Tyumen, 625000, Russian Federation; ID RSCI: 471357, Scopus: 57190858464, ResearcherID: T-2928-2017, ORCID: 0000-0001-9303-5648; ldgtd@mail.ru;

Konstantin N. Ilyukhin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Systems and Structures, Construction Institute; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 2a Lunacharsky st., Tyumen, 625001, Russian Federation; ID RSCI: 331663, Scopus: 6505533163, ResearcherID: B-9075-2016, ORCID: 0000-0001-9856-6915; iljuhinkn@tyuiu.ru;

Andrey A. Melekhin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, general director; **Scientific and Technical Center “Construction and Operation of Engineering Systems”**; 5 Scout Abel st., Moscow region, Mytishchi, 141006, Russian Federation; ID RSCI: 663785, Scopus: 57191952249, ResearcherID N-3616-2016; melehin2006@yandex.ru;

Mikhail N. Chekardovsky — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Systems and Structures, Construction Institute; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 2a Lunacharsky st., Tyumen,

11. Zagornyj S.V., Naumchik I.V., Dzitoev M.S., Mihaylenko A.V. Exergetic analysis of elements of thermostating systems. *Proceedings of MAI*. 2021; 121:11. DOI: 10.34759/trd-2021-121-11. EDN HNCRDP. (rus.).

12. Kiryushatov A.I., Katkov D.S. Evaluation of the thermodynamic efficiency of heat-pump systems. *The Agrarian Scientific Journal*. 2015; 10:39-41. EDN ULZYIV. (rus.).

13. Chehade G., Dincer I. Exergy analysis and assessment of a new integrated industrial based energy system for power, steam and ammonia production. *Energy*. 2019; 116277. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2019.116277

14. Nechitailov V.V. Thermal power systems and energy balances of industrial enterprises. Part 2. *Energy balances of industrial enterprises : studies manual*. St. Petersburg, VSHTESPBGUPTD, 2023; 75. (rus.).

15. Russo J., Akahane K., Tanaka H. Water-like anomalies as a function of tetrahedrality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2018; 115(15). DOI: 10.1073/pnas.1722339115

16. Zykov S.V. *Exergetic optimization of CHPP operation modes*. Novosibirsk, NSTU, 2017; 114. (rus.).

17. Alexandrov A.A. Exergy of thermodynamic systems. *Thermodynamic bases of cycles of thermal power plants*. URL: <http://twf.mpei.ac.ru/TTHB/2/Aleksandrov/Chapter-6/6-1.pdf> (rus.).

18. Chekardovskiy M.N., Chekardovskiy S.M., Chekardovskaya I.A. Evaluation development method of production efficiency level. *Asia Life Sciences*. 2019; 1:527-538. EDN AZSTVO.

19. Rashidi J., Yoo C. Exergy, exergo-economic, and exergy-pinch analyses (EXPA) of the Kalina power-cooling cycle with an ejector. *Energy*. 2018; 155:504-520. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2018.04.178

20. Melekhin A.A. *Development of technical and economic calculation algorithms for calculators of engineering systems : monograph*. Moscow, MISI – MGSU Publishing House, 2021. (rus.).

625001, Russian Federation; ID RSCI: 57192297387, ResearcherID: C-3414-2019, ORCID: 0000-0002-7166-1936; chekardovskijmn@tyuiu.ru.

Contribution of the authors:

Sergey M. Chekardovsky — determination of the parameters of heat exchangers (HE) during design and operation as a result of the development of digital technologies in science and technology, including after planned and unscheduled repairs of devices.

Konstantin N. Ilyukhin — analysis of normative, educational and methodological documentation for determining the effectiveness of HE. Due to the insufficient reliability of determining the efficiency of heat exchangers.

Andrey A. Melekhin — creation of a program for calculating the exergetic efficiency of a plate heat exchanger in a web application ntcseis.ru.

Mikhail N. Chekardovsky — scientific guidance, participation in the development of an algorithm for calculating the efficiency of operation and repair of a plate heat exchanger; correction of calculations.

The authors declare that there is no conflict of interest.