

Тепловой режим в каналах пластинчатых теплообменных аппаратов

Ю. В. Елистратова ¹ ✉, А. С. Семиненко ¹, В. А. Уваров ¹, В. А. Минко ¹

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
ул. Костюкова, д. 46, г. Белгород 308012, Российская Федерация

✉ e-mail: tg.v.info@mail.ru

Резюме

Оснащение тепловых пунктов теплообменным оборудованием с поверхностью нагрева в виде гофрированных пластин является неотъемлемым структурным элементом теплоэнергетической сети 3-го поколения и составляющей надежности работы системы теплоснабжения в целом. Установлено, что проведение оптимизационных расчетов теплообменных аппаратов указанного типа затруднено ввиду отсутствия зависимостей по теплообмену и гидравлическому сопротивлению между каналами в конструктивном пространстве теплообменника.

Цель исследования. Уточнить методику расчета пластинчатых теплообменных аппаратов, исключая равенство тепловых и гидравлических условий из общепринятых допущений.

Методы. Методология исследования базируется на использовании закона сохранения масс с целью определения температурных параметров рабочих жидкостей в каждом канале. Решение данной задачи предложено в виде системы уравнений, каждое из уравнений характеризует тепловой баланс рассматриваемого канала. Построена компьютерная модель теплообменного аппарата с целью проведения численного исследования теплового режима теплообменника.

Результаты. Указано, что в качестве допущения в общеизвестной математической модели расчета теплового режима теплообменника пластинчатого типа принято условие равного распределения потоков жидкости между каналами. Такое ограничение приводит к уравниванию температур жидкости в каждом канале. Учет геометрического расположения каналов устанавливает превышение конечной температуры греющего и нагреваемого теплоносителя в первом и последнем каналах по отношению к известным данным до 10%. Результаты исследования подтверждают гипотезу о неравномерном нагреве теплоносителя по длине пакета пластин из-за неравномерности потокораспределения между каналами.

Заключение. Полученные результаты аналитического и численного моделирования свидетельствуют о существенном влиянии геометрического расположения на тепловой режим в каналах. Сформулированное математическое описание температурного режима с учетом гидравлических условий распределения потоков между каналами рекомендуется использовать при совершенствовании конструктивных параметров теплообменных аппаратов пластинчатого типа.

Ключевые слова: энергоэффективность; пластинчатые теплообменные аппараты; тепло-гидравлические; поверхность теплообмена; потокораспределение; численные исследования.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Исследования проводились в рамках Гранта Президента Российской Федерации для ведущей научной школы № НШ-25.2022.4 с использованием оборудования Центра высоких технологий Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова.

Для цитирования: Тепловой режим в каналах пластинчатых теплообменных аппаратов / Ю. В. Елистратова, А. С. Семенов, В. А. Уваров, В. А. Минко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(4): 22-38. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-22-38>.

Поступила в редакцию 10.08.2022

Подписана в печать 03.10.2022

Опубликована 14.10.2022

Thermal Condition in the Channels of Plate Heat Exchangers

Yulia V. Elistratova ¹✉, Artem S. Seminenko ¹, Valery A. Uvarov ¹,
Vsevolod A. Minko ¹

¹ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
46 Kostyukova str., Belgorod 308012, Russian Federation

✉ e-mail: tgv.info@mail.ru

Abstract

Equipping heat points with plate-type heat exchangers is an integral structural element of the 3rd generation heat and power network and a component of the reliability of the heat supply system as a whole. It has been established that the optimization calculations of heat exchangers of this type are difficult due to the absence of dependences on heat transfer and hydraulic resistance between the channels in the structural space of the heat exchanger.

Purpose of research. *To clarify the method of calculating plate heat exchangers, excluding the equality of thermal and hydraulic conditions from the generally accepted assumptions.*

Methods. *The research methodology is based on the use of the law of conservation of mass in order to determine the temperature parameters of working fluids in each channel. The solution of this problem is proposed in the form of a system of equations, each of the equations of which characterizes the thermal balance of the channel under consideration. A computer model of the heat exchanger is constructed in order to conduct a numerical study of the thermal regime of the heat exchanger.*

Results. *It is indicated that as an assumption in the well-known mathematical model for calculating the thermal regime of a plate-type heat exchanger, the condition of equal distribution of fluid flows between channels is accepted. This restriction leads to equalization of liquid temperatures in each channel. Taking into account the geometric arrangement of the channels, the excess of the final temperature of the heating and heated coolant in the first and last channels with respect to known data is up to 10%. The results of the study confirm the hypothesis of uneven heating of the coolant along the length of the plate package due to the uneven flow distribution between the channels.*

Conclusion. *The results of analytical calculation and modeling in the SolidWorks environment of the temperature regime in the channels of a plate-type heat exchanger indicate a significant influence of the geometric arrangement on the thermal regime in the channels. The formulated provisions of the mathematical description of the unevenness*

of the thermal regime of heat exchange channels, taking into account the location of the plates, are recommended to be used when improving the design parameters of plate-type heat exchangers.

Keywords: energy efficiency; plate heat exchangers; heat-hydraulic; heat exchange surface; flow distribution; numerical studies.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Financing: The research was carried out within the framework of the Grant of the President of the Russian Federation for the leading scientific school No. NSH-25.2022.4 using the equipment of the High Technology Center of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

For citation: Elistratova Y. V., Seminenko A. S., Uvarov V. A., Minko V. A. Thermal Condition in the Channels of Plate Heat Exchangers. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(4): 22-38 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-22-38>.

Received 10.08.2022

Accepted 03.10.2022

Published 14.10.2022

Введение

Системы теплоснабжения РФ являются самыми масштабными во всем мире и по большей части функционируют на принципах централизованного производства тепловой энергии, использование которой осуществляется за счет распределительных узлов [1-4]. Повышение технико-экономических показателей работы сети теплоснабжения осуществляется за счет реконструкции оборудования и отдельных участков, проведения теплоизоляционных работ, мероприятий по обеспечению учета потребления тепла, устройство теплообменных аппаратов и т.д. [5-7].

На основании ФЗ № 190-ФЗ от 27 июля 2010 г. «О теплоснабжении» эксплуатацию систем горячего водоснабжения всех объектов нового строительства необходимо осуществлять по закрытой схеме. Такое ограничение предвещает увеличение общей доли применения водонагревателей в области теплоснабжения.

Наиболее востребованными теплообменными аппаратами, используемыми в сфере теплоснабжения, являются кожухотрубные и пластинчатые теплообменники [6-9]. Преимущественное использование именно пластинчатого теплообменного оборудования по отношению к кожухотрубному объясняется компактностью их конструкции (по габаритным размерам) и высокой тепловой эффективностью [10,11]. В то же время относительно близкий уровень востребованности кожухотрубных теплообменников [7,10,11,12], формирует понимание того, что пластинчатые теплообменные аппараты далеко несовершенны в своем исполнении и требуют дополнительного улучшения собственных эксплуатационных характеристик [13-15].

Снижение энергоёмкости энергетического комплекса является актуальным направлением в развитии области теплоснабжения [16-21], поэтому актуальность исследований, направленных на повышение энергетической эффектив-

ности пластинчатых теплообменных аппаратов не вызывает сомнений.

Наличие широкой номенклатуры пластинчатых аппаратов, представляемой фирмами-изготовителями, затрудняет проведение исследований по изучению теплообменных процессов и поиска решений в совершенствовании конструкций оборудования. Это обусловлено отсутствием зависимостей, описывающих тепловой и гидравлический режим в явной форме.

Поэтому проведение оптимизационных расчетов на основании математического описания теплового и гидравлического режимов в каналах теплообменного аппарата имеет множество допущений, что снижает степень валидности расчетной модели¹ [22].

Общепринятая методика расчета пластинчатых теплообменников [23], основана на положениях теплового баланса и уравнении теплопередачи. Теплогидродинамические процессы пластинчатых теплообменников описываются эмпирическими уравнениями подобия. Ключевым допущением в расчетах является пренебрежение неравномерностью расходов теплоносителей в транзитных коллекторах по отдельным каналам, что теоретически уравнивает гидравлические условия и формирование температурного режима по длине пластинного пакета.

¹ Юркина М.Ю. Совершенствование теплообменных аппаратов водяных систем теплоснабжения повышением энергетической эффективности: дис. ... канд. техн. наук.: 05.14.04. М., 2009. 180 с.

В работе [9] использован метод характеристик сопротивления для расчета гидродинамических условий распределения потоков жидкости в теплообменном аппарате. Результаты расчетов позволили определить зависимость распределения потоков жидкости между каналами в аппарате, учитывая взаимное расположение. Итоги исследования доказывают влияние конструктивных особенностей аппарата на распределение расходов жидкости между каналами, что в свою очередь предполагает различный температурный режим по длине пакета пластин.

Цель работы: Уточнить методику расчета пластинчатых теплообменных аппаратов, исключая равенство тепловых и гидравлических условий из общепринятых допущений.

Гипотеза. Процесс теплообмена в пластинчатом теплообменном аппарате зависит от условий распределения потоков жидкости между каналами.

Задачи:

- определить влияние геометрического расположения рабочего канала в конструктивном пространстве теплообменного аппарата на выходную температуру теплоносителя на выходе из канала;
- разработать алгоритм расчета температурного режима пластинчатого теплообменного аппарата, с учетом распределения потоков жидкости по длине пакета пластин;
- провести численные исследования теплового режима теплообменного аппарата пластинчатого типа.

Приняты следующие допущения: тепловые потери в окружающую среду и фазовые переходы отсутствуют.

Материалы и методы

Температуры жидкости в выходных патрубках теплообменника t_e'' и t_x'' по греющему и нагреваемому контуру соответственно определяются исходя из закона сохранения масс. Нижние индексы « i » и « j » присваиваются конкретному параметру, с указанием принадлежности к контуру нагрева по каналам: « i » - греющий, « j » - нагреваемый контур; верхние индексы «'» и «''» характеризуют входные и выходные значения рассматриваемого параметра соответственно; нижние индексы « g » и « x » характеризуют параметры на входе и выходе из теплообменного аппарата.

$$t_e'' = \frac{\sum (G_i) \cdot (t_i'')}{G_e'} = \frac{W_i \cdot t_i''}{W_e'}, \quad (1)$$

$$t_x'' = \frac{\sum (G_j) \cdot (t_j'')}{G_x'} = \frac{W_j \cdot t_j''}{W_x'}, \quad (2)$$

где G_i – массовый расход теплоносителя, кг/ч; W – водяной эквивалент рабочей жидкости, Дж/с·°C; t – температура теплоносителя, °C.

Условие равенства переданного тепла «горячим» теплоносителем Q_e и принятого «холодным» Q_e в условиях геометрического пространства пластинчатого теплообменника представим в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} Q = \sum (Q_n) \\ Q_x = \sum (Q_{xj}) \\ Q_e = \sum (Q_{ei}), \end{cases} \quad (3)$$

где n – номер пластины от входа теплоносителя в распределительный коллектор; Q_n – тепло, переданное через n – ую пластину, Вт; Q_{xj} – количество тепла, полученное в j -ом канале по «холодному» контуру, Вт; Q_{ei} – количество тепла, переданное греющей жидкостью в i -ом канале, Вт.

Таким образом процесс теплопередачи в пластинчатом теплообменнике обуславливается суммой тепловых потоков через пластины. Представим условие передачи теплоты греющим теплоносителем в аппарате, с допущением адиабатности с окружающей средой (пренебрегается теплообмен через крайние пластины):

$$Q = \sum_{n=2}^{N_{pl}-1} Q_n, \quad (4)$$

$$Q_n = K_n \cdot F_n \cdot \Delta t_n, \quad (5)$$

где N_{pl} – общее число пластин; Δt_n – среднелогарифмическая разность температур между теплоносителями, разделенными соответствующей пластиной, °C [23].

Коэффициенты теплоотдачи определяются исходя из уравнений подобия, с учетом комплексных геометрических характеристик теплообменного аппарата¹.

¹ Юркина М.Ю. Совершенствование теплообменных аппаратов водяных систем теплоснабжения повышением энергетической эффективности: дис. ... канд. техн. наук.: 05.14.04. М., 2009. 180 с.

На рис. 1 представлены условия теплообмена для крайнего канала в случае его заполнения нагреваемым теплоносителем.



Рис. 1. Принципиальная схема передачи тепла для крайних каналов

Fig. 1. Schematic diagram of heat transfer for extreme channels

Согласно представленной схеме (рис. 1) преобразование температуры в крайнем канале Δt_{jk} описывается уравнением:

$$q = c \cdot G_{jk} \cdot (t''_{jk} - t'_{jk}) = W_{jk} \cdot \Delta t_{jk}, \quad (6)$$

где c – средняя теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·°C); нижний индекс «к» характеризует значение параметра для условий «крайнего» канала, совмещенного с прижимной или неподвижной плитой по конструкции теплообменника.

Тогда по зависимости (5), уравнение теплового баланса для крайних каналов (с учетом адиабатных условий) имеет вид

$$K_{nk} \cdot F_{nk} \cdot \Delta t_{nk} = W_{jk} \cdot \Delta t_{jk}. \quad (7)$$

Если по крайнему каналу циркулирует греющий теплоноситель, то меняется направление теплового потока по отношению к рис. 1. Тогда уравнение (7) для этого условия имеет вид:

$$W_{kk} \cdot \Delta t_{kk} = K_{nk} \cdot F_{nk} \cdot \Delta t_{nk}, \quad (8)$$

где индекс «кк» характеризует параметр для крайнего греющего канала, а «нк» характеризует условия теплопередачи через пластины под номерами 2 и $n-1$.

На рис. 2 представлен принцип подвода теплоты к нагреваемому каналу, положение которого в геометрическом пространстве аппарата определяется как промежуточное (не крайний канал). При этом учитывается величина тепловых потоков от граничащих «горячих» каналов.

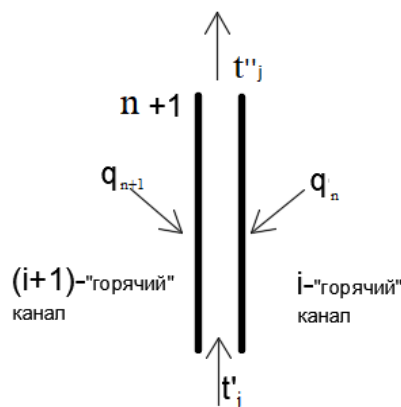


Рис. 2. Принцип подвода тепла от греющих каналов к промежуточному нагреваемому каналу

Fig. 2. The principle of heat supply from hot channels to the intermediate heated channel

Согласно рис. 2 уравнение теплового баланса для «холодного» канала, ограниченного пластинами n и $(n+1)$, примет вид:

$$q_j = q_n + q_{n+1} = c \cdot G_j \cdot \Delta t_j \quad (9)$$

или

$$q_j = q_n + q_{n+1} = W_j \cdot \Delta t_j, \quad (10)$$

где

$$q_n = K_n \cdot F_n \cdot \Delta t_n, \quad (11)$$

$$q_{n+1} = K_{n+1} \cdot F_{n+1} \cdot \Delta t_{n+1}. \quad (12)$$

Перепад температур нагреваемой жидкости на входе и выходе из канала Δt_j , °C:

$$\Delta t_j = t_j'' - t_j'. \quad (13)$$

Тогда уравнение теплового баланса для промежуточного канала, заполненного нагреваемым теплоносителем (геометрическое положение между пластинами n и $(n+1)$), имеет вид:

$$K_n \cdot F_n \cdot \Delta t_n + K_{n+1} \cdot F_{n+1} \cdot \Delta t_{n+1} = W_j \cdot \Delta t_j, \quad (14)$$

а уравнение теплового баланса для промежуточного канала, заполненного греющим теплоносителем (геометрическое положение между пластинами n и $(n+1)$):

$$K_n \cdot F_n \cdot \Delta t_n + K_{n+1} \cdot F_{n+1} \cdot \Delta t_{n+1} = W_i \cdot \Delta t_i. \quad (15)$$

Перепад температур греющей жидкости на входе и выходе из канала Δt_i , °C:

$$\Delta t_i = t_i' - t_i''. \quad (16)$$

Для определения температур жидкости на выходе из каждого канала, с учетом взаимного расположения пластин, разделяющих потоки греющего и нагреваемого теплоносителей необходимо решить систему уравнений теплового баланса для условий каждого канала:

$$\left. \begin{aligned} W_1 \cdot \Delta t_{k1} &= K_{n2} \cdot F_{n2} \cdot \Delta t_{n2}, \\ W_j \cdot \Delta t_j &= K_n \cdot F_n \cdot \Delta t_n + K_{n+1} \cdot F_{n+1} \cdot \Delta t_{n+1}, \\ W_i \cdot \Delta t_i &= K_n \cdot F_n \cdot \Delta t_n + K_{n+1} \cdot F_{n+1} \cdot \Delta t_{n+1}, \\ W_k \cdot \Delta t_k &= K_{n,n-1} \cdot F_{n,n-1} \cdot \Delta t_{n,n-1}, \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

где нижний индекс формируется на основании номера пластины n и соответственно может принимать значения от 1 до $(N - 1)$ (N – общее число пластин в теплообменном аппарате); Δt_k – раз-

ность температур жидкости в последнем канале.

К заданным параметрам следует отнести: площадь поверхности пластины, коэффициент теплопередачи, теплоемкость жидкости, температуры «горячего» и «холодного» теплоносителя на входе в теплообменный аппарат, расход жидкости по греющему и нагреваемому контуру.

Так как сложность расчета теплового режима в каждом канале пластинчатого теплообменного аппарата обусловлена необходимостью учета индивидуальных условий процесса теплообмена, зависящих от геометрического расположения каналов, то целесообразно представить алгоритм расчета в виде подпрограмм.

На рис. 3 представлен этап расчета изменения температуры теплоносителя в каждом канале. Температуры t_1 и t_2 задаются в соответствии с нумерацией каналов от неподвижной плиты в конструкции теплообменника. Соблюдается следующее условие: если первый канал заполнен греющим теплоносителем, то всем последующим каналам, по которым циркулирует «горячий» теплоноситель, присваивается нечетная нумерация.

На рис. 4 представлен этап расчета изменения температур рабочей пластины, через которую осуществляется процесс теплопередачи. Разность температур определяется как среднелогарифмическое значение [23]. Схема движения прямоток. Алгоритм корректируется при изменении характера движения теплоносителей относительно друг друга.

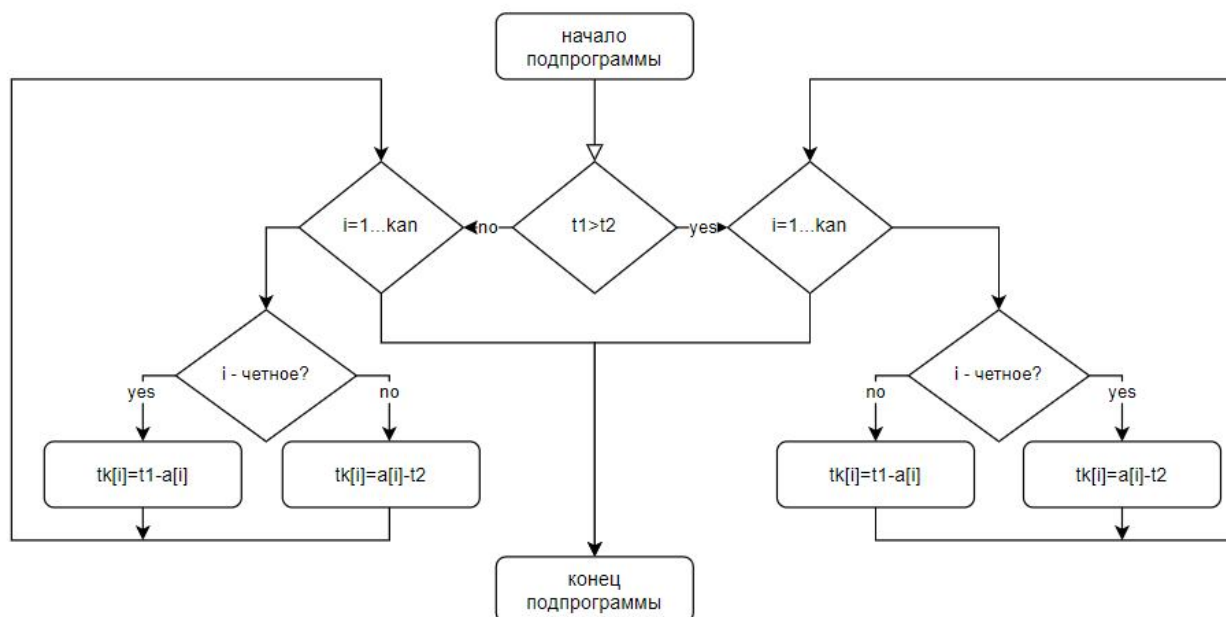


Рис. 3. Алгоритм расчета изменения температуры жидкости в канале

Fig. 3. Algorithm for calculating the temperature change of the liquid in the channel

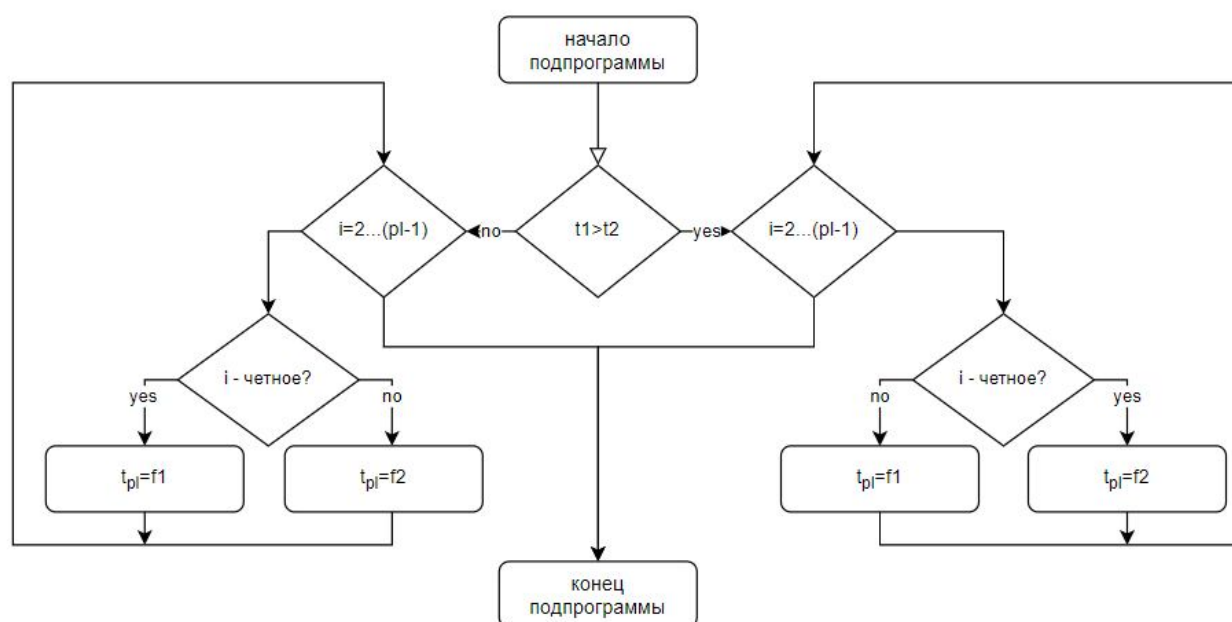


Рис. 4. Последовательность расчета изменения температур теплообменной пластины

Fig. 4. The sequence of calculation of temperature changes of the heat exchange plate

На рис. 5 (а) представлен алгоритм подпрограммы, которая подразумевает задание системы уравнений теплового баланса для каждого канала (17), количество уравнений будет определяться

числом теплообменных каналов. Далее (рис. 5 (б)) предлагается общий алгоритм расчета температурного режима пластинчатого теплообменника.

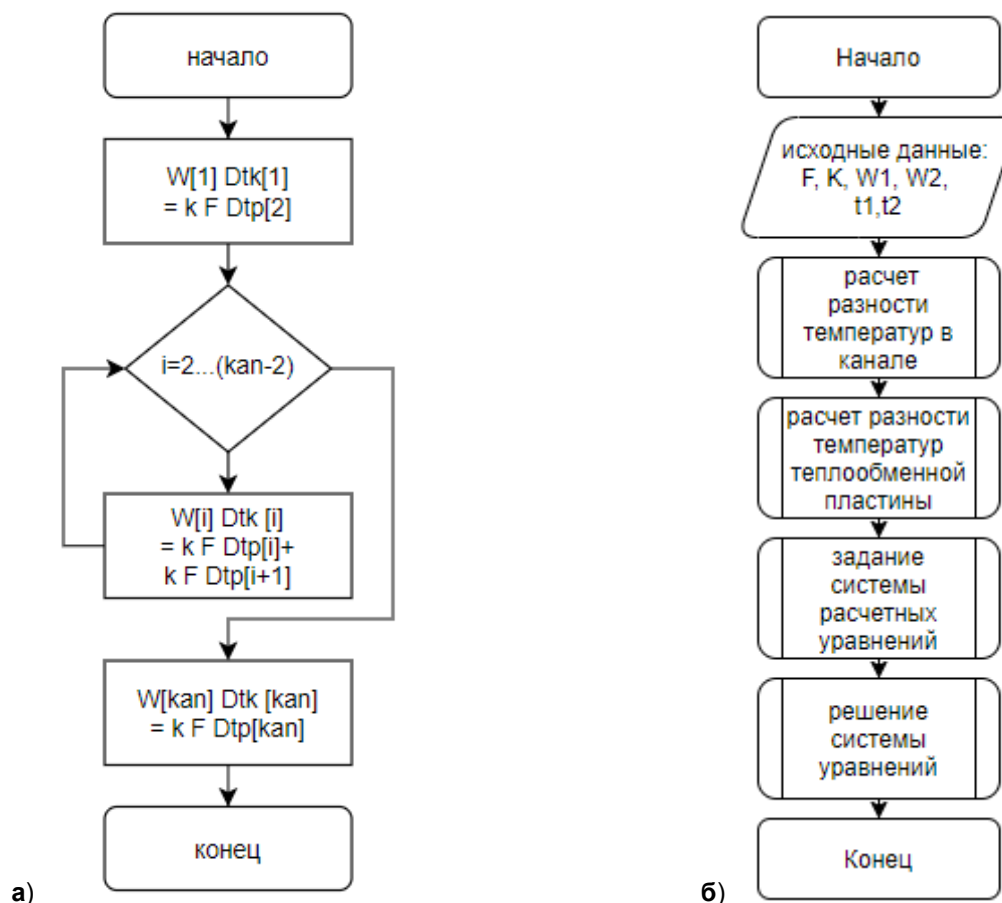


Рис. 5. Блок-схемы: **а** – задание системы уравнений теплового баланса для каждого канала; **б** – расчет теплового режима теплообменного аппарата пластинчатого типа

Fig. 5. Flowcharts: **a** – setting the system of heat balance equations for each channel; **b** – calculation of the thermal regime of a plate-type heat exchanger

Далее представленный алгоритм расчета теплового режима пластинчатого теплообменного оборудования необходимо дополнить условиями потокораспределения в аппарате. Основные результаты исследования особенностей неравномерности расходов жидкости в каналах, в зависимости от конструктивных особенностей теплообменника представлены в исследовании¹. Принимаем условия геометрического расположения каналов для

расчета гидравлических условий в каналах теплообмена, образованных пластинами (рис. 6 (б)). Алгоритм расчета общего гидродинамического режима теплообменного аппарата пластинчатого типа представлен на рис. 6 (б).

Результаты получены для пластинчатого теплообменника с общим числом пластин – 12, площадь поверхности одной пластины 0,15 м². Значения температур греющего и нагреваемого теплоносителя на входе в теплообменный аппарат составляют 95 и 5 °С соответственно.

¹ Елистратова Ю.В. Повышение эффективности пластинчатых теплообменных устройств в системах теплоснабжения: дис. ... кан. техн. наук.: 05.23.03. Белгород, 2021. 174 с.

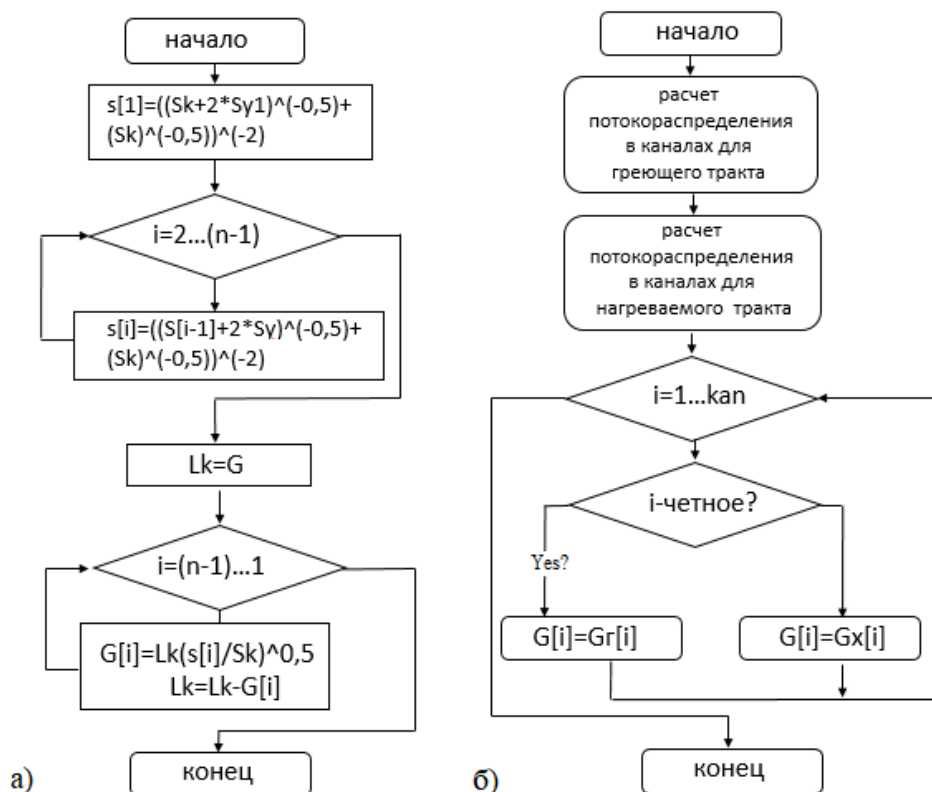


Рис. 6. Подпрограммы: **а** – расчета расходов жидкости в каналах теплообмена; **б** – гидродинамического режима в пластинчатом теплообменнике

Fig. 6. Subprograms: **a** – calculation of fluid flow rates in heat exchange channels; **b** – hydrodynamic regime in a plate heat exchanger

Принято условие заполнения крайних каналов греющей жидкостью, при этом отсчет номера пластин и каналов осуществляется от неподвижной плиты в конструкции теплообменника.

Результаты и их обсуждение

На рис. 7 представлено сравнение температур теплоносителя на выходе из каналов греющего контура, полученных при решении системы уравнения теплового баланса для каждого канала (17) с учетом гидравлических условий распределения потоков жидкости по длине пакета пластин и по известной методике расчета теплового режима пластинчатых теплообменников [20].

Наблюдается превышение температуры греющего теплоносителя на выходе из первого и последнего каналов по отношению к промежуточным каналам и к результатам, полученным согласно известным данным. Применение классического описания температурного режима теплообменника приводит к равенству тепловых условий в пределах одной группы каналов. Отмечается незначительное расхождение температур жидкости между внутренними каналами – объясняется относительно малым количеством пластин, принятым для упрощения расчета, что в свою очередь снизило критичность расхождения расходов между ними.

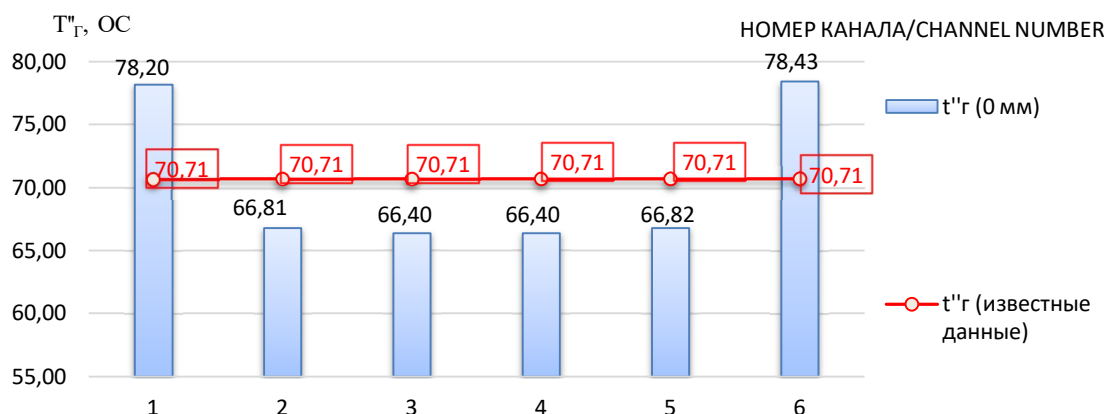


Рис. 7. Распределение температур теплоносителя на выходе из каналов по «горячему» контуру

Fig. 7. Distribution of coolant temperatures at the outlet of the channels along the "hot" circuit

Температурный режим каналов теплообменника в условиях «чистой» теплообменной поверхности (не учитываются сопутствующие загрязнения в ходе эксплуатации теплообменника) представляет некоторую симметричность расчетных

температур нагреваемого теплоносителя на выходе из каналов (рис. 8). При этом температуры в крайних каналах выше среднего значения на 5%, а максимальное расхождение температур теплоносителя по греющему контуру составляет 12 оС.

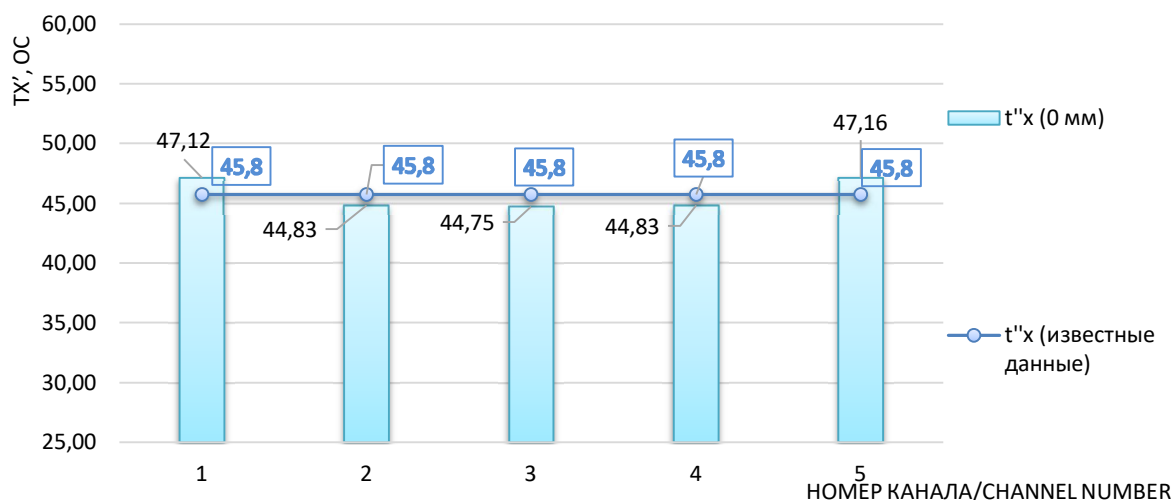


Рис. 8. Распределение температур теплоносителя на выходе из каналов по «холодному» контуру

Fig. 8. Distribution of coolant temperatures at the outlet of the channels along the "cold" circuit

На рис. 9 наглядно представлено различие температурного режима на выходе из каналов теплообменника по греющей стороне. Результаты получены в программном комплексе SolidWorks, для описание турбулентного течения

принята стандартная математическая k-ε модель¹.

¹ Юркина М.Ю. Совершенствование теплообменных аппаратов водяных систем теплоснабжения повышением энергетической эффективности: дис. ... канд. техн. наук.: 05.14.04. М., 2009. 180 с.

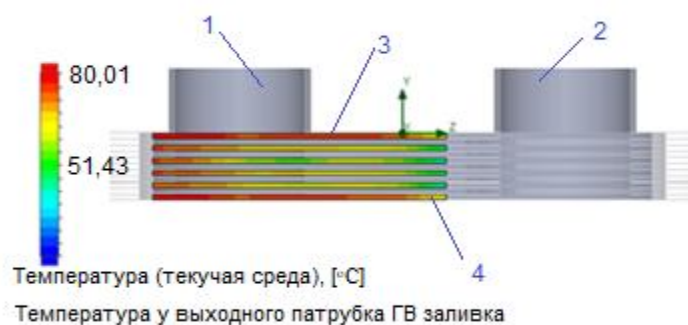


Рис. 9. Температурное поле на выходе из каналов по «горячему» контуру: **1** – входной патрубок «горячего» контура; **2** – выходной патрубок «холодного» контура; **3** – первый канал по «горячему» контуру; **4** – последний канал теплообмена по «горячему» контуру

Fig. 9. Temperature field at the outlet of the channels along the "hot" circuit: **1** – the inlet pipe of the "hot" circuit; **2** – the outlet pipe of the "cold" circuit; **3** – the first channel along the "hot" circuit; **4** – the last channel of heat exchange along the "hot" circuit

Результаты исследования подтверждают гипотезу о том, что процесс теплообмена в пластинчатом теплообменнике зависит от условий распределения потоков жидкости между каналами, с учетом их пространственного расположения в конструкции аппарата.

Выводы

Результаты аналитического расчета и моделирования в среде SolidWorks температурного режима в каналах пластинчатых теплообменников свидетельствуют о существенном влиянии геометрическо-

го расположения на тепловой режим в каналах. Полученные результаты оспаривают общепринятые допущения о равенстве температур в каналах теплообмена по длине пакета пластин. Следовательно, исключение допущения о равенстве теплового режима между каналами пластинчатого теплообменника позволит проводить валидатные исследования по разработке интенсифицированных поверхностей теплообмена и совершенствованию конструктивных параметров теплообменного аппарата в целом.

Список литературы

1. Рыбкина Г.В., Яблокова А.А. Современное состояние теплоснабжения и его развитие // Промышленные процессы и технологии. 2022. Т. 2. № 2. С. 89-99. DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-89-99.
2. Осипов Д.А., Журавлева Н.В. Основные элементы тепломеханических схем теплогенерирующих объектов // Вестник магистратуры. 2021. №2-1 (113). С. 26-28.
3. Гонина Е.С. Расчёт индивидуального теплового пункта // Вестник магистратуры. 2021. №1-5 (112). С. 121-125.

4. Свинцов А.П., Андросов Е. А. Эксплуатационная надежность оборудования в индивидуальных тепловых пунктах // Жилищное строительство. 2019. №12. С. 45-51. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-12-45-51>.
5. Елистратова Ю.В., Семиненко А.С., Минко В.А. Актуальность моделей загрязнения для диагностики состояния пластинчатых теплообменников // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 10. С. 33–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-33-40.
6. Нияковский А. М., Сидорова А. Ю., Нияковский А. А. Особенности подбора пластинчатых теплообменников горячего водоснабжения в модернизируемых тепловых пунктах жилых зданий // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2018. № 8. С. 158-164.
7. Современные способы интенсификации работы кожухотрубных теплообменных аппаратов систем теплоснабжения / Л.А. Куцев, Н.Ю. Никулин, Ю.Г. Овсянников, А.И. Алифанова // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2018. № 2 (25). С. 130-140. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2227-2917-2018-2-130-140>.
8. Хабибулин А.В. Виды теплообменных устройств. использование теплообменников в автономном энергоснабжении // Инновационная наука. 2021. №1. С. 36-37.
9. Особенности распределения потоков жидкости в пластинчатых теплообменниках / Ю.В. Елистратова, А.С. Семиненко, В.А. Минко, Р.С. Рамазанов // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2020. № 12. С. 47-55. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-12-47-55.
10. Елистратова Ю.В., Мацукова М.Н. Перспективы стабилизационной обработки теплоносителя теплообменных аппаратов методами физического воздействия // Россия молодая: сборник материалов XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / редкол.: К.С. Костиков (отв. ред.) [и др.]. Кемерово, 2022. С. 21207.1-21207.6.
11. Кондрашов Н.П., Лагуткин М.Г. Повышение эффективности процесса теплопередачи пластинчато-ребристого теплообменника // Евразийский Союз Ученых. 2019. №3-4 (60). С. 6-13.
12. 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 // ИВД. 2022. №6 (90). С. 680-688.
13. Применение пористых материалов в теплообменных аппаратах системы теплоснабжения / Н.В. Рыдалина, Б.Г. Аксенов, О.А. Степанов, Е.О. Антонова // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2020. № 3. С. 3-13. DOI:10.30724/1998-9903-2020-22-3-3-13.
14. Khavin G., Babak T. The benefits of using channels with different corrugation heights in plate heat exchangers // *East European Advanced Technology Journal*, 2018, vol. 1, no. 8 (91), pp. 33-38. DOI: 10.1007/978-3-319-93587-4_47.
15. Рафальская Т.А., Рудяк В.Я. Влияние расходов теплоносителей на параметр теплообменника при переменных режимах его работы // Вестник МГСУ. 2019. №5 (128). С. 621-623. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.621-633.

16. Кикоть Е.А., Газизов Ф.Н. Выбор структуры тепловой генерации в городах РФ при актуализации схем теплоснабжения // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2020. №5. С. 70-81. DOI:10.30724/1998-9903-2020-22-5-71-82.
17. Буланин В.А. Алгоритм анализа энергоэффективности источника теплоснабжения // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2019. № 9. С. 54-62. DOI: 10.34031/article_5da452a45dbf30.07663447.
18. Стенников В.А., Пеньковский А.В. Проблемы российского теплоснабжения и пути их решения // ЭКО. 2019. №9 (543). С. 48-69. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2019-9-48-69.
19. Семикашев В.В. Теплоснабжение в России: текущая ситуация и проблемы инвестиционного развития // ЭКО. 2019. № 9 (543). С. 23-47. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2019-9-23-47
20. Status of 4th generation district heating: Research and results / H. Lund, P.A. Stergaard, M. Chang, S. Werner, S. Svendsen et al. // Energy. 2018. Vol.164. P. 147–154. DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.206.
21. Fukang Ren, Ziqing Wei, Xiaoqiang Zhai. A review on the integration and optimization of distributed energy systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 162, 2022, 112440, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112440>.
22. Выбор определяющих параметров технического состояния, оказывающих влияние на остаточный срок службы теплообменного оборудования / П.А. Кулаков, А.В. Рубцов, В.Г. Афанасенко, О.Е. Зубкова [и др.] // Izvestiya Tomskogo Politekhnikeskogo Universiteta Inzhiniring Georesursov. 2020. С. 97-105. DOI: 10.18799/24131830/2020/1/2451.
23. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1969. 560 с.

References

1. Rybkina G.V., Yablokova A.A. Sovremennoye sostoyaniye teplosnabzheniya i yego razvitiye [Modern state of heat supply and its development]. *Promyshlennyye protsessy i tekhnologii = Industrial Processes and Technologies*, 2022, vol. 2, no. 2, pp. 89-99. DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-89-99.
2. Osipov D.A., Zhuravleva N.V. Osnovnyye elementy teplomekhanicheskikh skhem teplogeneriruyushchikh ob"yektov [The main elements of thermal mechanical schemes of heat generating objects]. *Vestnik magistratury = Bulletin of the Magistracy*, 2021, no. 2-1 (113), pp. 26-28.
3. Gogina Ye.S. Raschot individual'nogo teplovogo punkta [Calculation of an individual heat point. Bulletin of the Magistracy]. *Vestnik magistratury = Bulletin of the Magistracy*, 2021, no. 1-5 (112), pp. 121-125.
4. Svintsov A.P., Androsov Ye. A. Ekspluatatsionnaya nadezhnost' oborudovaniya v individual'nykh teplovykh punktakh [Operational reliability of equipment in individual heating

points]. *Zhilishchnoye stroitel'stvo = Housing Construction*, 2019, no. 12, pp. 45-51. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-12-45-51>.

5. Elistratova YU.V., Seminenko A.S., Minko V.A. Aktual'nost' modeley zagryazneniya dlya diagnostiki sostoyaniya plastinchatykh teploobmennikov [The relevance of pollution models for diagnosing the state of plate heat exchangers]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova = Bulletin of BSTU im. V.G. Shukhov*, 2020, no. 10, pp. 33-40. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-33-40.

6. Niyakovskiy A.M., Sidorova A.YU., Niyakovskiy A.A. Osobennosti podbora plastinchatykh teploobmennikov goryachego vodosnabzheniya v moderniziruyemykh teplovykh punktakh zhilykh zdaniy [Features of the selection of plate heat exchangers for hot water supply in modernized heating units of residential buildings]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnyye nauki = Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Science*, 2018, no. 8, pp. 158-164.

7. Kushchev L.A., Nikulin N.YU., Ovsyannikov Yu.G., Alifanova A.I. Sovremennyye sposoby intensivatsii raboty kozhukhotrubnykh teploobmennyykh apparatov sistem teplosnabzheniya [Modern methods of intensification of the operation of shell-and-tube heat exchangers of heat supply systems.]. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Izvestiya Vuzov. Investments. Building. Real Estate*, 2018, no. 2 (25), pp. 130-140. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2227-2917-2018-2-130-140>.

8. Khabibulin A.V. Vidy teploobmennyykh ustroystv. ispol'zovaniye teploobmennikov v avtonomnom energosnabzhenii [Types of heat exchange devices. use of heat exchangers in autonomous power supply]. *Innovatsionnaya nauka = Innovative Science*, 2021, no. 1, pp. 36-37.

9. Elistratova YU.V., Seminenko A.S., Minko V.A., Ramazanov R.S. Osobennosti raspredeleniya potokov zhidkosti v plastinchatykh teploobmennikakh [Features of the distribution of fluid flows in plate heat exchangers]. *Vestnik BGTU imeni V. G. Shukhova = Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, 2020, no. 12, pp. 47-55. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-12-47-55.

10. Elistratova Yu.V., Matsukova M.N. [Prospects for the stabilization treatment of the coolant of heat exchangers by methods of physical impact]. *Rossiya molodaya. Sbornik materialov XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Russia is young. Collection of materials of the XIV All-Russian scientific-practical conference with international participation]; ed by K.S. Kostikov. Kemerovo, 2022, pp. 21207.1-21207.6. (In Russ.).

11. Kondrashov N.P., Lagutkin M.G. Povysheniye effektivnosti protsessa teploperedachi plastinchato-rebristogo teploobmennika [Improving the efficiency of the heat transfer process of a plate-fin heat exchanger]. *Yevraziyskiy Soyuz Uchenykh = Eurasian Union of Scientists*, 2019, no. 3-4 (60), pp. 6-13.

12. Kuznetsov P.N., Mindrov K.A., Kuznetsov A.A., Bekshayev I.YU., Inchin A.A., Okhotnikov A.V., Chugunov S.V. Povysheniye intensifikatsii teploobmena v kozhukhotrubnykh teploobmennikakh [Increasing the intensification of heat transfer in shell-and-tube heat exchangers]. *IVD*, 2022, no. 6 (90), pp. 680-688.

13. Rydalina N.V., Aksenov B.G., Stepanov O.A., Antonova Ye.O. Primeneniye poristikh materialov v teploobmennikakh apparatakh sistemy teplosnabzheniya [The use of porous materials in heat exchangers of the heat supply system. *Izvestiya vuzov*]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki = Izvestiya Vuzov. Energy Problems*, 2020, no. 3, pp. 3-13. DOI:10.30724/1998-9903-2020-22-3-3-13.

14. Khavin G., Babak T. The benefits of using channels with different corrugation heights in plate heat exchangers. *East European Advanced Technology Journal*, 2018, vol. 1, no. 8 (91), pp. 33-38. DOI: 10.1007/978-3-319-93587-4_47.

15. Rafal'skaya T.A., Rudyak V.Ya. Vliyaniye raskhodov teplonositeley na parametr teploobmennika pri peremennykh rezhimakh yego raboty [Influence of coolant costs on the parameter of a heat exchanger under variable modes of its operation]. *Vestnik MGSU = Bulletin of MGSU*, 2019, no. 5 (128), pp. 621-623. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.621-633.

16. Kikot' Ye. A., Gazizov F.N. Vybory struktury teplovoy generatsii v gorodakh RF pri aktualizatsii skhem teplosnabzheniya [The choice of the structure of thermal generation in the cities of the Russian Federation when updating heat supply schemes]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki = Izvestiya Universities. Energy Problems*, 2020, no. 5, pp. 70-8. DOI:10.30724/1998-9903-2020-22-5-71-82.

17. Bulanin V.A. Algoritmy analiza energoeffektivnosti istochnika teplosnabzheniya [Algorithm for analyzing the energy efficiency of a heat supply source]. *Vestnik BGTU imeni V. G. Shukhova = Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, 2019, no. 9, pp. 54-62. DOI: 10.34031/article_5da452a45dbf30.07663447.

18. Stennikov V.A., Pen'kovskiy A.V. Problemy rossiyskogo teplosnabzheniya i puti ikh resheniya [Problems of Russian heat supply and ways to solve them]. *EKO*, 2019, no. 9 (543), pp. 48-69. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2019-9-48-69.

19. Semikashev V.V. Teplosnabzheniye v Rossii: tekushchaya situatsiya i problemy investitsionnogo razvitiya [Heat supply in Russia: current situation and problems of investment development]. *EKO*, 2019, no. 9 (543), pp. 23-47. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2019-9-23-47.

20. Lund H., Stergaard P.A., Chang M., Werner S., Svendsen S. et al. The status of 4th generation district heating: Research and results. *Energy*, 2018, vol. 164, pp. 147-154. DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.206.

21. Fukang Ren, Ziqing Wei, Xiaoqiang Zhai. A review on the integration and optimization of distributed energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 162, 112440, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112440>.

22. Kulakov P.A., Rubtsov A.V., Afanasenko V.G., Zubkova O.Ye. i dr. Vybory opredelyayushchikh parametrov tekhnicheskogo sostoyaniya, okazyvayushchikh vliyaniye na

ostatochnyyi srok sluzhby teploobmennogo oborudovaniya [The choice of the determining parameters of the technical condition that affect the residual service life of heat exchange equipment]. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta Inzhiniring Georesursov* = [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Engineering Georesources, 2020, pp. 97-105. DOI: 10.18799/24131830/2020/1/2451.

23. Nashchokin V.V. *Tekhnicheskaya termodinamika i teploperedacha* [Technical thermodynamics and heat transfer]. Moscow, *Vysshaya shkola Publ.*, 1969, 560 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Елистратова Юлия Васильевна, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: tgk.info@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1989-0632>

Yulia V. Elistratova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: tgk.info@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1989-0632>

Семиненко Артём Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: seminenko.as@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0581-4391>

Artem S. Seminenko, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: seminenko.as@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0581-4391>

Уваров Валерий Анатольевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: isi@bstu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3614-8536>

Valery A. Uvarov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: isi@bstu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3614-8536>

Минко Всеволод Афанасьевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: va.minko@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3614-8536>

Vsevolod A. Minko, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: va.minko@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3614-8536>