

Модифицированный пластинчатый теплообменный аппарат

Рецензия эксперта на статью получена
28.11.2024 [The expert review of the article
was received on November 28, 2024]

В современном мире, сталкиваясь с вызовами, связанными с изменением климата, обеспечение устойчивого развития общества требует более активных мер по защите окружающей среды. Для достижения этой цели необходимо снизить потребление ископаемого топлива и повысить энергоэффективность энергетических систем и комплексов. Одним из эффективных способов решения этой задачи является увеличение использования тепла, выделяющегося в промышленных процессах. Применение методологии интеграции процессов с использованием пластинчатых теплообменников повышенной эффективности позволит более полно реализовать этот потенциал [1].

Выхлопные газы, пары и газы, образующиеся в различных промышленных печах и являющиеся отходами производства, обладают значительным тепловым потенциалом [2]. Утилизация тепла из этих газовых потоков позволит сократить расход топлива, используемого для сжигания, и уменьшить выбросы вредных веществ, включая углекислый газ.

Анализ методов интенсификации в пластинчатых теплообменниках

В теплоэнергетическом комплексе России особое внимание уделяется пластинчатому теплообменному оборудованию, поскольку оно удовлетворяет всем современным тенденциям в области ресурсосбережения. Исследования в области увеличения их эффективности, снижения металлоёмкости активно ведутся российскими и зарубежными учёными [3].

Ввиду высокой эффективности теплоотдачи, компактности конструкции и применения коррозионно-стойких материа-

Ввиду высокой эффективности теплоотдачи, компактности конструкции и применения коррозионно-стойких материалов, современные пластинчатые теплообменники с гофрированными пластинами оптимальны для интеграции в различные промышленные процессы

лов, современные пластинчатые теплообменники с гофрированными пластинами являются оптимальным решением для интеграции в различные промышленные процессы [4]. Эффективность таких теплообменников подтверждена их успешным применением в различных отраслях промышленности (нефтяной, химической), на электростанциях и в системах отопления жилых зданий, а также в технологических процессах.

Стандартные пластинчатые теплообменники, повсеместно применяемые в настоящее время, имеют разнообразные конфигурации, включая рамно-пластинчатые, сварные, полусварные и паяные конструкции. Для проектирования подобного оборудования и моделирования процессов теплопередачи в нём были разработаны математические модели, основанные на экспериментальных данных [5], полуэмпирических корреляциях [6] и теоретических исследованиях [7].

Для эффективной рекуперации тепла с использованием отработанных газовых и жидких потоков конструкция пластинчатых теплообменников должна быть модифицирована с учётом специфики таких процессов, что обеспечит надёжную работу теплообменного оборудования.

УДК 536.24. Научная специальность: 2.1.3.

Модифицированный пластинчатый теплообменный аппарат

Т. Н. Ильина, д.т.н., профессор, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова (БГТУ); **Н. Ю. Саввин**, к.т.н., доцент, БГТУ; **О. А. Сотникова**, д.т.н., профессор, Воронежский государственный технический университет (ВГТУ); **Д. Ю. Суслов**, д.т.н., профессор, БГТУ

С учётом глобальных изменений климата и растущих требований к экологически устойчивому развитию общества, проблема защиты окружающей среды приобретает особую актуальность. Одним из эффективных путей решения этой задачи является повышение уровня рекуперации тепла в промышленных процессах. Данная работа посвящена разработке нового типа эффективного теплообменного оборудования — пластинчатого теплообменника с развитой поверхностью теплообмена. В основе его конструкции лежит инновационный подход, направленный на оптимизацию характеристик теплопередачи для различных технологических процессов. На основе полученных экспериментальных данных о величинах потерь давления и коэффициента теплопередачи были получены эмпирические соотношения для коэффициента трения и коэффициента теплопередачи. Предложенная конструкция теплообменника способствует повышению теплоотдачи на 7 % по сравнению с традиционным теплообменником, однако при этом коэффициент трения увеличивается примерно на 9 %.

Ключевые слова: пластинчатый теплообменный аппарат, интенсификация теплообмена, коэффициент теплопередачи, коэффициент трения.

UDC 536.24. Scientific specialty number: 2.1.3.

Modified plate heat exchanger

T.N. Ilyina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU, Belgorod city); **N.Yu. Savvin**, PhD, Associate Professor, BSTU; **O.A. Sotnikova**, PhD, Professor, Voronezh State Technical University (VSTU, Voronezh city); **D.Yu. Suslov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, BSTU

Taking into account global climate change and the growing demands on the environmental sustainability of society, the problem of environmental protection is becoming particularly relevant. One of the effective ways to solve this problem is to increase the level of heat recovery in industrial processes. This work is devoted to the development of a new type of efficient heat exchange equipment — a plate heat exchanger with a developed heat exchange surface. Its design is based on an innovative approach aimed at optimizing heat transfer characteristics for various technological processes. Based on experimental studies of pressure losses and the heat transfer coefficient, empirical relations for the coefficient of friction and the coefficient of heat transfer were obtained. The proposed design of the heat exchanger increases heat transfer by 7 % compared to a traditional heat exchanger, however, the coefficient of friction increases by about 9 %.

Key words: plate heat exchanger, heat exchange intensification, heat transfer coefficient, coefficient of friction.

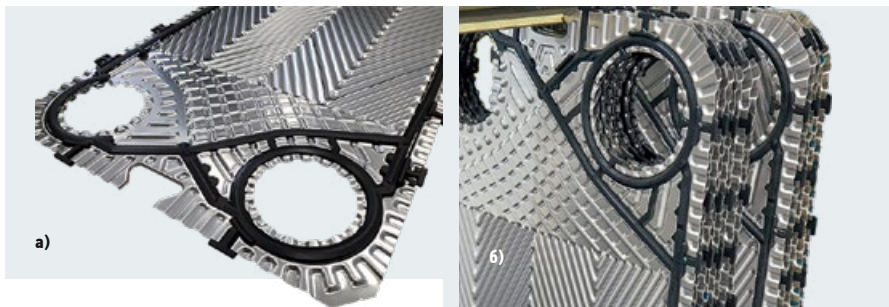


Рис. 1. Пластины пластинчатого теплообменника (а — внешний вид пластин, б — пакет пластин)

Внедрение вихревых вставок в панельные радиаторы позволило повысить средний коэффициент теплопередачи на 12 %. Оптимальным оказалось размещение генераторов в центре панели [8]. Теплообменники типа «сэндвич» с металлическими сотовыми сердечниками, характеризующиеся переменной геометрией ячеек для оптимизации потока и обладающие хорошими механическими свойствами, были рассмотрены в работе [9].

Для повышения эффективности пластинчатых теплообменников в ряде исследований были предложены различные способы интенсификации теплопередачи в каналах, новые конструктивные решения и инновационные подходы к производству. В работе [10] пластинчато-ребристые сэндвич-панели были модифицированы за счёт добавления пирамидальной решётки, что привело к увеличению числа Нуссельта в 1,9 раза.

В работах [11–13] были проведены расчётные исследования теплообменных свойств пластинчатых теплообменников для различных применений: работы с жидкостями, конденсации и испарения.

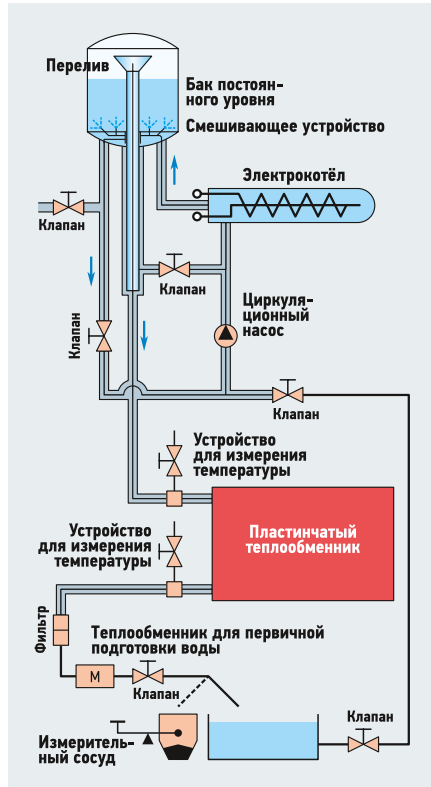


Рис. 3. Экспериментальная установка

Авторы [14] предложили метод модификации поверхности панелей с воздушной прослойкой для интенсификации процессов теплопередачи, а также исследовали характеристики теплопередачи и потока наножидкости в таких системах [15].

В этих исследованиях рассматривались различные конструктивные решения пластины. Пример пластин с развитой поверхностью теплообмена представлен на рис. 1. Пластины собираются в пакет.

Такое разнообразие конструкций влияет на теплопередачу и гидравлические характеристики пластины. Некоторые исследователи изучали влияние диаметра сварочного пятна, расстояния между ними [13] и расстояния между панелями [16] на общую эффективность теплообмена.

Разработка оригинальной конструкции

В данной статье предлагается усовершенствованная конструкция пластинчатого теплообменника, изготовленного с применением новых уникальных экспериментальных пластин для работы с жидкостями и газами [17]. Конструкция оригинальных пластин представлена на рис. 2.

Исследуемый теплообменник состоит из гофрированного канала между соседними пластинами для потока газа/жидкости. Сравнение уровней интенсификации теплообмена в таких каналах важно для дальнейшего развития этого перспективного типа теплообменников. Параметры теплообменника с модифицированными пластинами представлены в табл. 1.

Параметры теплообменника

табл. 1

Параметр	Величина
Площади поперечного сечения внешнего / внутреннего каналов, м ²	0,00372 / 0,000355
Гидравлические диаметры внешнего / внутреннего каналов, м	0,0177 / 0,018
Длина волнообразного канала пластины, м	1,255
Толщина пластины, м	0,50
Площадь основной теплообменной части пластины, м ²	0,18

Экспериментальные исследования

Для исследования гидравлического сопротивления и коэффициентов теплопередачи во внешних каналах была собрана экспериментальная установка, согласно ГОСТ Р 53583–2009 [18] (рис. 3).

Эксперименты проводились с использованием воды в качестве горячего теплоносителя и воздуха в качестве холодного. Во время экспериментов температура воды варьировалась от 50 до 85 °С. Воздух имел комнатную температуру около 20 °С. Скорость воздуха в каналах варьировалась в диапазоне от 1,3 до 5,3 м/с.

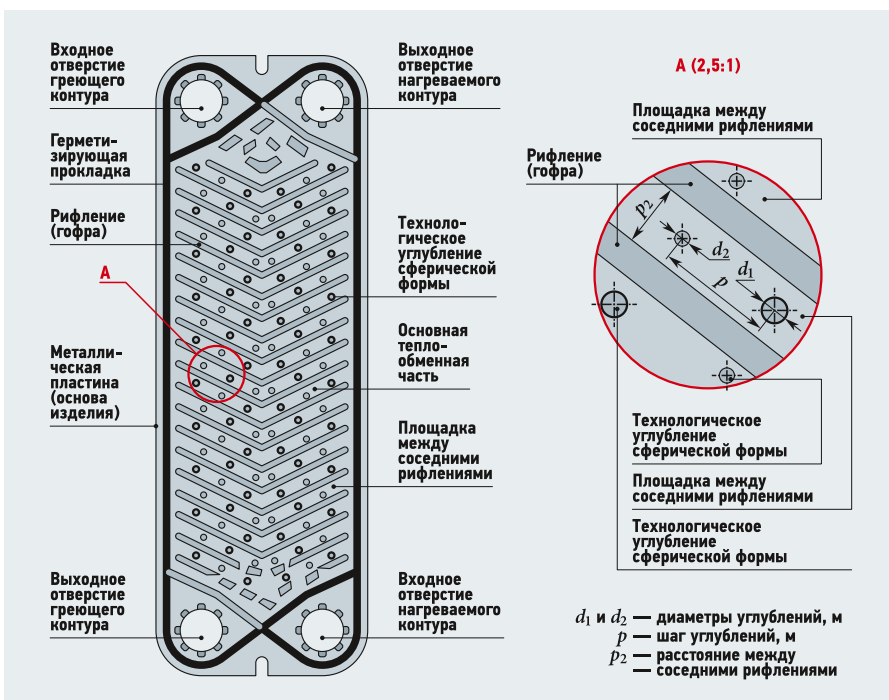


Рис. 2. Оригинальная конструкция пластины

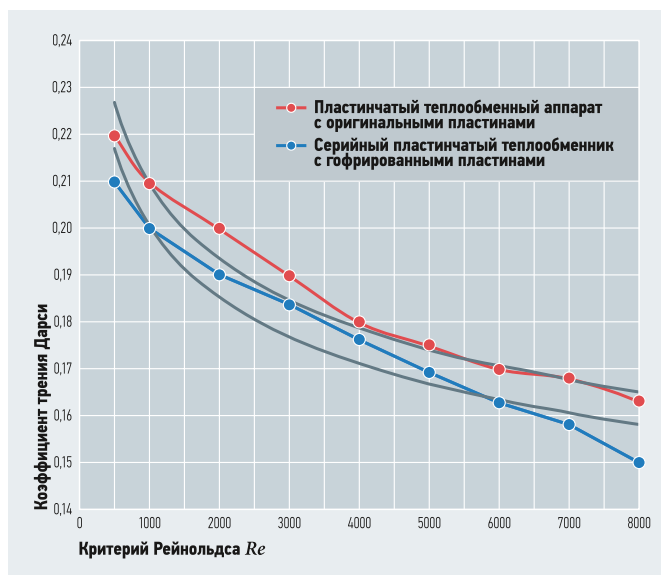


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от числа Рейнольдса

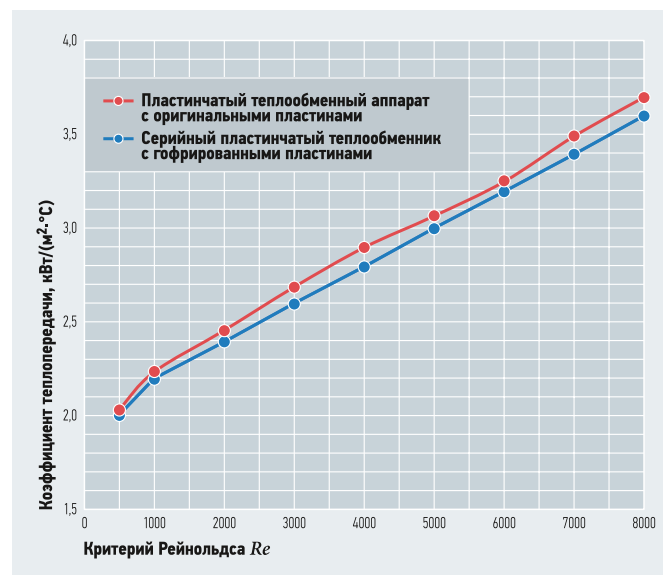


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопередачи от числа Рейнольдса

На основе экспериментальных данных было проведено исследование теплопередачи и падения давления в гофрированных каналах пластинчатого теплообменника. Для оценки падения давления в каналах использовался коэффициент трения Дарси.

Падение давления было изучено на двух участках канала между пластинами на участке с гофрированной поверхностью и на всей длине канала. На участке с ребристой поверхностью происходит основной процесс теплообмена, и информация о падении давления здесь может быть полезна для дальнейшего развития конструкции пластинчатого теплообменника. Падение давления на всей длине канала необходимо для проектирования теплообменника на основе исследованных пластин. Результаты экспериментов по определению падения давления на всей длине внешнего канала представлены в виде зависимостей коэффициента трения Дарси (рис. 4) и коэффициента теплопередачи (рис. 5) от числа Рейнольдса.

Анализ результатов позволил получить эмпирическую корреляцию в стандартной форме, включающую умножение числа Рейнольдса на определенный коэффициент. Полученная корреляция выглядит следующим образом:

$$\zeta = 1,044 Re^{-0,21}, \quad (1)$$

где Re — число Рейнольдса.

В результате исследования предлагается формула определения числа Нуссельта для теплообменника с оригинальными пластинами:

$$Nu = 0,053 Re^{0,77} Pr^{0,43}. \quad (2)$$

В данной работе были проведены экспериментальные исследования теплопередачи и гидравлических характеристик

пластинчатого теплообменника с гофрированной формой каналов. Эксперименты показали, что применение пластин с углублениями различного диаметра

Пластинчатое теплообменное оборудование удовлетворяет всем современным тенденциям в области ресурсосбережения, имеющим место в России и в мире

приводит к увеличению теплопередачи до 7%. Это сопровождается увеличением коэффициента трения до 9%. Были определены эмпирические уравнения для коэффициента трения и коэффициента теплопередачи в гофрированном канале. Полученные результаты могут способствовать повышению эффективности работы пластинчатого теплообменного оборудования, а также увеличению его жизненного цикла. ●

- Klemeš J.J., Varbanov P.S., Kapustenko P.O. New developments in heat integration and intensification, including total site, waste-to-energy, supply chains and fundamental concepts. Applied Thermal Engineering. 2013. Vol. 61. Issue 1. Pp. 1–6.
- Arsenyeva O.P., Čuček L., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Savchenko Y.A., Kusakov S.K., Matsegora O.I. Utilisation of waste heat from exhaust gases of drying process. Frontiers of Chemical Science and Engineering. 2016. Vol. 10. Issue 1. Pp. 131–138.
- Саввин Н.Ю. Моделирование теплообменного процесса в оригинальном пластинчатом теплообменнике // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура, 2023. №2. С. 37–46.
- Klemeš J.J., Arsenyeva O.P., Kapustenko P.O., Tovazhnyanskyy L.L. Compact heat exchangers for energy transfer intensification. Low grade heat and fouling mitigation. CRC Press. Boca Raton, Florida, U.S. 2015. 372 p.
- Arsenyeva O.P., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Khavin G.L. The generalized correlation for friction factor in criss-cross flow channels of plate heat exchangers. Proc. of the 14th International Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES'11). May 8–11, 2011. Florence, Italy. 2011. Vol. 25. Pp. 399–404.
- Kapustenko P.O., Arsenyeva O.P., Dolgonosova O. The heat and momentum transfers relation in channels of plate heat exchangers. Proc. of the 14th International Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES'11). May 8–11, 2011. Florence, Italy. 2011. Vol. 25. Pp. 357–362.
- Arsenyeva O.P., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Demirskiy O.V. Generalised semi-empirical correlation for heat transfer in channels of plate heat exchanger. Applied Thermal Engineering. 2014. Vol. 70. Pp. 1208–1215.
- Garelli L., Rios G., Dorella J.J., Storti M.A. Heat transfer enhancement in panel type radiators using delta-wing vortex generators. International Journal of Thermal Sciences. 2019. Vol. 137. Pp. 64–74.
- Kong D., Zhang Y., Liu S. Convective heat transfer enhancement by novel honeycomb-core in sandwich panel exchanger fabricated by additive manufacturing. Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 163.
- Ma Y., Yan H., Xie G. Flow and thermal performance of sandwich panels with plate fins or/and pyramidal lattice. Applied Thermal Engineering. 2020. Vol. 164.
- Tran J.M., Piper M., Kenig E.Y. Single-phase flow and condensation in pillow-plate condensers. In: Innovative Heat Exchangers. Springer Cham. 2019. 394 p.
- Tran J.M., Sommerfeld S., Piper M., Kenig E.Y. Investigation of pillow-plate condensers for the application in distillation columns. Chemical Engineering Research and Design. 2015. Vol. 99. Pp. 67–74.
- Goeddecke R., Scholl S. Modelling and simulation of a pillow plate thermosiphon reboiler. Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 55. Pp. 95–104.
- Piper M., Zibart A., Djakow E., Springer R., Homberg W., Kenig E.Y. Heat transfer enhancement in pillow-plate heat exchangers with dimpled surfaces: A numerical study. Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 153. Pp. 142–146.
- Al-Turki Yu.A., Yarmohammadi A., Alizadeh A., Toghraie D. Numerical investigation of nanofluid flow and heat transfer in a pillow plate heat exchanger using a two-phase model: Effects of the shape of the welding points used in the pillow plate. Journal of Applied Mathematics and Mechanics (ZAMM). 2024. Vol. 104. Issue 8.
- Zibart A., Kenig E.Y. Numerical investigation of conjugate heat transfer in a pillow-plate heat exchanger. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 165.
- Патент РФ №201068 U1. МПК F28F 3/00. Пластина теплообменника / Н.Ю. Саввин, Л.А. Куцев, М.В. Себренникова, И.В. Волабуев. Патентообл.: БГТУ. Заявл.: 29.07.2020; опубл.: 25.11.2020.
- ГОСТ Р 53583–2009. Приборы отопительные. Методы испытаний / Дата введ.: 01.06.2010.

References — see page 80.

Modified plate heat exchanger. Pp. 35–37.

Tatiana N. Ilyina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU, Belgorod); **Nikita Yu. Savvin**, PhD, Associate Professor, BSTU; **Olga A. Sotnikova**, PhD, Professor, Voronezh State Technical University (VSTU, Voronezh); **Denis Yu. Suslov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, BSTU

1. J.J. Klemeš, P.S. Varbanov, P.O. Kapustenko. New developments in heat integration and intensification, including total site, waste-to-energy, supply chains and fundamental concepts. *Applied Thermal Engineering*. 2013. Vol. 61. Issue 1. Pp. 1–6.
2. O.P. Arsenyeva, L. Čuček, L.L. Tovazhnyanskyy, P.O. Kapustenko, Y.A. Savchenko, S.K. Kusakov, O.I. Matsegora. Utilisation of waste heat from exhaust gases of drying process. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 2016. Vol. 10. Issue 1. Pp. 131–138.
3. N.Ju. Savvin. *Modelirovanie teploobmennogo protsessa v original'nom plastinchatom teploobmennike* [Modeling the heat exchange process in an original plate heat exchanger]. *Zhishchnoe khozjajstvo i kommunal'naja infrastruktura* ["Housing and public utilities infrastructure" Magazine]. 2023. No. 2. Pp. 37–46. [In Russian]
4. J.J. Klemeš, O.P. Arsenyeva, P.O. Kapustenko, L.L. Tovazhnyanskyy. Compact heat exchangers for energy transfer intensification. Low grade heat and fouling mitigation. 1st edition. CRC Press. Boca Raton, Florida, U.S. 2015. 372 p.
5. O.P. Arsenyeva, L.L. Tovazhnyanskyy, P.O. Kapustenko, G.L. Khavin. The generalized correlation for friction factor in criss-cross flow channels of plate heat exchangers. *Proc. of the 14th International Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES'11)*. May 8–11, 2011. Florence, Italy. 2011. Vol. 25. Pp. 399–404.
6. P.O. Kapustenko, O.P. Arsenyeva, O. Dolgonosova. The heat and momentum transfers relation in channels of plate heat exchangers. *Proc. of the 14th International Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES'11)*. May 8–11, 2011. Florence, Italy. 2011. Vol. 25. Pp. 357–362.
7. O.P. Arsenyeva, L.L. Tovazhnyanskyy, P.O. Kapustenko, O.V. Demirskiy. Generalised semi-empirical correlation for heat transfer in channels of plate heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 2014. Vol. 70. Pp. 1208–1215.
8. L. Garelli, G. Rios, J.J. Dorella, M.A. Storti. Heat transfer enhancement in panel type radiators using delta-wing vortex generators. *International Journal of Thermal Sciences*. 2019. Vol. 137. Pp. 64–74.
9. D. Kong, Y. Zhang, S. Liu. Convective heat transfer enhancement by novel honeycomb-core in sandwich panel exchanger fabricated by additive manufacturing. *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 163.
10. Y. Ma, H. Yan, G. Xie. Flow and thermal performance of sandwich panels with plate fins or/and pyramidal lattice. *Applied Thermal Engineering*. 2020. Vol. 164.
11. J.M. Tran, M. Piper, E.Y. Kenig. Single-phase flow and condensation in pillow-plate condensers. In: *Innovative Heat Exchangers*. Springer Cham. 2019. 394 p.
12. J.M. Tran, S. Sommerfeld, M. Piper, E.Y. Kenig. Investigation of pillow-plate condensers for the application in distillation columns. *Chemical Engineering Research and Design*. 2015. Vol. 99. Pp. 67–74.
13. R. Goedecke, S. Scholl. Modelling and simulation of a pillow plate thermosiphon reboiler. *Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 55. Pp. 95–104.
14. M. Piper, A. Zibart, E. Djakow, R. Springer, W. Homberg, E.Y. Kenig. Heat transfer enhancement in pillow-plate heat exchangers with dimpled surfaces: A numerical study. *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 153. Pp. 142–146.
15. Yu.A. Al-Turki, A. Yarmohammadi, A. Alizadeh, D. Toghraie. Numerical investigation of nanofluid flow and heat transfer in a pillow plate heat exchanger using a two-phase model: Effects of the shape of the welding points used in the pillow plate. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics (ZAMM)*. 2024. Vol. 104. Issue 8.
16. A. Zibart, E.Y. Kenig. Numerical investigation of conjugate heat transfer in a pillow-plate heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 165.
17. Patent of the RF No. 201068 U1. IPC F28F 3/00. *Plastina teploobmennika* [Heat exchanger plate]. N.Ju. Savvin, L.A. Kushchev, M.V. Serebrenikova, I.V. Volabuev. Patent holder: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU). Decl.: July 29, 2020; publ.: November 25, 2020. [In Russian]
18. GOST R 53583–2009 [The State Industry Standard of Russia No. 53583–2009]. *Pribory otopitel'nye. Metody ispytaniy* [Heating devices. Test methods]. Date of impl.: June 1, 2010. [In Russian]