УДК 66.045
DOI 10.47367/0021-3497_2025_2_260

ТЕПЛООБМЕННЫЕ ТРУБЫ НОВОГО ПРОФИЛЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

HEAT EXCHANGE PIPES OF A NEW PROFILE TO INCREASE THE EFFICIENCY OF HEAT POWER EQUIPMENT

И.Ю. ГОЛОВАНОВ, Д.Д. ДАЯНОВА, М.Г. ЛАГУТКИН, С.А. СОКОЛОВА, Ю.Г. ШЛЯХТЕНКОВ

I.YU. GOLOVANOV, D.D. DAYANOVA, M.G. LAGUTKIN, S.A. SOKOLOVA, YU.G. SHLIAKHTENKOV

(Московский политехнический университет)

(Moscow Polytechnic University)

E-mail: igol95@yandex.ru; diyanad@mail.ru

Одной из актуальных задач в текстильной промышленности является повышение эффективности теплоэнергетического оборудования. Данная задача включает в себя предложения по интенсификации теплообмена в оборудовании одновременно со снижением энергетических затрат при его эксплуатации. Авторами статьи предложен вариант повышения эффективности теплоэнергетического оборудования путем использования профильных теплообменных труб новой формы – эпитрохоиды. Труба такого сечения может быть получена из стандартной круглой трубы, при этом площадь поверхности профильной трубы будет значительно выше. На примере сравнительного анализа технологических параметров конструкций теплообменных аппаратов типа «труба в трубе» с круглой и профильной теплообменными трубами показана целесообразность использования труб-эпитрохоид в промышленном оборудовании. Теплообменный аппарат с профильной теплообменной трубой обладает большей интенсивностью процесса теплопередачи в сравнении с типовой конструкцией при тех же габаритных размерах и материалоемкости, что делает его перспективным для внедрения на предприятиях текстильной промышленности (например, для утилизации тепла сточных вод). В статье представлены графические материалы распределения температуры теплоносителей (воды) в трубном и межтрубном пространствах, а также напряжений, возникающих в теплообменной трубе в типовой и новой конструкциях теплообменных аппаратов, полученные в программном комплексе «SolidWorks».

One of the urgent tasks of modern industry and, in particular, the energy industry, is to increase the efficiency of heat and power equipment. This task includes proposals to intensify heat exchange in equipment at the same time as reducing

power consumption during its operation. The authors of the article proposed an option to increase the efficiency of heat and power equipment by using profile heat exchange tubes of a new shape - epitrochoids. A pipe of this cross section can be obtained from a standard round pipe, the surface area of the shaped pipe will be significantly higher. On the example of comparative analysis of process parameters of structures of heat exchangers of "pipe-in-pipe" type with round and shaped heat exchange pipes, the feasibility of using epitrochoid pipes in industrial equipment is shown. Heat exchange apparatus with shaped heat exchange tube has higher intensity of heat transfer process, in comparison with standard design, with the same overall dimensions and material consumption, it makes it promising for implementation in the textile industry (for example, wastewater cooling). The article presents graphic materials of the distribution of the temperature of coolants (water) in the tube and shell side, as well as stresses arising in the heat exchange tube in the standard and new designs of heat exchange apparatuses, obtained in the SolidWorks software complex.

Ключевые слова: эффективность теплоэнергетического оборудования, интенсификация теплообмена, труба с формой эпитрохоиды, увеличение поверхности теплопередачи, теплообменник «труба в трубе».

Keywords: efficiency of heat-power equipment, intensification of heat exchange, epitrochoid-shaped pipe, increase of heat transfer surface, “pipe in pipe” heat exchanger.

Введение

Оценке эффективности теплоэнергетического оборудования и методам ее повышения посвящено множество современных работ (например, [1…8]), что говорит об актуальности данного направления исследований. При этом предложения по повышению эффективности могут быть одновременно актуальны и применимы для различного оборудования: для кожухотрубчатых [1…2] теплообменных аппаратов, конструкций типа «труба в трубе» [3…5] и оборудования холодильной техники [6…8]. В настоящее время при разработке нового и совершенствовании существующего теплообменного оборудования используются различные подходы к оценке эффективности теплоэнергетического оборудования, включающие как проведение натурных экспериментов, так и метод конечных элементов с использованием компьютерного моделирования [9].

Основными методами повышения эффективности теплоэнергетического оборудования являются:

1. Пассивный. Например, снабжение конструкции теплообменного аппарата различными перегородками для увеличения пути теплоносителя. Площадь поверхности теплопередачи может быть увеличена путем ее снабжения ребрами. Также на пути теплоносителя могут быть распложены «турбулизаторы потока» – перегородки, ребра, канавки и выступы.

2. Активный. Например, использование пульсирующего потока теплоносителя. Применение вибрационных и перемешивающих теплоноситель устройств.

Большая часть предлагаемых решений направлена в первую очередь на совершенствование известного оборудования и не предусматривает существенного изменения элементов его конструкции.

Повышение энергосбережения на современных предприятиях является одной из наиболее важных задач современной промышленности. Причем наиболее актуальной данная задача является для производственных процессов с существенными энергетическими затратами (энергоемких).

К энергоемким относятся и предприятия текстильной промышленности. Различные методы и способы повышения энергосбережения в текстильной промышленности предлагаются во множестве публикаций, например в современных работах [10…13], что подчеркивает актуальность данного направления исследований.

Стоит отметить предложения по снижению энергоемкости предприятий текстильной промышленности путем повышения эффективности используемого теплоэнергетического оборудования, представленные в работах [13…15]. Так как теплообменное оборудование используется на всех предприятиях текстильной промышленности, подобные предложения позволят повысить энергосбережение для отрасли в целом. Причем в отличие от регенеративных теплообменных аппаратов [14], используемых в ряде отдельных технологических операций, рекуперативные теплообменные аппараты могут быть использованы на всех этапах производства изделий: от отделочных и красильных участков технологических линий до утилизации тепла сточных вод предприятия [14, 15]. Более того, в отделочном производстве на промывку расходуется до 20% тепловой энергии, и при этом велик расход чистой промывной воды, 80% которой идет в стоки [16].

В документе [17] приведен ряд технологических линий мировых предприятий текстильной промышленности, где отмечается существенное повышение энергосбережения путем внедрения рекуперативных теплообменных аппаратов с высокой эффективностью.

Целью настоящего исследования явилось повышение эффективности теплоэнергетического оборудования путем изменения одного из основных элементов, применяемого во многих конструкциях рекуперативных теплообменных аппаратов, – теплообменной трубы, а именно изменения ее поперечного сечения для повышения площади поверхности теплопередачи и интенсификации процесса теплопередачи. Такой подход позволит в дальнейшем комбинировать известные активные и пассивные методы, предлагаемые для повышения эффективности теплоэнергетического оборудования с теплообменными трубами круглого сечения.

Среди оборудования с теплообменными трубами наиболее простым по конструкции можно считать теплообменный аппарат типа «труба в трубе», основным недостатком которого являются большие габаритные размеры для обеспечения необходимой поверхности теплопередачи. В текстильной промышленности в настоящее время применяются теплообменные аппараты типа «труба в трубе» с развитой поверхностью теплопередачи (за счет наличия выемок и выступов на поверхности теплообменной трубы) от компании JBT FoodTech (США) [18].

На рис. 1 представлена конструкция типового теплообменного аппарата типа «труба в трубе» (1 – кожуховая труба; 2 – теплообменная труба; 3 – патрубок ввода второго теплоносителя в межтрубное пространство; 4 – патрубок вывода второго теплоносителя из межтрубного пространства; / – первый теплоноситель; // – второй теплоноситель).

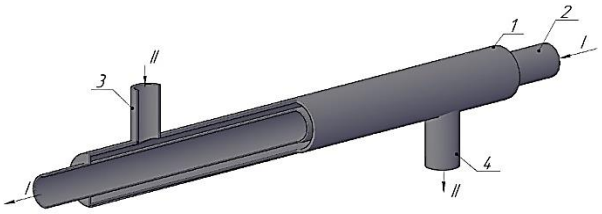

Рис. 1

При оценке эффективности процесса теплопередачи в рекуперативных теплообменных аппаратах учитывается количество передаваемого тепла, определяемое по основному уравнению теплопередачи [1]:

$$Q = KF\Delta t\,, \qquad (1)$$

где Q – количество передаваемого тепла в аппарате, Вт; K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м$^2\cdot$°С); F – площадь поверхности теплопередачи, м^2; Δt – средняя разность температур между горячим и холодным теплоносителями, °С.

Методы исследования

Оценку эффективности теплообменного аппарата проведем по показателю отношения потерь мощности W к количеству передаваемого тепла Q:

$$\Delta W = \frac{W}{Q}, \qquad (2)$$

где W – потери мощности на перекачивание теплоносителей при эксплуатации теплообменного аппарата, Вт; ΔW – удельные потери мощности при эксплуатации теплообменного аппарата, Вт/Вт.

Таким образом, показатель будет определять количество затрачиваемой мощности на преодоление гидравлического сопротивления трубного и межтрубного пространств, необходимое для передачи 1 Вт тепла между теплоносителями в аппарате. Чем меньше итоговая величина показателя, тем более целесообразным является использование данного теплообменного аппарата при заданных условиях [5].

Потерю мощности на перекачивание теплоносителей в конструкции типа «труба в трубе» можно определить по следующему уравнению [5]:

$$W = V_1 \Delta P_1 + V_2 \Delta P_2, \qquad (3)$$

где V_1 – объемный расход первого теплоносителя, м^3/с; ΔP_1 – потери давления при перекачивании первого теплоносителя, Па; V_2 – объемный расход второго теплоносителя, м^3/с; ΔP_2 – потери давления при перекачивании второго теплоносителя, Па.

Типовая конструкция аппарата

Проведем анализ технологических параметров работы типового теплообменного аппарата типа «труба в трубе» [5] с использованием компьютерного моделирования в программном комплексе «SolidWorks».

В типовой конструкции [5] кожуховая труба Ø57×4 мм имеет длину 1400 мм; теплообменная труба Ø25×3 мм имеет длину 1500 мм; патрубки межтрубного пространства выполнены длиной 155 мм из трубы Ø32×4 мм.

При моделировании зададимся следующими исходными данными: теплоносители трубного и межтрубного пространств – вода; температура воды на входе в трубное пространство $t_{1вх}$ – 60,0 °С; температура воды на входе в межтрубное пространство $t_{2вх}$ – 20,0 °С; скорость воды на входе в трубное и межтрубное пространства – 1,0 м/с; материал теплообменного аппарата – сталь марки 08Х18Н10Т (AISI 304); теплоемкость стали марки 08Х18Н10Т – 502 Дж/(кг·°С); коэффициент теплопроводности стали марки 08Х18Н10Т – 16,3 Вт/(м·°С); площадь поверхности теплопередачи F – 0,110 м^2; длина греющей части теплообменной трубы – 1400 мм.

По результатам проведенного компьютерного моделирования получены следующие данные: температура воды на выходе из трубного пространства $t_{1вых}$ – 56,6 °С; температура воды на выходе из межтрубного пространства $t_{2вых}$ – 22,0 °С; потери давления в трубном пространстве ΔP_1 – 869 Па; потери давления в межтрубном пространстве ΔP_2 – 1137 Па; объемный расход воды в трубном пространстве V_1 – $2{,}824 \cdot 10^{-4}$ м^3/с; объемный расход воды в межтрубном пространстве V_2 – $4{,}506 \cdot 10^{-4}$ м^3/с; площадь поверхности теплопередачи F – $1099{,}557 \cdot 10^{-4}$ м^2; количество передаваемого тепла Q – 3880 Вт.

Из полученных данных следует, что удельные потери мощности ΔW (2) при эксплуатации типовой конструкции теплообменного аппарата типа «труба в трубе» составляют $1{,}954 \cdot 10^{-4}$ Вт/Вт.

Определим среднюю разность температур между горячим и холодным теплоносителями Δt (1) по следующему уравнению [1]:

$$\Delta t = \frac{(t_{1вх} - t_{2вх}) + (t_{1вых} - t_{2вых})}{2}, \qquad (4)$$

На рис. 2 и рис. 3 соответственно представлено распределение температуры потоков теплоносителей в поперечном сечении межтрубного и трубного пространств теплообменного аппарата по центру длины труб (1 – кожуховая труба; 2 – теплообменная труба).

Из рис. 2 следует, что распределение температуры теплоносителя (воды) по поперечному сечению межтрубного пространства неравномерно ввиду неравномерного распределения скорости потока.

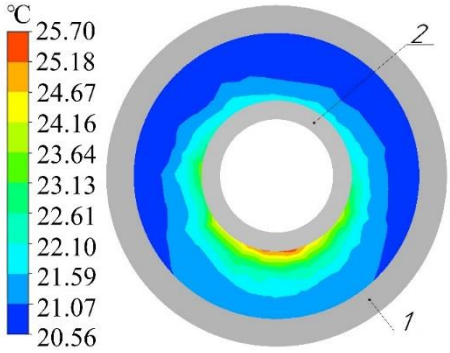

Рис. 2

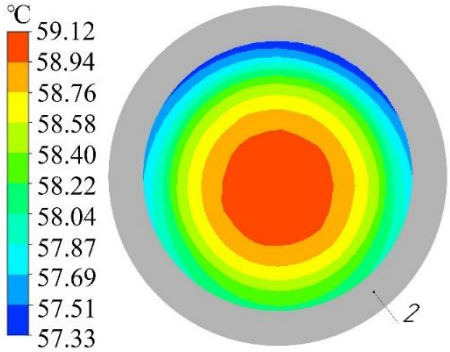

Рис. 3

Новая конструкция аппарата

Изменим форму поперечного сечения теплообменной трубы по всей ее длине на укороченную эпитрохоиду с восемью лепестками согласно патенту [19]. Изготовление трубы такого профиля возможно путем прокатки круглой трубы [20]. Тогда поперечное сечение полученной трубы будет вписано в поперечное сечение круглой. Такое решение одновременно позволит увеличить площадь поверхности теплопередачи F, гидравлический диаметр межтрубного пространства и выровнять распределение скорости потока в межтрубном пространстве в теплообменном аппарате.

Проведем компьютерное моделирование с исходными данными ($t_{1вх}$, $t_{2вх}$, материал теплообменного аппарата), а также объемными расходами V_1, V_2, соответствующими данным при моделировании типовой конструкции.

Получаем следующие результаты моделирования: температура воды на выходе из трубного пространства $t_{1вых}$ – 56,5 °С; температура воды на выходе из межтрубного пространства $t_{2вых}$ – 22,1 °С; потери давления в трубном пространстве ΔP_1 – 984 Па; потери давления в межтрубном пространстве ΔP_2 – 1147 Па; площадь поверхности теплопередачи F составляет $1114{,}309 \cdot 10^{-4}$ м^2; количество передаваемого тепла Q – 4073 Вт.

Удельные потери мощности ΔW (2) при эксплуатации конструкции аппарата с профильной теплообменной трубой составят $1{,}951 \cdot 10^{-4}$ Вт/Вт.

С использованием уравнения (4) определяем Δt – 37,2 °С. По уравнению (1) получаем K, равный 983 Вт/(м$^2 \cdot$ °С).

На рис. 4 и рис. 5 соответственно представлено распределение температуры теплоносителей в поперечном сечении межтрубного и трубного пространств нового теплообменного аппарата по центру длины труб (1 – кожуховая труба; 2 – теплообменная труба).

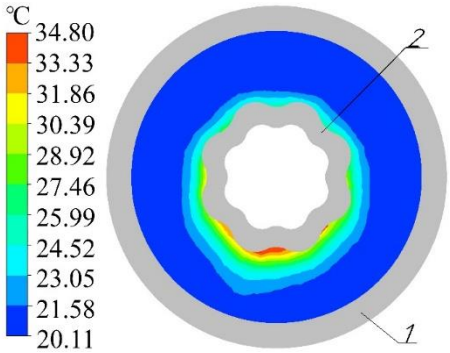

Рис. 4

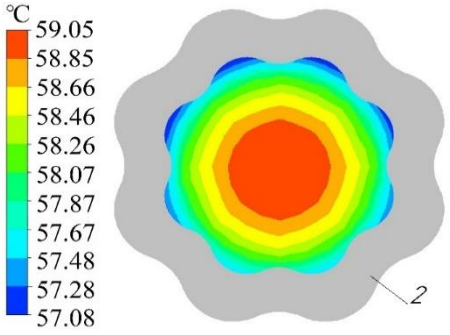

Рис. 5

Из рис. 4 видно выравнивание температуры теплоносителя по сечению межтрубного пространства теплообменного аппарата.

Обсуждение результатов

Конструкция теплообменного аппарата по патенту [19] незначительно снижает показатель Δt (4) в сравнении с типовой кон-

струкцией. При этом существенно увеличивается коэффициент теплопередачи K и соответственно уменьшается необходимая поверхность теплопередачи F (1). Количество передаваемого тепла Q (1) увеличивается на 9,1%. Таким образом, даже с учетом возрастающих потерь давления ΔP_1, ΔP_2 и, следовательно, возрастающих потерь мощности на перекачивание теплоносителей W (3) разработанная конструкция обеспечивает лучшую эффективность, так как уменьшается показатель ΔW (2).

Моделирование напряжений в аппаратах

ТУ 3612-014-00220302-99 устанавливает максимальные давления при эксплуатации теплообменных аппаратов типа «труба в трубе» в зависимости от характеристик их конструкции и материального исполнения. Следовательно, новая конструкция теплообменного аппарата так же должна соответствовать заявленным требованиям. Так, давление внутри теплообменной трубы не должно превышать 16 МПа, внутри кожуховой трубы – не более 10 МПа.

Так как новый теплообменный аппарат отличается от типового только формой теплообменной трубы, его соответствие требованиям ТУ 3612-014-00220302-99 можно определить заданием внутреннего и наружного давлений в компьютерной модели теплообменной трубы-эпитрохоиды (при заданных диаметре и толщине стенки).

На рис. 6 и рис. 7 показано распределение напряжения в стенке круглой теплообменной трубы и стенке трубы-эпитрохоиды соответственно (в поперечном сечении теплообменного аппарата по центру длины труб) при внутреннем давлении 16 МПа.

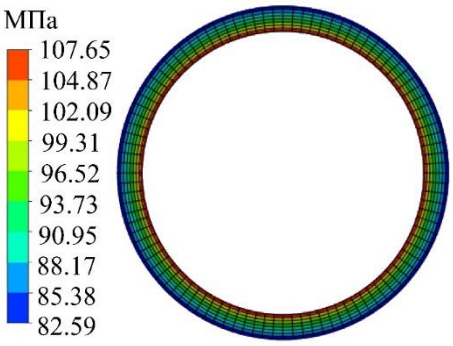

Рис. 6

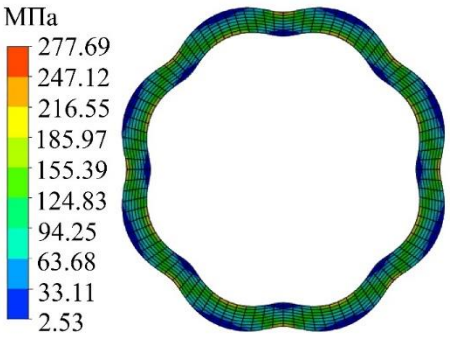

Рис. 7

В табл. 1 приведены допускаемые (согласно документу ГОСТ 34233.1–2017) и максимальные действующие напряжения в стенках теплообменных труб (круглой и трубы-эпитрохоиды) при их минимальных (Ø25×3 мм) и максимальных (Ø159×12 мм) размерах, указанных в ТУ 3612-014-00220302-99.

Таблица 1

Характеристика	Круглая труба	Труба-эпитрохоида
Максимальное действующее напряжение при наружном давлении 1,6 МПа в трубе Ø25×3 мм, МПа	7,59	11,99
Максимальное действующее напряжение при внутреннем давлении 1,6 МПа в трубе Ø25×3 мм, МПа	6,94	11,31
Максимальное действующее напряжение при наружном давлении 10 МПа в трубе Ø159×12 мм, МПа	84,19	178,43
Максимальное действующее напряжение при внутреннем давлении 16 МПа в трубе Ø159×12 мм, МПа	107,65	277,69
Допускаемое напряжение для стали марки 08Х18Н10Т при 60 оС, МПа (согласно ГОСТ 34233.1–2017)	160,50	160,50
Предел текучести для стали марки 08Х18Н10Т при 60 оС, МПа (согласно ГОСТ 34233.1–2017)	240,75	240,75

По полученным результатам (табл. 1, рис. 7) действующее напряжение в стенке трубы-эпитрохоиды (Ø159×12 мм) превышает допускаемое напряжение и предел текучести для стали марки 08Х18Н10Т. Согласно пункту 4.5 ГОСТ 34233.1–2017 для подтверждения прочности, устойчивости и работоспособности конструкции может быть использовано численное моделирование ее напряженно-деформированного состояния. При этом согласно пункту 6.3 для элементов аппарата, разделяющих пространства с разными давлениями (в том числе теплообменных аппаратов типа «труба в трубе»), при обеспечивании одновременного действия давлений допускается проводить расчет на разность давлений.

Таким образом, максимальные допускаемые давления должны быть определены при проектировании разработанной конструкции теплообменного аппарата с учетом ГОСТ 34233.1–2017.

ВЫВОДЫ

На примере теплообменного аппарата типа «труба в трубе» с использованием компьютерного моделирования подтверждено, что применение профильных теплообменных труб позволяет повысить эффективность теплоэнергетического оборудования, в том числе текстильного производства. При равных габаритных размерах и капитальных затратах на изготовление разработанного и типового теплообменного аппаратов, соизмеримых удельных энергетических затратах новая конструкция позволяет повысить количество передаваемого тепла в рассматриваемом примере в 4073 Вт / 3880 Вт = 1,05 раз. Внедрение на предприятиях текстильной промышленности теплоэнергетического оборудования повышенной эффективности, такого как разработанный теплообменный аппарат, позволит повысить энергосбережение отрасли в целом. Расчет на прочность новой конструкции теплообменного аппарата должен проводиться с использованием численного моделирования напряженно-деформированного состояния конструкции в соответствии с ГОСТ 34233.1–2017.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лагуткин М.Г., Баранова Е.Ю., Мишачкин Д.И., Наумов В.Н.* Повышение эффективности кожухотрубчатого теплообменника с учетом снижения энергозатрат // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2021. № 9. С. 3…6.

2. *Marzouk S.A., Abou Al-Sood M.M., El-Said E.M.S. etc.* A comprehensive review of methods of heat transfer enhancement in shell and tube heat exchangers // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2023. V. 148. N. 15. P. 7539…7578.

3. *Al-Zahrani S.* Heat transfer characteristics of innovative configurations of double pipe heat exchanger // Heat and Mass Transfer. 2023. V. 59. N. 9. P. 1661…1675.

4. *Alfwzan W.F., Alomani G.A., Alessa L.A., Selim M.M.* Sensitivity analysis and design optimization of nanofluid heat transfer in a shell-and-tube heat exchanger for solar thermal energy systems: a statistical approach // Arabian Journal for Science and Engineering. 2023. V. 49. N. 7. P. 9831…9847.

5. *Занина К.О., Лагуткин М.Г., Юрицына А.М., Голованов И.Ю.* Анализ вариантов оребрения двухтрубного теплообменного аппарата для повышения эффективности процесса // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2024. № 3 (48). С. 19…25.

6. *Угольникова М.А., Чернявская В.В.* Исследование динамики образования водного льда при работе емкостных криоконцентраторов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2021. № 7. С. 20…22.

7. *Сапожников В.Б., Угольникова М.А., Чернявская В.В.* Оценка эффективности работы устройств низкотемпературного разделения жидких сред при двухступенчатом вымораживании с предварительным охлаждением // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2023. № 2. С. 23…25.

8. *Ходяшов Е.О., Тюрин М.П., Седляров О.И., Бородина Е.С.* Моделирование конвективного теплообменного аппарата с целью повышения его энергоэффективности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2024. № 3 (411). С. 218…225.

9. *Bhattacharyya S., Vishwakarma D.K., Srinivasan A. etc.* Thermal performance enhancement in heat exchangers using active and passive techniques: a detailed review // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2022. V. 147. N. 17. P. 9229…9281.

10. *Gunturu, K.P.K., Kota K.K., Sharma M.* Energy Efficiency Improvement Opportunities in Indian Textile Industries // Textile and Leather Review. 2022. V. 5. P. 296…326.

11. *Турсунов А.Ш., Абдурахимов Д.Р.* Возможности повышения энергоэффективности в текстильной отрасли // Экономика и социум. 2021. № 11-2(90). С. 484…491.

12. *Горшков А.С., Агеева Е.А., Титова Л.В.* К вопросу об актуальности повышения эффективности использования энергетических ресурсов на предприятиях текстильной и легкой промышленности //

Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2021. № 3. С. 47…50.

13. *Агеева Е.А.* Способы снижения энергоемкости продукции, выпускаемой на предприятиях текстильной и легкой промышленности // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2022. № 2. С. 32…43.

14. Пат. SU 1758120 A1. Насадка для регенеративного теплообменного аппарата.

15. *Романюк В.Н., Муслина Д.Б.* О совершенствовании энергообеспечения аппаратов периодического крашения на предприятиях легкой промышленности // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2016. Т. 59. № 1. С. 25…45.

16. *Сажин Б.С., Федосов С.В., Кошелева М.К.* Формирование научных направлений и отражение научных достижений в области повышения эффективности тепломассообменных процессов, экологической и производственной безопасности текстильных производств в разделе "Экологическая и производственная безопасность. Промтеплоэнергетика" // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2018. №4 (376). С. 116…122.

17. https://www.energystar.gov/sites/default/files/buildings/tools/EE_Guidebook_for_Textile_industry.pdf (дата обращения 20.11.2024).

18. *Попов И.А., Махянов Х.М., Гуреев В.М.* Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена: монография / под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. 560 с.

19. Пат. RU 222588 U1. Теплообменный аппарат типа «труба в трубе».

20. *Моисеев А.А., Соколова О.В., Лепестов А.Е.* Особенности получения сложных замкнутых профилей из круглой трубы методом непрерывной валковой формовки // Сталь. 2018. № 11. С. 32…34.

REFERENCES

1. *Lagutkin M.G., Baranova E.Yu., Mishachkin D.I., Naumov V.N.* Increasing efficiency of shell-and-tube heat exchanger taking account of energy consumption reduction // Chemical and Petroleum Engineering. 2022. V. 57. N. 9-10. P. 713…719.

2. *Marzouk S.A., Abou Al-Sood M.M., El-Said E.M.S. etc.* A comprehensive review of methods of heat transfer enhancement in shell and tube heat exchangers // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2023. V. 148. N. 15. P. 7539…7578.

3. *Al-Zahrani S.* Heat transfer characteristics of innovative configurations of double pipe heat exchanger // Heat and Mass Transfer. 2023. V. 59. N. 9. P. 1661…1675.

4. *Alfwzan W.F., Alomani G.A., Alessa L.A., Selim M.M.* Sensitivity analysis and design optimization of nanofluid heat transfer in a shell-and-tube heat exchanger for solar thermal energy systems: a statistical approach // Arabian Journal for Science and Engineering. 2023. V. 49. N. 7. P. 9831…9847.

5. *Zanina K.O., Lagutkin M.G., Yuritsyna A.M., Golovanov I.Yu.* Analysis of two-pipe heat exchanger finning options to improve process efficiency // Energy and resource saving: industry and transport. 2024. № 3 (48). P. 19…25.

6. *Ugolnikova M.A., Chernyavskaya V.V.* Dynamics of water ice formation during the operation of vessel cryoconcentrators // Chemical and Petroleum Engineering. 2021. V. 57. N. 7-8. P. 561…566.

7. *Sapozhnikov V.B., Ugolnikova M.A., Chernyavskaya V.V.* Evaluating the performance of low-temperature liquid separation devices with two-stage refrigeration and pre-cooling // Chemical and Petroleum Engineering. 2023. V. 59. N. 1-2. P. 134…138.

8. *Khodyashov E.O., Tyurin M.P., Sedlyarov O.I., Borodina E.S.* Modeling of a convective heat exchanger to improve its energy efficiency // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2024. № 3 (411). P. 218…225.

9. *Bhattacharyya S., Vishwakarma D.K., Srinivasan A. etc.* Thermal performance enhancement in heat exchangers using active and passive techniques: a detailed review // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2022. V. 147. N. 17. P. 9229…9281.

10. *Gunturu, K.P.K., Kota K.K., Sharma M.* Energy Efficiency Improvement Opportunities in Indian Textile Industries // Textile and Leather Review. 2022. V. 5. P. 296…326.

11. *Tursunov A.S., Abdurakhimov D.R.* Energy efficiency opportunities in the textile industry // Economics and society. 2021. N. 11-2(90). P. 484…491.

12. *Gorshkov A.S., Ageeva E.A., Titova L.V.* On the issue of the relevance of increasing the efficiency of the use of energy resources in textile and light industry enterprises // Bulletin of the St. Petersburg State Univerъsity of Technology and Design. Series 4: Industrial Technologies. 2021. N. 3. P. 47…50.

13. *Ageeva E.A.* Ways to reduce the energy intensity of products manufactured in the textile and light industry // Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial Technologies. 2022. N. 2. P. 32…43.

14. Pat. SU 1758120 A1. Nozzle for regenerative heat exchanger.

15. *Romanyuk V.N., Muslina D.B.* On improving the energy supply of periodic dyeing machines in light industry enterprises // Energy. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS. 2016. V. 59. N. 1. P. 25…45.

16. *Sazhin B.S., Fedosov S.V., Kosheleva M.K.* Formation of scientific directions and reflection of scientific achievements in the field of increasing efficiency of thermal-mass-exchange processes, environmental and production security of textile production in section "Ecological and industrial safety. Heat engineering" // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2018. № 4 (376). P. 116…122.

17. https://www.energystar.gov/sites/default/files/buildings/tools/EE_Guidebook_for_Textile_industry.pdf (accessed on 20.11.2024).

18. *Popov I.A., Makhyanov H.M., Gureev V.M.* Physical foundations and industrial application of heat exchange intensification: monograph / Under the gen. edit. Yu.F. Gortyshov Kazan: Center of innovative technologies. 2009. 560 p.

19. Pat. RU 222588 U1. Pipe-in-pipe heat exchanger.

20. *Moiseev A.A., Sokolova O.V., Lepestov A.E.* Peculiarities of obtaining complex closed profiles from a round pipe by the method of continuous roll forming // Steel. 2018. N. 11. P. 32…34.

Рекомендована кафедрой экологической безопасности технических систем Московского политехнического университета. Поступила 04.02.25.