

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 637.14



DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-22-30

Оригинальная статья /Original article

**Оценка влияния интенсификаторов теплообмена
на энергомассовую эффективность кристаллизаторов**

В.В. Чернявская, В.Б. Сапожников, И.Ю. Голованов, М.А. Угольникова

Московский политехнический университет,
107023, г. Москва, ул. Большая Семёновская, 38, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является оценка наличия и формы интенсификаторов теплообмена в кристаллизаторе объемного типа конструкции «труба в трубе». **Метод.** Исследование основано на методах термодинамического анализа, натурального и вычислительного моделирования процессов с использованием компьютерного моделирования. **Результат.** Показано, что наиболее важным параметром теплообменных аппаратов, вне зависимости от протекающего в них процесса, является количество передаваемой теплоты в единицу времени, то есть тепловая мощность, которая прямо пропорциональна площади поверхности теплообмена. Представлены результаты оценки влияния наличия и формы интенсификаторов теплообмена на удельную массу кристаллизатора и мощность, требуемую для перекачки хладоносителя (применительно к ёмкостному типу конструкции с намораживанием льда на внутренней поверхности теплообменной трубы) на основании результатов компьютерного моделирования. **Вывод.** Получены две формы интенсификаторов теплообмена, обеспечивающих минимальные значения представленных показателей энергомассовой эффективности кристаллизатора.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, конструкция типа «труба в трубе», интенсификаторы теплообмена, кристаллизатор, энергомассовая эффективность

Для цитирования: В.В.Чернявская, В.Б.Сапожников, И.Ю.Голованов, М.А. Угольникова. Оценка влияния интенсификаторов теплообмена на энергомассовую эффективность кристаллизаторов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(1):22-30. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-22-30

**Assessment of the effect of heat transfer intensifiers
on the energy and mass efficiency of crystallizers**

V.V. Chernyavskaya, V.B. Sapozhnikov, I.Yu. Golovanov, M.A. Ugolnikova

Moscow Polytechnic University,
38 Bolshaya Semyonovskaya St., Moscow 107023, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to assess the presence and form of heat transfer intensifiers in a volumetric crystallizer of the "pipe in a pipe" design. **Method.** The study is based on the method of thermodynamic analysis, natural and computational modeling of processes using computer modeling. **Result.** It is shown that the most important parameter of heat exchangers (regardless of the process) is the amount of heat transferred per unit of time (thermal power, which is directly proportional to the surface area of the heat exchange). The article presents the results of evaluating the effect of the presence and form of heat transfer intensifiers on the mass of the Crystallizer and the power required for pumping the coolant (when freezing ice on the inner surface of the heat exchanger tube) based on the results of computer modeling. **Conclusion.** Two forms of heat transfer intensifiers providing the best energy and mass efficiency of crystallizers are presented.

Keywords: heat exchanger, pipe-in-pipe design, heat transfer intensifiers, crystallizer, energy and mass efficiency.

For citation: V.V. Chernyavskaya, V.B. Sapozhnikov, I.Yu. Golovanov, M.A. Ugolnikova. Assessment of the effect of heat transfer intensifiers on the energy and mass efficiency of crystallizers. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(1):22-30. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-22-30

Введение. В настоящее время актуальной задачей для всех отраслей промышленности является совершенствование теплообменных аппаратов. Одним из распространённых типов теплообменных аппаратов являются конструкции типа «труба в трубе», которые могут использоваться при проведении процессов нагрева, охлаждения, конденсации и кристаллизации различных рабочих сред.

Конструкция типа «труба в трубе» широко распространена во всех отраслях промышленности ввиду своей простоты и надёжности. Такая конструкция может использоваться при реализации процессов, включающих, в том числе, фазовый переход рабочих сред, что позволяет применять теплообменный аппарат для их конденсации и кристаллизации. Следовательно, в подобных конструкциях возможно проводить намораживание льда на внутренней поверхности теплообменной трубы, что делает их подходящими для использования в качестве кристаллизатора в ледогенераторах и криоконцентраторах.

Постановка задачи. Типовая конструкция неразборного двухтрубного теплообменного аппарата типа «труба в трубе» представлена на рис. 1 [1-3].

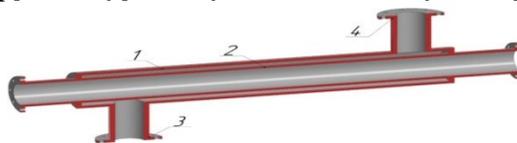


Рис. 1 - Типовая конструкция теплообменного аппарата типа «труба в трубе»:
1 – Кожуховая труба; 2 – Теплообменная труба; 3 – Патрубок входа второго теплоносителя;
4 – Патрубок выхода второго теплоносителя

Fig. 1 - Typical design of a "pipe in a pipe" type heat exchanger: 1 – Casing pipe;
2 – Heat exchange pipe; 3 – Inlet pipe of the second coolant; 4 – Outlet pipe of the second coolant

Данный аппарат работает следующим образом: в трубу 2 подается первый теплоноситель, затем через патрубок входа второго теплоносителя 3 в кожуховую трубу 1 подается второй теплоноситель, который после прохождения по межтрубному пространству выводится через патрубок выхода второго теплоносителя 4. В результате чего происходит теплообмен между первым и вторым теплоносителями через теплообменную трубу 2.

При разработке новых и совершенствовании известных теплообменных аппаратов наибольшее внимание уделяется увеличению их теплообменной мощности при заданных габаритных размерах конструкции [4]:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где Q – теплообменная мощность аппарата, Вт; K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); F – площадь поверхности теплообмена, м²; Δt – средняя разность температур между горячим и холодным теплоносителями, К.

В ряде патентов CN101566437A, CN117804079A, GB1056075A, RU149737U1, US2012199326A1, US3612002A и статьях [5-10] предлагается интенсификация процесса теплообмена между теплоносителями путём закрепления на поверхности теплообменной трубы «интенсификаторов теплообмена» – элементов различной формы, например, стержней. Такое решение позволяет увеличить площадь поверхности теплообмена F (и, следовательно, увеличить теплообменную мощность Q) без увеличения габаритов теплообменного аппарата (конструкция становится компактнее). Интенсификаторы могут быть расположены как на внешней, так и на внутренней поверхностях теплообменной трубы. Недостатками наличия интенсификаторов в конструкции теплообменного аппарата являются увеличение его массы и возрастание затрат энергии на перекачку теплоносителей при его эксплуатации.

Методы исследования. Оценить рациональность решения по повышению эффективности работы теплообменного аппарата можно как по результатам натуральных экспериментов (включая исследования на действующих образцах), так и с использованием компьютерного моделирования [11-19]. При этом стоит учитывать, что точность компьютерного моделирования снижается при наличии фазового перехода теплоносителей в аппарате. Следовательно, для оценки эффективности работы теплообменных аппаратов с фазовым переходом, целесообразно проведение натурального эксперимента. Однако, компьютерное моделирование позволяет дать предварительную оценку целесообразности применения конкретной конструкции аппарата в заданных условиях эксплуатации.

Например, с высокой точностью может быть определена мощность, требуемая для перекачки теплоносителя, не совершающего фазовый переход. В качестве критериев предварительной оценки могут быть использованы удельные показатели, характеризующие энергомассовую эффективность конструкции теплообменного аппарата [20-21]:

– отношение мощности, требуемой для перекачки теплоносителя при эксплуатации теплообменного аппарата, к его площади поверхности теплообмена:

$$W_{\text{э}} = \frac{W}{F}, \quad (2)$$

где $W_{\text{э}}$ – удельная мощность, требуемая для перекачки теплоносителя при эксплуатации теплообменного аппарата при его заданной площади поверхности теплообмена (из условия необходимой тепловой мощности Q), Вт/м²; W – мощность, требуемая для перекачки теплоносителя при эксплуатации теплообменного аппарата, Вт.

– отношение массы теплообменного аппарата к его площади поверхности теплообмена:

$$m_{\text{э}} = \frac{m}{F}, \quad (3)$$

где $m_{\text{э}}$ – массовая эффективность (масса, необходимая для получения единицы площади поверхности теплообмена в теплообменном аппарате), кг/м²; m – масса теплообменного аппарата, кг.

Очевидно, что оба этих показателя для повышения энергомассовой эффективности теплообменника при заданной тепловой мощности следует минимизировать.

Проведём оценку энергомассовой эффективности с использованием компьютерного моделирования в программном комплексе «SolidWorks» типового теплообменного аппарата (рис. 1) при использовании в качестве кристаллизатора в ледогенераторах и криоконцентраторах с намораживанием льда на внутренней поверхности теплообменной трубы. Фазовый переход (а именно, кристаллизация исходного продукта) будет проходить только внутри теплообменной трубы.

Следовательно, энергоэффективность кристаллизатора по показателю $W_{\text{э}}$ (2) можно оценить, приняв W как мощность, требуемую для перекачки хладоносителя в межтрубном пространстве и определяемую по известной формуле [4]:

$$W = V \cdot \Delta P, \quad (4)$$

где V – объёмный расход хладоносителя в межтрубном пространстве, м³/с; ΔP – гидравлическое сопротивление при движении хладоносителя в межтрубном пространстве, Па.

При моделировании используем следующие конструктивные параметры кристаллизатора: конструкция расположена горизонтально; 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; длина охлаждающей части теплообменной трубы – 1400 мм; материал кристаллизатора – сталь марки 08X18H10T (AISI 304) с плотностью 7740 кг/м³. Тогда получаем площадь поверхности теплообмена $F = 0,110$ м²; масса кристаллизатора – 10,49 кг.

Зададим исходные данные для компьютерного моделирования: плотность хладоносителя межтрубного пространства – 998 кг/м³; скорость хладоносителя на входе

в межтрубное пространство – 1,0 м/с. С учётом конструктивных параметров кристаллизатора объёмный расход хладоносителя в межтрубном пространстве V составит $4,506 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$.

Обсуждение результатов. По результатам компьютерного моделирования получаем гидравлическое сопротивление в межтрубном пространстве ΔP – 1137 Па. Мощность, требуемая для перекачки хладоносителя W (4), равна 0,513 Вт. Из полученных данных следует, что энергоэффективность $W_{\text{э}}$ (2) типовой конструкции кристаллизатора составляет 4,661 Вт/м²; массовая эффективность $m_{\text{э}}$ (3) равна 95,41 кг/м².

На рис. 2 представлено распределение скорости хладоносителя в межтрубном пространстве кристаллизатора.

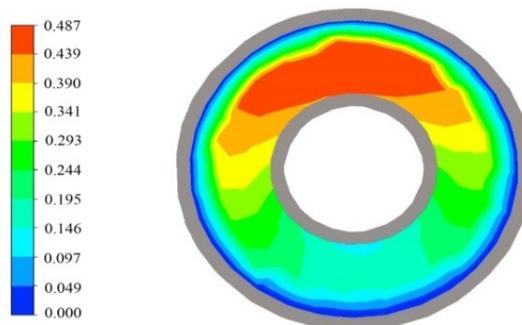


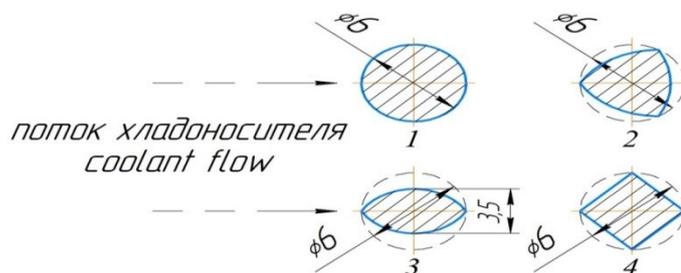
Рис. 2 - Распределение скорости хладоносителя в поперечном сечении типовой конструкции кристаллизатора (м/с)

Fig. 2 - Distribution of coolant velocity in the cross section of a typical crystallizer design (m/s)

Из рис. 2 можно сделать вывод о неравномерности движения хладоносителя по поперечному сечению кристаллизатора. Данный фактор может негативно сказываться как на потерях энергии W , так и на интенсивности теплообмена в кристаллизаторе.

Важной задачей для промышленности является разработка решений, направленных на повышение энергомассовой эффективности оборудования [22-25], в частности по удельным показателям $W_{\text{э}}$ (2) и $m_{\text{э}}$ (3). В кристаллизаторах конструкции типа «труба в трубе» улучшение этих показателей одновременно с выравниванием скорости хладоносителя в межтрубном пространстве может быть достигнуто путём снабжения поверхности теплообмена интенсификаторами теплообмена. Так как наличие интенсификаторов на внутренней поверхности теплообменной трубы будет затруднять извлечение льда из кристаллизатора, снабдим интенсификаторами типовую конструкцию (рис. 1) только по наружной поверхности теплообменной трубы.

В качестве интенсификаторов теплообмена рассмотрим стержни с формой поперечного сечения по патентам RU135101U1, RU226381U1, RU227391U1, а также квадратной формы, вписанных в окружность диаметром 6 мм (рис. 3).



**Рис. 3 - Форма поперечного сечения стержней-интенсификаторов теплообмена:
 1 – По патенту RU135101U1; 2 – По патенту RU226381U1; 3 – По патенту RU227391U1;
 4 – Квадратной формы**

**Fig. 3 - The form of the cross-section of the heat transfer intensifier rods:
 1 – According to patent RU135101U1; 2 – According to patent RU226381U1;
 3 – According to patent RU227391U1; 4 – Square form**

Для проведения компьютерного моделирования примем следующие конструктивные параметры кристаллизаторов с интенсификаторами теплообмена: высота стержней 6 мм (половина расстояния между наружной поверхностью стенки теплообменной трубы и внутренней поверхностью стенки кожуховой трубы); стержни расположены по всей длине теплообменной трубы с расстоянием между их центрами равным 50 мм; общее количество стержней – 108 шт.

Компьютерное моделирование конструкций с интенсификаторами будем проводить с материалом кристаллизатора и объёмным расходом хладоносителя V , соответствующими данным при моделировании типовой конструкции.

В патенте RU135101U1 (рис. 3, а) предлагаются интенсификаторы теплообмена в виде стержней круглого поперечного сечения. Тогда площадь поверхности теплообмена составит $F = 0,122 \text{ м}^2$, а масса кристаллизатора – 10,64 кг.

По результатам компьютерного моделирования конструкции по патенту RU135101U1 получаем ΔP равное 1261 Па. Энергоэффективность $W_{\text{э}}$ (2) составляет 4,635 Вт/м²; а массовая эффективность $m_{\text{э}}$ (3) – 86,75 кг/м².

Изменим форму поперечного сечения стержней с круглой на треугольник Рёло, согласно патенту RU226381U1 (рис. 3, б). Тогда площадь поверхности теплообмена F составит 0,120 м², а масса кристаллизатора будет равна 10,59 кг.

Получаем гидравлическое сопротивление в межтрубном пространстве ΔP равное 1248 Па. Энергоэффективность $W_{\text{э}}$ (2) кристаллизатора по патенту RU226381U1 равна 4,656 Вт/м²; а массовая эффективность $m_{\text{э}}$ (3) – 87,67 кг/м².

Далее проведём моделирование конструкции с поперечным сечением стержня-интенсификатора, полученным путём объединения двух треугольников Рёло до формы, близкой к ромбической, согласно патенту RU227391U1 (рис. 3, в). Тогда площадь поверхности теплообмена F составит 0,119 м², а масса кристаллизатора – 10,57 кг.

Гидравлическое сопротивление в межтрубном пространстве ΔP кристаллизатора по патенту RU227391U1 равно 1176 Па. Энергоэффективность $W_{\text{э}}$ (2) составляет 4,436 Вт/м²; а массовая эффективность $m_{\text{э}}$ (3) – 88,43 кг/м².

Рассмотрим также квадратную форму поперечного сечения стержня (рис. 3, г). Тогда площадь поверхности теплообмена составит $F = 0,121 \text{ м}^2$, а масса – 10,58 кг.

Гидравлическое сопротивление в межтрубном пространстве ΔP составляет 1318 Па. Энергоэффективность $W_{\text{э}}$ (2) равна 4,901 Вт/м²; а массовая эффективность $m_{\text{э}}$ (3) – 87,29 кг/м². Для удобства представим полученные результаты в табл.1.

Таблица 1. Показатели энергомассовой эффективности кристаллизаторов

Table 1. Indicators of energy and mass efficiency of crystallizers

Удельный показатель Specific indicator	Типовая конструкция Typical design	Форма поперечного сечения стержня-интенсификатора теплообмена Cross-sectional shape of heat exchange intensifier rod			
		Круглая Round	Треугольник Рёло Reuleaux triangle	Ромбическая из двух треугольников Рёло Rhombic of two Reuleaux triangles	Квадратная Square
$W_{\text{э}}$ (2), Вт/м ²	4,661	4,635	4,656	4,436	4,901
$m_{\text{э}}$ (3), кг/м ²	95,41	86,75	87,67	88,43	87,29

На основании проведённого компьютерного моделирования наилучшим показателем энергоэффективности $W_{\text{э}}$ (2) обладает конструкция кристаллизатора с интенсификаторами теплообмена по патенту RU227391U1 (рис. 3, в).

В сравнении с типовой конструкцией преимущество такого кристаллизатора по данному показателю составляет 4,83%.

Аналогичное сравнение рассмотренных кристаллизаторов по показателю массовой эффективности $m_{\text{э}}$ (3) показывает улучшение на 9,08% в конструкции, снабжённой стержнями-интенсификаторами по патенту RU135101U1 (рис. 3, а), в сравнении с типовой конструкцией.

На рис. 4 представлено распределение скорости хладоносителя в рассмотренных кристаллизаторах с интенсификаторами (поперечное сечение по центру конструкций). Из рис. 4 следует, что снабжение типовой конструкции кристаллизатора интенсификаторами теплообмена в виде стержней способствует выравниванию распределения скорости хладоносителя в межтрубном пространстве.

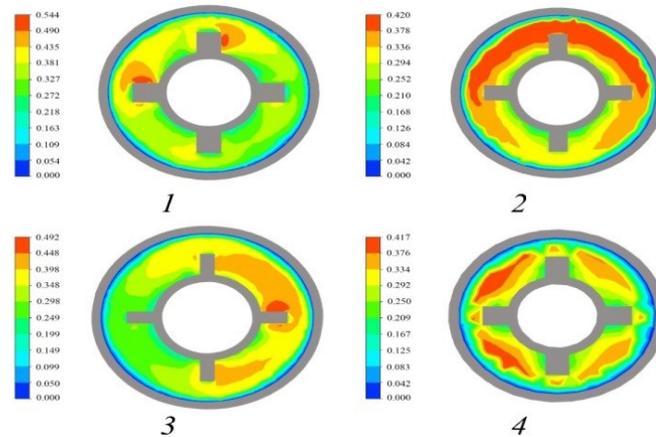


Рис. 4 - Распределение скорости хладоносителя в поперечном сечении кристаллизатора с формой интенсификаторов теплообмена (м/с): 1 – По патенту RU135101U1; 2 – По патенту RU226381U1; 3 – По патенту RU227391U1; 4 – Квадратной
Fig. 4 - Distribution of the coolant velocity in the cross section of the crystallizer with the form of heat transfer intensifiers (m/s): 1 – According to patent RU135101U1; 2 – According to patent RU226381U1; 3 – According to patent RU227391U1; 4 – Square form

Наиболее равномерное распределение скорости хладоносителя наблюдается в конструкции по патенту RU135101U1 (стержни-интенсификаторы круглого поперечного сечения), что может положительно отразиться на интенсивности теплообмена в кристаллизаторе.

Вывод. С использованием компьютерного моделирования проведена оценка влияния наличия интенсификаторов теплообмена на энергомассовую эффективность кристаллизатора, на примере снабжения типовой конструкции типа «труба в трубе» стержнями различной формы поперечного сечения.

Оценка проведена по двум удельным показателям, характеризующим затраты массы на изготовление кристаллизатора к получаемой площади поверхности теплообмена ($m\bar{\epsilon}$) и отношение мощности, требуемой для перекачки хладоносителя в межтрубном пространстве при эксплуатации кристаллизатора к площади его поверхности теплообмена ($W\bar{\epsilon}$). Очевидно, что для повышения энергомассовой эффективности теплообменника при заданной тепловой мощности оба этих показателя следует минимизировать.

Результаты компьютерного моделирования горизонтально расположенного кристаллизатора показали, что наличие стержней в конструкции выравнивает распределение скорости хладоносителя в его межтрубном пространстве, что, в свою очередь, ведет к улучшению рассмотренных удельных показателей, и по показателю $W\bar{\epsilon}$ минимальное значение достигается в кристаллизаторе по патенту RU227391U1. Минимальному значению $m\bar{\epsilon}$ соответствует конструкция по патенту RU135101U1.

Отметим, что расположение кристаллизаторов не окажет существенного влияния на рассмотренный удельный показатель $W\bar{\epsilon}$, а показатель $m\bar{\epsilon}$ не изменится.

Таким образом, мы получили два типа интенсификаторов, обеспечивающих минимальные значения предлагаемых показателей энергомассовой эффективности теплообменных аппаратов.

Однако при выборе наиболее рациональной формы интенсификаторов теплообмена для повышения энергомассовой эффективности кристаллизатора, по нашему мнению, следует отдавать предпочтение минимизации показателя $W\bar{\epsilon}$.

Библиографический список:

1. Попов И.А., Махьянов Х.М., Гуреев В.М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Интенсификация теплообмена. Казань: Центр инновационных технологий. 2009. 560 с.
2. Ugolnikova M.A., Chernyavskaya V.V. Dynamics of water ice formation during the operation of vessel cryoconcentrators. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2021. Vol. 57 (7–8). P. 561–566.
3. 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. Vol. 59 (1–2). P. 134–138.
4. 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. Vol. 57 (9–10). P. 713–719.
5. Филиппов В.В. Совершенствование конструкции теплообменных установок на основе методов интенсификации теплообмена. Тенденции развития науки и образования. 2023. № 100. т. 5. С. 130–132.
6. Кобзева А.А., Ву С.К., Глазов В.С. Особенности теплоотдачи в канале, стенки которого имеют разные температуры и интенсификаторы теплообмена. Энергосбережение - теория и практика: статья в сборнике научных трудов Одиннадцатой Всероссийской конференции с Международным участием. 2022. С. 173–176.
7. Бурцев С.А., Виноградов Ю.А., Киселёв Н.А., Стронгин М.М. Выбор рациональных интенсификаторов теплообмена в теплообменном оборудовании. Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. № 12. С. 35–56.
8. Mehrjardi S.A.A., Khademi A., Said Z., Ushak S., Chamkha A.J. Effect of elliptical dimples on heat transfer performance in a shell and tube heat exchanger. *Heat and Mass Transfer*. 2023. Vol. 59 (10). P. 1781–1791.
9. Bhattacharyya S., Vishwakarma D.K., Srinivasan A., Soni M.K., Goel V., Sharifpur M., Meyer J., Ahmadi M.H., Issakhov A. Thermal performance enhancement in heat exchangers using active and passive techniques: a detailed review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022. Vol. 147 (17). P. 9229–9281.
10. Alfellag M.A., Ahmed H.E., Jehad M.G., Farhan A.A. The hydrothermal performance enhancement techniques of corrugated channels: a review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022. Vol. 147 (19). P. 10177–10206.
11. Лобанов И.Е. Моделирование течения и теплообмена в трубах с турбулизаторами вязких теплоносителей в ламинарной области, а также в области перехода к турбулентному течению. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023. № 50 (3). С. 24–36.
12. Гильфанов К.Х., Шакиров Р.А. Нейросетевое моделирование теплообменных характеристик при поверхностной интенсификации теплообменного оборудования. Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2020. № 76 (4). С. 5–11.
13. Соловьев С.В., Чернышев А.В. Моделирование теплообмена жидкости в сферическом слое. Южно-Сибирский научный вестник. 2019. № 1 (25). С. 114–122.
14. Ходяшов Е.О., Тюрин М.П., Седяров 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.
15. Осинцев К.В., Краснов И.А., Васильев К.Д., Егоров В.И., Крохалева Н.Н. Исследование поля температур теплопередачи в теплообменном аппарате типа "труба в трубе" расчетным и численным методом. Оригинальные исследования. 2022. № 12 (11). С. 12–21.
16. Систер В.Г., Пушнов А.С., Пирогова О.В., Карпенко А.С. Современные методы интенсификации процессов тепло- и массообмена в контактных аппаратах с насадкой. Химическая технология. 2018. № 19 (2). С. 81–87.
17. Каган А.М., Систер В.Г., Пушнов А.С., Пирогова О.В., Карпенко А.С. Гидродинамический метод определения активной поверхности насыпных насадок для осуществления тепло- и массообменных процессов. Химическая технология. 2018. № 19 (4). С. 173–177.
18. Коновалов В.И., Романова Е.В., Колиух А.Н. Исследование процесса теплообмена в оребренном трубчатом рекуператоре. Вестник ТГТУ. 2012. № 18 (4). С. 876–880.
19. Stepykin A.V., Ruzanov S.R., Sidyagin A.A., Bukharov D.M., Tutanina E.M. Experimental study of the hydraulic resistance of plate modules of a heat and mass transfer device. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2023. Vol 59 (7–8). P. 563–569.
20. Мальцева О. М. Моделирование процесса намораживания льда на цилиндрической поверхности емкостного криоконцентратора. Техника и технология пищевых производств. 2016. № 3(42). С. 118–124.
21. Silin A. M., Lagutkin M. G., Baranova E. Yu. Reduction of energy consumption for pumping heat carriers while ensuring the required amount of transferred heat in plate heat exchanger. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2024. Vol. 59. P. 618–622.
22. Шаповалов А.В., Кидун Н.М., Никулина Т.Н., Чернявская В.В. Анализ исследований максимальных тепловых потоков в термосифонах с циркуляцией промежуточного теплоносителя. Современные проблемы машиноведения: статья в сборнике XIV Международной научно-технической конференции. Гомель: Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого. 2023. С. 92–95.

23. Занина К.О., Лагуткин М.Г., Юрицына А.М., Голованов И.Ю. Анализ вариантов оребрения двухтрубно-го теплообменного аппарата для повышения эффективности процесса. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2024. № 3 (48). С. 19–25.
24. Stepykin A.V., Goryunov N.S., Malygin L.A., Sidyagin A.A., Bukharov D.M., Tutanina E.M. Influence of the height of surface microroughness on the wettability of polymer-packed devices. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2023. Vol. 59 (1–2) P. 86–92.
25. Vasiliev P.D., Sidyagin A.A., Stepykin A.V., Bukharov D.M., Balakhnin I.A. Influence of the surface structure on the wettability of polymer packing elements in heat- and mass-transfer equipment. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2022. Vol. 56 (2). P. 212–220.

References:

1. Popov I.A., Mahjanov H.M., Gureev V.M. The physical basis and industrial application of heat transfer intensification. *Intensification of heat exchange*. Kazan': Centr innovacionnyh tehnologij Publ. 2009;560. (In Russ.).
2. Ugolnikova M.A., Chernyavskaya V.V. Dynamics of water ice formation during the operation of vessel cryoconcentrators. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2021; 57 (7–8): 561–566.
3. 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;59 (1–2):134–138.
4. 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;57 (9–10):713–719.
5. Filippov V.V. Improving the design of heat exchange plants based on methods of heat exchange intensification. *Trends in the development of science and education*. 2023;100(5):130–132. (In Russ.).
6. Kobzeva A.A., Vu S.K., Glazov V.S. Features of heat transfer in a channel whose walls have different temperatures and heat transfer intensifiers. *Energy saving - theory and practice: article in the collection of scientific papers of the Eleventh All-Russian Conference with International participation*. 2022;173-176. (In Russ.).
7. Burcev S.A., Vinogradov Ju.A., Kisel'jov N.A., Strongin M.M. The choice of rational heat transfer intensifiers in heat exchange equipment. *Science and Education: scientific publication of the Bauman Moscow State Technical University*. 2016;12:35-56. (In Russ.).
8. Mehrjardi S.A.A., Khademi A., Said Z., Ushak S., Chamkha A.J. Effect of elliptical dimples on heat transfer performance in a shell and tube heat exchanger. *Heat and Mass Transfer*. 2023;59 (10):1781–1791.
9. Bhattacharyya S., Vishwakarma D.K., Srinivasan A., Soni M.K., Goel V., Sharifpur M., Meyer J., Ahmadi M.H., Issakhov A. Thermal performance enhancement in heat exchangers using active and passive techniques: a detailed review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022; 147 (17):9229–9281.
10. Alfellag M.A., Ahmed H.E., Jehad M.G., Farhan A.A. The hydrothermal performance enhancement techniques of corrugated channels: a review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022;147(19):10177–10206.
11. Lobanov I.E. Modeling of flow and heat transfer in pipes with turbulators of viscous heat carriers in the laminar region, as well as in the transition to turbulent flow. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2023;50 (3):24-36. (In Russ.).
12. Gil'fanov K.H., Shakirov R.A. Neural network modeling of heat exchange characteristics of near-surface intensification of heat exchange equipment. *Bulletin of Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*. 2020;76 (4): 5-11. (In Russ.).
13. Solov'ev S.V., Chernyshev A.V. Modeling of heat transfer of a liquid in a spherical layer. *South Siberian Scientific Bulletin*. 2019;1 (25):114-122. (In Russ.).
14. Hodjashov E.O., Tjurin M.P., Sedljarov O.I., Borodina E.S. Simulation of a convective heat exchanger in order to increase its energy efficiency. *News of higher educational institutions. Textile industry technology*. 2024; 3 (411): 218-225. (In Russ.).
15. Osincev K.V., Krasnov I.A., Vasil'ev K.D., Egorov V.I., Krohaleva N.N. Investigation of the temperature field of heat transfer in a heat exchanger of the "pipe in a pipe" type by calculation and numerical method. *Original research*. 2022;12 (11):12-21. (In Russ.).
16. Sister V.G., Pushnov A.S., Pirogova O.V., Karpenko A.S. Modern methods of intensification of heat and mass transfer processes in contact devices with a nozzle. *Chemical technology*. 2018;19 (2): 81-87. (In Russ.).
17. Kagan A.M., Sister V.G., Pushnov A.S., Pirogova O.V., Karpenko A.S. Hydrodynamic method for determining the active surface of bulk nozzles for heat and mass transfer processes. *Chemical technology*. 2018;19 (4):173-177. (In Russ.).
18. Kononov V.I., Romanova E.V., Koliuh A.N. Investigation of the heat transfer process in a finned tubular heat exchanger. *Herald of TGTU*. 2012;18 (4): 876–880. (In Russ.).
19. Stepykin A.V., Ruzanov S.R., Sidyagin A.A., Bukharov D.M., Tutanina E.M. Experimental study of the hydraulic resistance of plate modules of a heat and mass transfer device. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2023; 59 (7–8): 563–569.

20. Mal'ceva O. M. Modeling of the ice freezing process on the cylindrical surface of a capacitive cryoconcentrator. *Equipment and technology of food production*. 2016;3(42):118-124. (In Russ.).
21. Silin A. M., Lagutkin M. G., Baranova E. Yu. Reduction of energy consumption for pumping heat carriers while ensuring the required amount of transferred heat in plate heat exchanger. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2024; 59:618-622.
22. Shapovalov A.V., Kidun N.M., Nikulina T.N., Chernjavskaja V.V. Analysis of studies of maximum heat fluxes in thermosiphons with intermediate coolant circulation. Modern problems of machine science: an article in the collection of the XIV International Scientific and Technical Conference. Gomel: Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi. 2023: 92-95. (In Russ.).
23. Zanina K.O., Lagutkin M.G., Juricyna A.M., Golovanov I.Ju. Analysis of finning options for a two-tube heat exchanger to increase the efficiency of the process. *Energy and resource conservation: industry and transport*. 2024;3 (48):19-25. (In Russ.).
24. Stepykin A.V., Goryunov N.S., Malygin L.A., Sidyagin A.A., Bukharov D.M., Tutanina E.M. Influence of the height of surface microroughness on the wettability of polymer-packed devices. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2023; 59 (1–2):86–92.
25. Vasiliev P.D., Sidyagin A.A., Stepykin A.V., Bukharov D.M., Balakhnin I.A. Influence of the surface structure on the wettability of polymer packing elements in heat- and mass-transfer equipment. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2022; 56 (2): 212–220.

Сведения об авторах:

Чернявская Варвара Васильевна, ассистент кафедры «Техника низких температур им. П.Л. Капицы», v_ch20@mail.ru; ORCID:0009-0005-5986-0165.

Сапожников Владимир Борисович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Техника низких температур им. П.Л. Капицы», sapozhnikov47@mail.ru; ORCID:0009-0002-9252-8437.

Голованов Иван Юрьевич, кандидат технических наук, ассистент кафедры «Аппаратурное оформление и автоматизация технологических производств имени профессора М.Б. Генералова», igol95@yandex.ru; ORCID:0009-0007-9073-1235.

Угольников Мария Андреевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника низких температур им. П.Л. Капицы», set-square@mail.ru; ORCID:0009-0009-2629-3001.

Information about authors:

Varvara V. Chernyavskaya, Assistant, Department «Low Temperature Engineering named after P.L. Kapitsa», v_ch20@mail.ru; ORCID:0009-0005-5986-0165.

Vladimir B. Sapozhnikov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof., Department «Low Temperature Engineering named after P.L. Kapitsa», sapozhnikov47@mail.ru; ORCID:0009-0002-9252-8437.

Ivan Yu. Golovanov, Cand. Sci. (Eng.), Assistant, Department «Hardware Design and Automation of Technological productions named after Professor M.B. Generalov», igol95@yandex.ru; ORCID:0009-0007-9073-1235.

Mariya A. Ugolnikova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department «Low Temperature Engineering named after P.L. Kapitsa», set-square@mail.ru; ORCID:0009-0009-2629-3001.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 07.11.2024.

Одобрена после рецензирования/Revised 25.12.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 15.01.2025.