

УДК 637.14

Анализ конструкций кристаллизаторов и предложения по направлениям их совершенствования

В. В. ЧЕРНЯВСКАЯ*, д-р техн. наук В. Б. САПОЖНИКОВ,
И. Ю. ГОЛОВАНОВ, канд. техн. наук М. А. УГОЛЬНИКОВА

Московский политехнический университет

*E-mail: v_ch20@mail.ru

Одной из актуальных задач развития химической, пищевой и биотехнологической отраслей промышленности является создание и реализация энергосберегающих технологий холодильной техники. Данная задача, в том числе, включает в себя разработку нового технологического оборудования, в частности оборудования разделения жидких сред методом вымораживания. К такому оборудованию относятся используемые в промышленности аппараты ёмкостного типа — кристаллизаторы. В статье рассмотрены и проанализированы различные конструкции кристаллизаторов, отмечены их преимущества и недостатки. В качестве источников информации для проведения анализа были использованы отечественные и зарубежные статьи научных и научно-технических журналов, а также патенты и авторские свидетельства. Проведение анализа конструкций кристаллизаторов включало оценку эффективности их работы, которая напрямую зависит от интенсивности теплообмена в процессе вымораживания. Так как конструктивно кристаллизаторы относятся к регенеративным теплообменным аппаратам, оценка эффективности их работы включала количество передаваемого тепла (в соответствии с основным уравнением теплопередачи) и проводилась по ряду удельных показателей с учетом значимых технических и экономических аспектов для современной промышленности — энергосбережение при эксплуатации аппарата, ресурсосбережение при изготовлении аппарата, стремление к уменьшению габаритных размеров и упрощению конструкции аппарата. К примеру, по отношению энергетических затрат при работе кристаллизатора к количеству передаваемого тепла. Проведенный анализ позволил изучить общие свойства и принципы функционирования кристаллизаторов разделения жидких сред методом вымораживания. На основании проведенного анализа были выявлены наиболее перспективные направления в разработке новых и совершенствовании используемых на предприятиях кристаллизаторов.

Ключевые слова: теплообмен, кристаллизатор, анализ конструкций, эффективность процесса теплопередачи, энергосбережение, ресурсосбережение, перспективные конструкции кристаллизаторов.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 15.10.2024, одобрена после рецензирования 21.01.2025, принята к печати 29.01.2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-23-30

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Чернявская В. В., Сапожников В. Б., Голованов И. Ю., Угольников М. А. Анализ конструкций кристаллизаторов и предложения по направлениям их совершенствования. // Вестник Международной академии холода. 2025. № 2. С. 23–30. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-23-30

Crystallizer designs and suggestions for their improvement

V. V. CHERNYAVSKAYA*, D. Sc. V. B. SAPOZHNIKOV,
I. Yu. GOLOVANOV, Ph. D. M. A. UGOLNIKOVA

Moscow Polytechnic University

*E-mail: v_ch20@mail.ru

The creation and implementation of energy-saving refrigeration technologies is one of the urgent tasks for the development of chemical, food, and biotechnological industries. This task includes the development of new liquid separation equipment by freezing. Such equipment includes crystallizers used in industry. The article presents an analysis of various crystallizer designs, their advantages and disadvantages are noted. Articles of scientific journals, as well as patents, were used as sources of information for the analysis. The analysis of the crystallizer designs included an assessment of the efficiency of their operation, which directly depends on the intensity of heat transfer during the freezing process. Since crystallizers are similar to regenerative heat exchangers, the evaluation of the efficiency of the crystallizers included the amount of heat transferred (in accordance with the basic heat transfer equation) and was carried out according to a number of specific indicators (energy saving during freezing, resource saving during the manufacture of the crystallizer, the desire to reduce overall dimensions and simplify the design of the crystallizer). An example of an indicator is the ratio of energy costs during the operation of the mold to the amount of heat transferred. The analysis allowed to study the general properties and

principles of operation of liquid separation crystallizers by freezing. Based on the analysis, the most promising directions in the development of new and improved crystallizers used at enterprises were identified.

Keywords: heat transfer, crystallizer, design analysis, efficiency of the heat transfer process, energy-saving, resource-saving, promising designs of crystallizers.

Article info:

Received 15/10/2024, approved after reviewing 21/01/2025, accepted 29/01/2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-23-30

Article in Russian

For citation:

Chernyavskaya V. V., Sapozhnikov V. B., Golovanov I. Yu., Ugolnikova M. A. Crystallizer designs and suggestions for their improvement. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2025. No 2. p. 23–30. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-23-30

Введение

Рекуперативные теплообменные аппараты нашли широкое применение в различных отраслях промышленности, в том числе химической, пищевой и биотехнологической. К таким аппаратам относятся кристаллизаторы, задачей работы которых является охлаждение исходного жидкого продукта (концентрируемой среды) ниже криоскопической температуры с целью отделения легко замерзающего продукта. В качестве исходного жидкого продукта могут быть использованы различные химические или биологические жидкости (сок, молочная сыворотка и т. п.), подлежащие концентрации.

Отличительной особенностью работы кристаллизаторов, в сравнении с другими рекуперативными теплообменными аппаратами, является периодичность действия: стадия концентрирования исходного жидкого продукта и стадия удаления концентрированного продукта и льда. В первой стадии для охлаждения исходного жидкого продукта используется хладоноситель с температурой ниже криоскопической температуры исходного жидкого продукта. Во второй стадии для удаления льда могут быть использованы различные механические устройства (например, вибрационные, режущие) или теплоноситель с температурой равной или выше температуры плавления замороженного льда.

Как и в прочих рекуперативных теплообменных аппаратах, движущей силой процесса теплопередачи в кристаллизаторах является разность температур. При оценке эффективности процесса теплопередачи учитывается количество передаваемого тепла, определяемое по основному уравнению теплопередачи [1]:

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

где Q — количество передаваемого тепла в кристаллизаторе, Вт; K — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); F — площадь поверхности теплопередачи, м²; Δt — средняя разность температур между хладоносителем и исходным жидким продуктом, °С.

Известно, что величина коэффициента теплопередачи K , входящего в уравнение (1), определяется как [1]:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{внут}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{внеш}}} + R_{\text{заг}} + R_{\text{л}}}, \quad (2)$$

где $\alpha_{\text{внут}}$ — коэффициент теплоотдачи исходного жидкого продукта, Вт/(м²·К); $\alpha_{\text{внеш}}$ — коэффициент теплоотдачи хладоносителя, Вт/(м²·К); $\delta_{\text{ст}}$ — толщина теплопередающей стенки, м; $\lambda_{\text{ст}}$ — коэффициент теплопроводности материала теплопередающей стенки, Вт/(м·К); $R_{\text{заг}}$ — термическое сопротивление загрязнений на теплопередающей стенке, (м²·К)/Вт; $R_{\text{л}}$ — термическое сопротивление слоя льда, (м²·К)/Вт.

При движении потока хладоносителя в кристаллизаторе критериальное уравнение для определения коэффициента теплоотдачи имеет следующий вид [1]:

$$Nu = f(Re, Pr), \quad (3)$$

где Nu , Re , Pr — числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля, соответственно.

Коэффициенты теплоотдачи определяются через число Нуссельта Nu [1]:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_{\text{ст}}}, \quad (4)$$

где α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); l — характерный размер канала кристаллизатора, м.

Число Рейнольдса Re записываем следующим образом [1]:

$$Re = \frac{v \cdot l \cdot \rho}{\mu}, \quad (5)$$

где v — скорость хладоносителя, м/с; ρ — плотность хладоносителя, кг/м³; μ — динамическая вязкость хладоносителя, Па·с.

Число Прандтля Pr включает физико-химические свойства хладоносителя [1]:

$$Pr = \frac{c \cdot \mu}{\lambda_{\text{ст}}}, \quad (6)$$

где c — теплоемкость хладоносителя, Дж/(кг·К).

Очевидно, что увеличение скорости хладоносителя повышает значение числа Рейнольдса, что, в соответствии с уравнением (3), приводит к увеличению значения числа Нуссельта, следовательно, и коэффициента теплоотдачи α (4). Вместе с тем увеличение скорости хладоносителя повышает энергетические затраты на его перекачивание в кристаллизаторе.

При оценке эффективности работы кристаллизатора предлагается оценивать совокупную потребляемую мощ-

ность для его эксплуатации, в том числе мощность для перекачивания хладоносителя [1]:

$$W = V\Delta P + E, \quad (7)$$

где W — совокупная мощность, потребляемая при эксплуатации кристаллизатора, Вт; V — объемный расход хладоносителя, м³/с; ΔP — гидравлическое сопротивление при перекачивании хладоносителя, Па, E — потребляемая мощность, не связанная с перекачиванием хладоносителя, Вт.

Разработка новых и совершенствование существующих конструкций рекуперативных теплообменных аппаратов, в том числе и кристаллизаторов, основывается на эффективности их работы и может проводиться по ряду удельных показателей, с использованием уравнений (1), (2), (7). Современные исследования описывают различные подходы для получения удельных показателей. Так, могут быть использованы компьютерное и математическое моделирование, проведение натурных экспериментов (в том числе и на действующих предприятиях химической, пищевой и биотехнологической отраслей промышленности) [1]–[16].

Среди удельных показателей эффективности работы кристаллизаторов, наибольший интерес представляют те, которые учитывают ресурсосбережение при их изготовлении и энергосбережение при их эксплуатации. В качестве таких показателей могут быть рассмотрены следующие величины:

— тепловая мощность, передаваемая через единицу площади поверхности в кристаллизаторе:

$$q = Q/F, \quad (8)$$

где q — удельный тепловой поток, Вт/м²;

— отношение совокупной мощности, потребляемой при эксплуатации кристаллизатора, к количеству передаваемого тепла:

$$\Delta W = W/Q, \quad (9)$$

где ΔW — удельная потребляемая мощность при эксплуатации кристаллизатора, Вт/Вт;

— масса, необходимая для передачи 1 Вт тепла в рассматриваемой конструкции кристаллизатора:

$$\Delta m = m/Q, \quad (10)$$

где Δm — удельная масса кристаллизатора, кг/Вт; m — масса кристаллизатора, кг;

— компактность конструкции кристаллизатора:

$$\Delta O = F/O, \quad (11)$$

где ΔO — удельный объем кристаллизатора, м²/м³; O — объем кристаллизатора, м³.

Отметим, что отдельные конструктивные решения, предлагаемые для различных конструкций рекуперативных теплообменных аппаратов (кожухотрубчатых [1]–[4] и конструкций типа «труба в трубе» [5]–[10]), могут быть актуальны и для кристаллизаторов.

Таким образом, решение актуальной для современной промышленности задачи по созданию и реализации энергосберегающих технологий холодильной техники (применительно к кристаллизаторам) должно включать обзор существующих конструкций рекуперативных теплообменных аппаратов различных типов, что позволит определить наиболее перспективные направления в совершенствовании кристаллизаторов.

Основные типы кристаллизаторов и интенсификаторов

Наиболее распространенными в промышленности кристаллизаторами являются конструкции с намораживанием слоя льда на различных рабочих поверхностях, например, на внешней поверхности теплообменных труб [13]. Рассмотрим типовую конструкцию такого кристаллизатора и проанализируем его достоинства и недостатки (рис. 1).

Представленный кристаллизатор работает по следующему принципу. По вертикальным теплообменным трубам I движется хладоноситель. На внешнюю поверхность теплообменных труб I из бака подачи 2 с щелевыми распределителями 3 подается исходный жидкий продукт, который под действием гравитационных сил стекает в виде пленки жидкости в бак-приемник 4 . В результате процесса теплопередачи между хладоносителем и исходным жидким продуктом через стенку теплообменных труб I , происходит разделение исходного жидкого продукта на водный лед и концентрированный продукт. При достижении определенной толщины слоя льда (из условия заданных режимных параметров эксплуата-

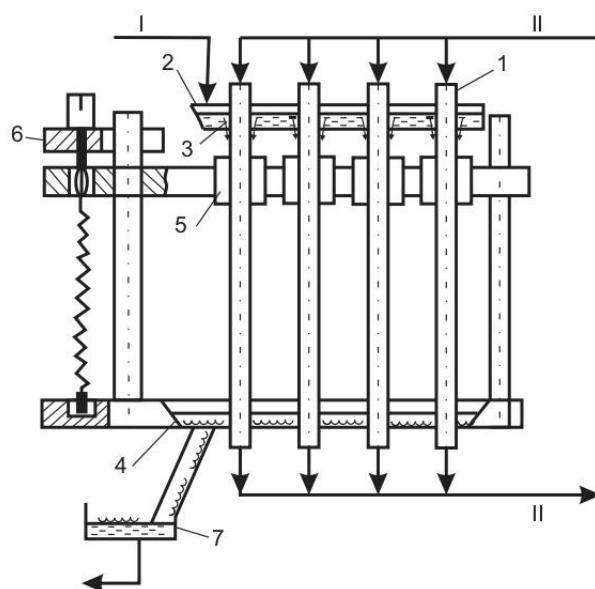


Рис. 1. Конструкция кристаллизатора по патенту RU2131095C1: 1 — теплообменные трубы; 2 — бак подачи; 3 — щелевые распределители; 4 — бак-приемник; 5 — ножи; 6 — приводное устройство; 7 — бак-сборник; I — исходный жидкий продукт; II — хладоноситель

Fig. 1. Crystallizer design according to patent RU2131095C1: 1 — heat-exchange pipes; 2 — feed tank; 3 — slot-type distributors; 4 — receiving tank; 5 — knives; 6 — driving mechanism; 7 — collecting tank; I — initial liquid product; II — coolant

ции кристаллизатора) запускается приводное устройство 6, приводящее в движение ножи 5. За счет возвратно-поступательного движения ножей 5, происходит скалывание льда с поверхности теплообменных труб 1. Сколотый лед попадает в бак-приемник 4 вместе с полученным концентрированным продуктом, откуда они поступают в бак-сборник 7 для их дальнейшего разделения.

Основным достоинством таких конструкций кристаллизаторов является высокая производительность по количеству получаемого концентрированного продукта в единицу времени.

К недостаткам стоит отнести высокую удельную массу Δm , большой объем кристаллизатора O , а также высокую потребляемую мощность при их эксплуатации W и сложность конструкций.

Перечисленные недостатки подобных кристаллизаторов в большой степени связаны со сложностью удаления слоя замороженного льда с наружной поверхности теплообменных труб при их эксплуатации.

В настоящее время перспективны кристаллизаторы с намораживанием льда на внутренней поверхности теплообменных труб. Типовая конструкция такого кристаллизатора (вертикального типа) представлена на рис. 2 [15]–[16].

Данный кристаллизатор работает следующим образом. Исходный жидкий продукт поступает в пространство теплообменной трубы 2 и заполняет его, при этом задвижка 5 находится в закрытом положении для герметизации

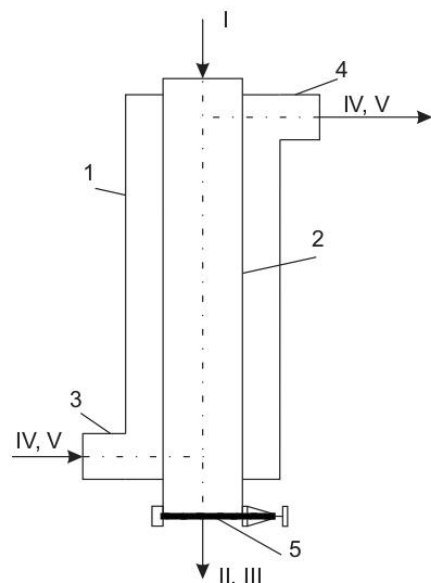


Рис. 2. Конструкция кристаллизатора по патенту RU219187U1: 1 — корпус; 2 — теплообменная труба; 3 — патрубок ввода теплоносителя и хладоносителя; 4 — патрубок вывода теплоносителя и хладоносителя; 5 — задвижка; I — исходный жидкий продукт; II — концентрированный продукт; III — лед; IV — хладоноситель; V — теплоноситель

Fig. 2. Crystallizer design according to patent RU219187U1: 1 — body; 2 — heat exchange pipe; 3 — heat carrier and coolant inlet pipe; 4 — heat carrier and coolant outlet pipe; 5 — gate valve; I — initial liquid product; II — concentrated product; III — ice; IV — coolant; V — heat carrier

внутритрубного пространства. Через патрубок ввода теплоносителя и хладоносителя 3 в кристаллизатор поступает хладоноситель (с температурой ниже криоскопической температуры исходного жидкого продукта), движется в пространстве между корпусом 1 и теплообменной трубой 2 и выводится через патрубок вывода теплоносителя и хладоносителя 4. С течением времени происходит намораживание слоя водного льда на внутренней поверхности теплообменной трубы 2, что приводит к концентрированию исходного жидкого продукта. При достижении необходимой концентрации продукта происходит его выведение из кристаллизатора путем открытия задвижки 5. Для оттаивания водного льда в патрубок ввода теплоносителя и хладоносителя 3 подается теплоноситель, температура которого выше точки плавления замороженного водного льда. При этом происходит отделение слоя замороженного водного льда от стенки теплообменной трубы 2, вследствие чего весь объем льда под собственным весом выводится из кристаллизатора.

На рис. 2 не показаны, расположенные ниже задвижки 5, баки-приемники концентрированного продукта и льда, а также распределительное устройство. Положение задвижки 5 может изменяться в ручном, автоматизированном и автоматическом режимах.

Эффективность работы кристаллизатора при плавлении замороженного водного льда (с использованием теплоносителя в межтрубном пространстве) также описывается уравнениями (1), (2), (7), где Δt в уравнении (1) — средняя разность температур между теплоносителем и замороженным льдом, К; $\alpha_{\text{внут}}$ в уравнении (2) — коэффициент теплоотдачи замороженного льда, Вт/(м²·К); $\alpha_{\text{внеш}}$ в уравнении (2) — коэффициент теплоотдачи теплоносителя, Вт/(м²·К); R_d в уравнении (2) принимается равным 0; V в уравнении (7) — объемный расход теплоносителя, м³/с; ΔP в уравнении (7) — гидравлическое сопротивление при перекачивании теплоносителя, Па.

Кристаллизаторы вертикального типа являются наиболее универсальными для эксплуатации с различными рабочими средами и отличаются простотой удаления льда из объема теплообменной трубы. Такие конструкции, к примеру, представлены в патентах ЕА17783В1, ЕА201101710А1, RU2654867С1. При концентрировании некоторых продуктов возможно использование конструкций кристаллизаторов горизонтального типа. Например, в патенте RU198654U1 представлен горизонтальный кристаллизатор с одной теплообменной трубой; в патенте RU192489U1 — горизонтальный кристаллизатор с несколькими теплообменными трубами и углом наклона к горизонту 2–7°.

Двухтрубные конструкции кристаллизаторов имеют преимущество перед многотручными, заключающееся в возможности изменения площадей проходных сечений теплообменной трубы и межтрубного пространства до достижения максимально возможного коэффициента теплоотдачи от хладоносителя и теплоносителя $\alpha_{\text{внеш}}$. Важен этот фактор ввиду того, что на практике именно $\alpha_{\text{внеш}}$ лимитирует величину коэффициента теплопередачи K и, следовательно, ограничивает эффективность процесса теплопередачи в кристаллизаторе.

Основным преимуществом двухтрубных кристаллизаторов является простота их конструкции.

Главным же недостатком является большая удельная масса кристаллизатора Δm . В межтрубном пространстве таких конструкций наблюдается неравномерность распределения скорости хладоносителя и теплоносителя, что негативно сказывается на интенсивности теплообмена (скорость вблизи кожуховой трубы значительно ниже, чем у поверхности теплообменной трубы).

Следовательно, наиболее перспективным направлением в конструировании двухтрубных кристаллизаторов можно считать определение наилучшего соотношения проходных сечений теплообменной трубы и межтрубного пространства, выравнивание поля скоростей движения хладоносителя и теплоносителя в межтрубном пространстве для повышения величины удельного теплового потока q , а также сокращение удельной массы Δm .

Примеры конструкций многотрубных кристаллизаторов представлены в патентах GB1227678A, RU219187U1, RU2743796C1, WO2012001706A2.

К достоинствам таких конструкций можно отнести довольно высокие показатели удельного теплового потока q , а также лучший показатель компактности ΔO , в сравнении с двухтрубными кристаллизаторами.

Основными недостатками стоит выделить большую удельную массу Δm сложность конструкции, а также, как и у двухтрубных кристаллизаторов, неравномерность распределения скорости хладоносителя и теплоносителя в межтрубном пространстве.

Таким образом, для многотрубных кристаллизаторов перспективна разработка конструкции, позволяющей выровнять скорость хладоносителя и теплоносителя в межтрубном пространстве для повышения коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{внеш}}$ и сократить величину Δm .

При этом стоит учитывать, что в соответствии с уравнением (2), как в двухтрубных, так и многотрубных кристаллизаторах, интенсивность теплообмена и, следовательно, время концентрирования продукта увеличивается по мере увеличения толщины слоя льда на поверхности теплообменной трубы.

Следовательно, общие перспективы в совершенствовании кристаллизаторов связаны с определением наилучшего соотношения гидравлических диаметров межтрубного и трубного пространств, увеличением площади поверхности теплопередачи F и выравниванием поля скоростей движения хладоносителя и теплоносителя в межтрубном пространстве, что позволит снизить время циклов замораживания и размораживания, тем самым обеспечив максимально возможную производительность кристаллизатора.

Решения по совершенствованию кристаллизаторов не должны существенно усложнять их конструкции и повышать трудоемкость изготовления. При их проектировании необходимо стремиться к компактности ΔO и наименьшей материалоемкости конструкции Δm .

Стоит отметить, что в настоящее время существуют различные предложения по совершенствованию рекуперативных теплообменных аппаратов, которые могут быть актуальны и для совершенствования кристаллизаторов.

Кристаллизаторы с намораживанием льда внутри теплообменной трубы конструктивно наиболее близки к рекуперативным теплообменным аппаратам типа «труба в трубе», пример двухтрубной конструкции которого

представлен в статье [6]; пример многотрубной конструкции — в патентах GB1056075A, RU2035683C1, RU2359192C1. Также конструктивно близкими к кристаллизаторам являются кожухотрубчатые теплообменные аппараты с жестким креплением теплообменных труб, примеры которых представлены в патентах CN201165960Y, RU185391U1, RU2697213C1, US20090126918A1 и статьях [1]–[4].

Одним из направлений совершенствования таких аппаратов является закрепление на наружной поверхности теплообменных труб интенсификаторов теплообмена.

Интенсификаторы могут быть выполнены в виде полых заглушенных труб (к примеру, по патенту RU2042910C1), различных продольных или поперечных потоку теплоносителя лент (представлены в патентах CN101566437A, GB1056075A, RU2035683C1, SU1218285A1, US3612002A и статьях [2, 3, 9, 11, 12, 14]). Также здесь можно выделить и более сложные конструкции, например, с вращающимися спиральной лентой или теплообменной трубой по патентам CN106540764A, RU2645861C1, RU2705711C1. Наиболее широкое распространение получили интенсификаторы в виде различных цельных выпуклых элементов, например стержней (представлены в патентах RU135101U1, RU158070U1, RU226381U1, RU227391U1 и статьях [2, 11, 12]) (рис. 3).

Снабжение кристаллизатора интенсификаторами теплообмена позволит повысить его компактность ΔO за счет увеличения площади поверхности теплопередачи

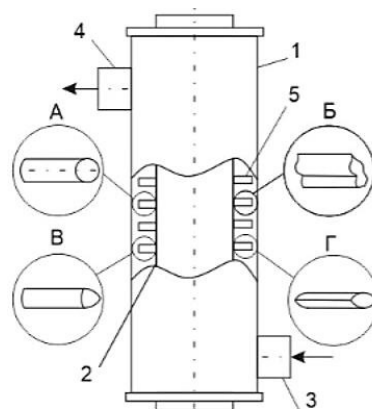


Рис. 3. Примеры интенсификаторов теплообмена:
1 — корпус; 2 — теплообменная труба; 3 — патрубок ввода теплоносителя и хладоносителя; 4 — патрубок вывода теплоносителя и хладоносителя; 5 — интенсификаторы теплообмена; А — круглое сечение по патенту RU135101U1; Б — ω -образное сечение по патенту RU158070U1; В — сечение в форме треугольника Рело по патенту RU226381U1; Г — сечение в форме двух треугольников Рело по патенту RU227391U1

Fig. 3. Examples of heat exchange intensifiers: 1 — body; 2 — heat exchange pipe; 3 — heat carrier and coolant inlet pipe; 4 — heat carrier and coolant outlet pipe; 5 — heat exchange intensifiers; А — round cross-section according to patent RU135101U1; Б — ω -shaped cross-section according to patent RU158070U1; В — section in the form of Reuleaux triangle according to patent RU226381U1; Г — section in the form of two Reuleaux triangles according to patent RU227391U1

F при сохранении габаритных размеров конструкции, а также позволит интенсифицировать процесс теплопередачи при выравнивании скорости хладагента и теплоносителя в межтрубном пространстве и, следовательно, уменьшить величину F , необходимую для передачи определенного количества тепла Q .

Несмотря на возрастающие потери энергии на перекачивание хладагента и теплоносителя и, тем самым, увеличение потребляемой мощности при эксплуатации кристаллизатора W , подобные решения позволяют повысить эффективность процесса теплопередачи ΔW за счет увеличения количества передаваемого тепла Q .

Однако, интенсификаторы существенно повышают трудоемкость изготовления кристаллизатора и могут негативно отразиться на его удельной массе Δm .

В кожухотрубчатых теплообменных аппаратах увеличение коэффициента теплоотдачи со стороны межтрубного пространства может быть достигнуто размещением внутри кожуха сегментных перегородок (как продольных, так и поперечных), удлиняющих путь теплоносителя (примеры таких конструкций представлены в патентах AU2016290278B2, CN107850404B, RU2709399C1, US2018224219A1 и статьях [2, 3, 12]). Перегородки также могут и полностью перекрывать межтрубное пространство (перфорированные перегородки или спиральные), что представлено в патентах CN104949552B, GB2313438A, JP2001141386A, RU2502931C2, SU1318779A2, US5915472A. Подобные решения предлагаются и для конструкций типа «труба в трубе», например в патенте SU1305517A1.

Данное направление может быть актуально для совершенствования как двухтрубных, так и многотрубных конструкций кристаллизаторов. Однако, к недостаткам таких конструктивных решений можно отнести повышение трудоемкости изготовления кристаллизатора и значительное увеличение потерь энергии на перекачивание хладагента и теплоносителя. При этом вероятен и негативный эффект по показателям ΔW и Δm .

Увеличение компактности кристаллизатора ΔO наиболее перспективно путём изменения профиля теплообменных труб (при условии, когда получаемый профиль трубы имеет больший периметр, чем длина окружности,

в которую он вписан). При этом такие профильные трубы могут быть изготовлены технологической операцией «прокатка» с использованием круглых труб в качестве заготовок. Данное решение позволит увеличить поверхность теплопередачи F , а также интенсифицировать процесс теплопередачи за счет выравнивания скорости хладагента и теплоносителя в межтрубном пространстве.

Например, к таким профильным теплообменным трубам можно отнести те, что в поперечном сечении имеют форму геометрических фигур эписцилоиды и эпитрохоиды (рис. 4).

Теплообменные аппараты с такими теплообменными трубами представлены в патентах: RU225555U1 — в конструкции кожухотрубчатого аппарата; RU225588U1 — в конструкции типа «труба в трубе»; RU228345U1, RU228347U1, RU228348U1, RU228443U1, RU228447U1, RU228927U1, RU229196U1 — в конструкциях кристаллизаторов.

Негативным фактором применения подобных профильных труб будет являться уменьшение гидравлического диаметра внутритрубного пространства и, следовательно, уменьшение максимально возможного единичного объема исходного жидкого продукта в кристаллизаторе. При этом вероятен положительный эффект по показателям q , ΔW и Δm .

Также перспективно использование теплообменных труб (преимущественно круглых) со структурированной поверхностью в виде каналов из небольших углублений различной формы. Структурированная поверхность на круглых трубах может быть получена технологической операцией «накатка». Структурированные теплообменные поверхности приводятся в патентах CN1065044C, FR2706197B1, RU2100733C1, RU2164332C2, RU216818C1, RU227085C1, SU616521A1, US5692560A и статьях [2, 11, 12]. Данное решение позволит существенно повысить площадь поверхности теплопередачи F и улучшить показатели q , ΔW , Δm и ΔO без увеличения массы кристаллизатора m . В данном направлении совершенствования кристаллизаторов будут актуальны исследования по развитию площади поверхности контактных устройств тепло- массообменных аппаратов [17]–[20].

Отдельно выделим перспективу определения наилучшего соотношения гидравлических диаметров трубного и межтрубного пространств, в том числе в многотрубных конструкциях кристаллизаторов. Важно учитывать гидравлические диаметры входного и выходного патрубков межтрубного пространства: их диаметры должны быть больше (но наиболее близкими) или равными гидравлическому диаметру межтрубного пространства. При этом стоит учитывать расположение патрубков межтрубного пространства и углом их наклона к оси теплообменных аппаратов представлены в патентах FR1274618A, FR2526145A1, SU1219908A1. Совокупность таких решений позволит выровнять скорость хладагента и теплоносителя на протяжении всего их пути движения в кристаллизаторе и, следовательно, сократятся потери энергии на их перекачивание, повысится показатель ΔW , а также вероятен положительный результат по показателям q и Δm .

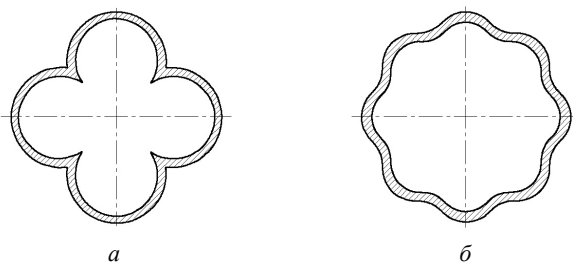


Рис. 4. Примеры профильных теплообменных труб:
а — в форме эписцилоиды с 4 каспами по патенту RU225555U1; б — в форме эпитрохоиды с 8 лепестками по патенту RU225588U1

Fig. 4. Examples of profile heat-exchange tubes:
a — in the form of an epicycloid with 4 cusps according to patent RU225555U1; b — in the form of an epitrochoid with 8 lobes according to patent RU225588U1

Заклучение

Представленные в статье результаты анализа достоинств и недостатков ряда перспективных и запатентованных конструкций кожухотрубчатых теплообменных аппаратов, конструкций типа «труба в трубе» и кристаллизаторов актуальны для разработки новых кристаллизаторов химической, пищевой и биотехнологической отраслей промышленности. При совершенствовании кристаллизаторов необходимо стремиться не к интенсификации процесса теплопередачи или снижению совокупных энергетических затрат при их эксплуатации, а рассматривать удельные показатели эффективности их работы для увеличения удельного теплового потока q , компактности конструкции ΔO при снижении удельной потребляемой мощности ΔW (9) и удельной массы кристаллизатора Δm .

Литература/References

- 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, no 9–10, pp. 713–719. DOI: 10.1007/s10556-022-00997-2.
- Mehrdadi 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, no 10, pp. 1781–1791. DOI: 10.1007/s00231-023-03367-7.
- Marzouk S. A., Abou Al-Sood M. M., El-Said E. M. S., Younes M. M., El-Fakharany M. K. A comprehensive review of methods of heat transfer enhancement in shell and tube heat exchangers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023, Vol. 148, no 15, pp. 7539–7578. DOI: 10.1007/s10973-023-12265-3.
- Schab R., Kutschabsky A., Unz S., Beckmann M. Numerical investigation of tubeside maldistribution in shell-and-tube heat exchangers. *Heat and Mass Transfer*, 2023, Vol. 60, no 5, pp. 851–859. DOI: 10.1007/s00231-023-03385-5.
- Al-Zahrani S. Heat transfer characteristics of innovative configurations of double pipe heat exchanger. *Heat and Mass Transfer*, 2023, Vol. 59, no 9, pp. 1661–1675. DOI: 10.1007/s00231-023-03360-0.
- 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, Vol. 49, no 7, pp. 9831–9847. DOI: 10.1007/s13369-023-08568-0.
- Hashemian M., Jafarmadar S., Nasiri J., Dizaji H. S. Enhancement of heat transfer rate with structural modification of double pipe heat exchanger by changing cylindrical form of tubes into conical form. *Applied Thermal Engineering*, 2017, Vol. 118, pp. 408–417. DOI: 10.1016/j.applthermaleng. 2017.02.095.
- Bai Y., Yao Yi., Zheng Sh. Design and analysis of heat pipe heat exchanger efficiency. *Bulletin of Science and Practice*, 2023, Vol. 9, no 6, pp. 373–380. DOI: 10.33619/2414–2948/91/44.
- Hussein H., Freegah B. Numerical and experimental investigation of the thermal performance of the double pipe-heat exchanger. *Heat and Mass Transfer*, 2023, Vol. 59, no 12, pp. 2323–2341. DOI: 10.1007/s00231-023-03414-3.
- Mohsen O. A., Muhammed M. A. R., Hasan B. O. Heat transfer enhancement in a double pipe heat exchanger using different fin geometries in turbulent flow. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 2021, Vol. 45, no 2, pp. 461–471. DOI: 10.1007/s40997-020-00377-2.
- 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, no 17, pp. 9229–9281. DOI: 10.1007/s10973-021-11168-5.
- 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, no 19, pp. 10177–10206. DOI: 10.1007/s10973-022-11247-1.
- Гончарова Г. Ю., Пытченко В. П., Борзов С. С., Борщев Г. В. Исследование процессов тепломассообмена при пленочном обтекании ледовых поверхностей с фазовым переходом на границе раздела // Вестник Международной академии холода. 2021. № 4. С. 3–11. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-3-11 [Goncharova G. Yu., Pytchenko V. P., Borzov S. S., Borshev G. V. Heat and mass transfer during film flow around ice surfaces with a phase transition at the interface. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021. no 4. pp. 3–11. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-3-11 (in Russian)]
- Кошелев С. В., Ейдеус А. И. Анализ данных об интенсивности теплоотдачи в теплообменниках с пластинчатыми ребрами // Вестник Международной академии холода. 2024. № 1. С. 13–20. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-13-20 [Koshelev S. V., Eideyus A. I. Heat transfer intensity of heat exchangers with plate fins. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. no 1. pp. 13–20. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-13-20 (in Russian)]
- Ugolnikova M. A., Chernyavskaya V. V. Dynamics of water ice formation during the operation of vessel cryoconcentrators. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2021, Vol. 57, no 7–8, pp. 561–566. DOI: 10.1007/s10556-021-00976-z.
- 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, no 1–2, pp. 134–138. DOI: 10.1007/s10556-023-01218-0.
- Stepykin A. V., Goryunov N. S., Malygin L. A., Sidiyagin 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, no 1–2, pp. 86–92. DOI: 10.1007/s10556-023-01211-7.
- Stepykin A. V., Sidiyagin A. A., Bukharov D. M., Tutanina E. M., Sukhanov D. E. Experimental study of heat transfer of different-thickness plate modules of heat and mass transfer device. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2024, Vol. 33, no 1, pp. 102–109. DOI: 10.1134/S1810232824010090.
- Vasiliev P. D., Sidiyagin 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, no 2, pp. 212–220. DOI: 10.1134/S0040579522020166.
- Stepykin A. V., Ruzanov S. R., Sidiyagin 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, no 7–8, pp. 563–569. DOI 10.1007/s10556-024-01275-z.

Сведения об авторах

Чернявская Варвара Васильевна

Ассистент, Московский политехнический университет,
115280, Россия, Москва, Автозаводская 16,
v_ch20@mail.ru, ORCID: 0009-0005-5986-0165

Сапожников Владимир Борисович

Д. т. н., профессор, Московский политехнический
университет, 115280, Россия, Москва, Автозаводская 16,
sapojnikov47@mail.ru, ORCID: 0009-0002-9252-8437

Голованов Иван Юрьевич

Ассистент, Московский политехнический университет,
115280, Россия, Москва, Автозаводская 16,
igol95@yandex.ru, ORCID: 0009-0007-9073-1235

Угольникова Мария Андреевна

К. т. н.; доцент, Московский политехнический университет,
115280, Россия, Москва, Автозаводская 16,
ORCID: 0009-0009-2629-3001

Information about authors

Chernyavskaya Varvara V.

Assistant, Moscow Polytechnic University,
115280., Russia, Moscow, Avtozavodskaya 16,
v_ch20@mail.ru, ORCID: 0009-0005-5986-0165

Sapozhnikov Vladimir B.

D. Sc., Professor, Moscow Polytechnic University,
115280., Russia, Moscow, Avtozavodskaya 16,
sapojnikov47@mail.ru, ORCID: 0009-0002-9252-8437

Golovanov Ivan Yu.

Assistant, Moscow Polytechnic University,
115280., Russia, Moscow, Avtozavodskaya 16,
igol95@yandex.ru, ORCID: 0009-0007-9073-1235

Ugolnikova Mariya A.

Ph. D., Associate Professor, Moscow Polytechnic University,
115280., Russia, Moscow, Avtozavodskaya 16,
ORCID: 0009-0009-2629-3001



Статья доступна по лицензии

Creative Commons «Attribution-NonCommercial»



25 – 27 ноября 2025 г.

«Петерфуд» — крупнейшая выставка Северо-Запада в сфере продовольственной торговли, которая более 33 лет является лучшей возможностью для продвижения продуктов питания на новые рынки и установления деловых контактов с руководителями и специалистами предприятий продовольственной отрасли.

Разделы выставки:

- Приправы, специи и соусы
- Джемы, сиропы
- Напитки и соки
- Здоровое питание
- Кулинария
- Алкогольные напитки (18+)
- Мясо, птица, яйцо
- Кондитерские изделия и хлеб
- Консервация
- Мед и пчеловодство
- Полуфабрикаты и заморозка
- Овощи и фрукты
- Макароны изделия
- Бакалея и зернопродукты
- Молочные изделия и сыры
- Чай, кофе, какао
- Логистика и транспорт
- Этикетка и полиграфия
- Оборудование и склад
- Тара и упаковка
- Рыба и морепродукты
- Масложировая продукция
- Снеки, орехи, сухофрукты

Оргкомитет выставки:

ООО «КВК Империя-Форум»
Тел./ф.: 8 (812) 327-49-18,
E-mail: peterfood@peterfood.ru
<http://peterfood.ru/>

Место проведения:

КВЦ «Экспофорум»
Петербургское шоссе 64, корпус 1,
павильон Е, конгресс-центр