

# МАШИНЫ И АППАРАТЫ, ПРОЦЕССЫ ХОЛОДИЛЬНОЙ И КРИОГЕННОЙ ТЯГИ/MACHINES AND APPARATUS, REFRIGERATION AND CRYOGENIC TRACTION PROCESSES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.161.21>

## МЕТОДИКА СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ НА ОСНОВАНИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Научная статья

Чернявская В.В.<sup>1</sup>, Сапожников В.Б.<sup>2</sup>, Угольников М.А.<sup>3</sup>, Голованов И.Ю.<sup>4,\*</sup><sup>1</sup>ORCID : 0009-0005-5986-0165;<sup>2</sup>ORCID : 0009-0002-9252-8437;<sup>3</sup>ORCID : 0009-0009-2629-3001;<sup>4</sup>ORCID : 0009-0007-9073-1235;<sup>1,2,3</sup>Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация<sup>4</sup>МИРЭА Российский Технологический Университет, Москва, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (igol95[at]yandex.ru)

### Аннотация

На современном этапе развития промышленности актуальной задачей для многих отраслей является совершенствование теплообменных аппаратов. Кроме новых технических решений, интерес представляет также разработка новых методик оценки эффективности теплообменных аппаратов. На сегодняшний день широкое распространение в промышленности получили теплообменные аппараты типа «труба в трубе», которые применяются в различных технологических процессах для нагрева, охлаждения, конденсации и кристаллизации различных рабочих сред. Одним из определяющих параметров при оценке эффективности теплообменных аппаратов, вне зависимости от области их применения, является теплообменная мощность, которая зависит от площади поверхности теплообмена. Увеличение площади поверхности теплообмена, при сохранении габаритных размеров аппарата, возможно путем применения теплообменной трубы сложной формы поперечного сечения — например, эллипсоиды с различным количеством каспов.

В статье представлены данные, полученные с использованием компьютерного моделирования, эффективности работы типовой и ряда запатентованных конструкций кристаллизаторов с теплообменной трубой, поперечное сечение которой имеет форму эллипсоиды с количеством каспов от 1 до 10. Эффективность работы кристаллизаторов представлена пятью удельными показателями, учитывающими компактность, материалоемкость, теплообменную мощность и производительность конструкций, а также затраты энергии при их эксплуатации.

Полученные данные позволили провести термодинамический анализ кристаллизаторов и получить для них уточненные уравнения определения коэффициента теплоотдачи в диапазоне значений скорости хладоносителя в межтрубном пространстве от 1,5 м/с до 3,9 м/с (соответствуют диапазону значений критерия Рейнольдса 4000–10000). Уточненные уравнения применимы для прогнозирования работы кристаллизаторов с учетом особенностей проявляющихся в них физических закономерностей процесса теплообмена.

На основании проведенного анализа кристаллизаторов предложена методика их сравнительной оценки, позволяющая определять наиболее рациональную и экономичную конструкцию для заданных условий эксплуатации.

**Ключевые слова:** теплообменный аппарат, кристаллизатор, труба в трубе, профиль теплообменной трубы, эллипсоид, компьютерное моделирование, коэффициент теплоотдачи, методика сравнительной оценки, удельные показатели эффективности.

## METHODOLOGY FOR COMPARATIVE EVALUATION OF CRYSTALLISERS BASED ON COMPUTATIONAL MODELLING AND THERMODYNAMIC ANALYSIS

Research article

Chernyavskaya V.V.<sup>1</sup>, Sapozhnikov V.B.<sup>2</sup>, Ugolnikova M.A.<sup>3</sup>, Golovanov I.Y.<sup>4,\*</sup><sup>1</sup>ORCID : 0009-0005-5986-0165;<sup>2</sup>ORCID : 0009-0002-9252-8437;<sup>3</sup>ORCID : 0009-0009-2629-3001;<sup>4</sup>ORCID : 0009-0007-9073-1235;<sup>1,2,3</sup>Moscow Polytechnic University, Russia, Moscow, Russian Federation<sup>4</sup>MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

\* Corresponding author (igol95[at]yandex.ru)

### Abstract

At the modern stage of industrial development, improving heat exchange equipment is a pressing issue for many industries. In addition to new technical solutions, the development of new methods for evaluating the efficiency of heat exchange equipment is also of interest. Today, 'tube-in-tube' heat exchangers are widely used in industry for heating, cooling, condensing, and crystallising various working media in different technological processes. One of the determining parameters in assessing the efficiency of heat exchangers, regardless of their area of application, is the heat exchange capacity, which depends on the heat exchange surface area. It is possible to increase the heat exchange surface area while maintaining the

overall dimensions of the unit by using heat exchange tubes with complex cross-sections, such as epicycloids with different numbers of cusps.

The article presents data obtained using computer modelling on the efficiency of a standard and several patented designs of crystallisers with a heat exchange pipe, the cross-section of which has the shape of an epicycloid with 1 to 10 cusps. The efficiency of the crystallisers is represented by five specific indicators that take into account the density, material consumption, heat exchange capacity and productivity of the designs, as well as the energy costs of their operation.

The obtained data made it possible to perform a thermodynamic analysis of the crystallisers and obtain specified equations for determining the heat transfer coefficient in the range of coolant velocity values in the intertube space from 1.5 m/s to 3.9 m/s (corresponding to a Reynolds number range of 4000–10000). The specified equations can be used to predict the performance of crystallisers, taking into account the physical laws of heat transfer that occur in them.

Based on the analysis of crystallisers, a method for their comparative evaluation has been suggested, allowing the most rational and economical design for given operating conditions to be determined.

**Keywords:** heat exchanger, crystalliser, pipe-in-pipe, heat exchange pipe profile, epicycloid, computer modelling, heat transfer coefficient, comparative assessment method, economic efficiency.

## Введение

Актуальной задачей для многих отраслей современной промышленности является совершенствование теплообменных аппаратов, среди которых распространены конструкции типа «труба в трубе». Теплообменные аппараты данного типа отличаются простотой конструкции и надежностью, а возможность их эксплуатации в условиях ледообразования позволяет применять их в качестве кристаллизаторов в криоконцентраторах и ледогенераторах.

При предложении новых конструкций аппаратов необходимо представить обоснование, по каким именно показателям эффективности их работы новые конструкции будут более совершенными в сравнении с известными. Различие в подходах к оценке эффективности работы теплообменных аппаратов делает актуальной разработку комплексной сравнительной оценки, включающей ряд наиболее важных характеристик аппаратов, таких как материалоемкость, компактность, тепловая мощность, потери мощности при эксплуатации аппарата.

Прогнозирование работы новых конструкций аппаратов может быть основано на уточненных уравнениях Навье-Стокса, определенных из массива экспериментальных данных.

Рассмотрим вертикальный кристаллизатор ёмкостного типа (концентрирование продукта на внутренней поверхности теплообменной трубы), приняв конструкцию типа «труба в трубе» (рисунок 1) [1], [2], [3].

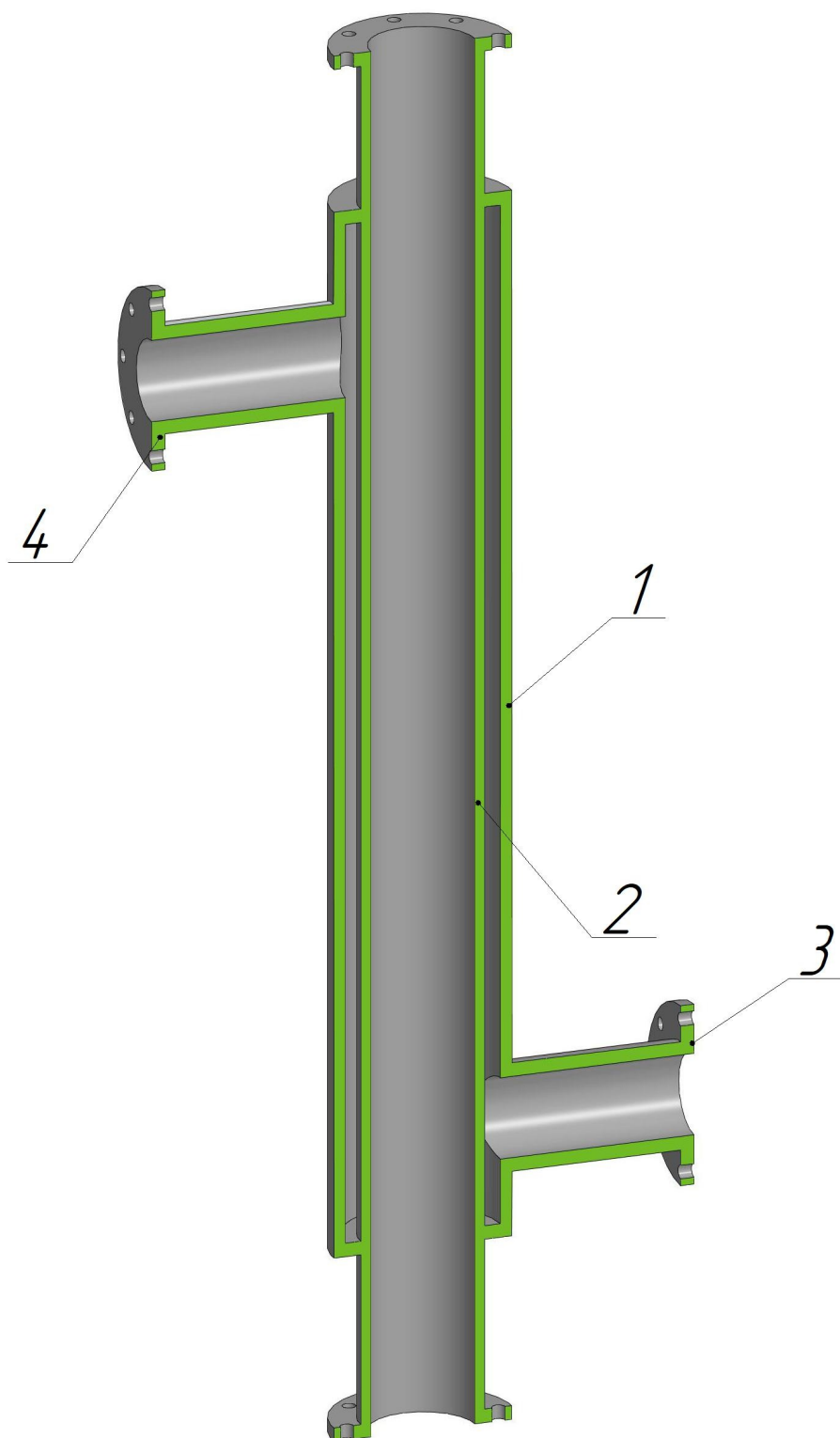


Рисунок 1 - Вертикальный кристаллизатор конструкции типа «труба в трубе»  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.161.21.1>

*Примечание: 1 – Корпус; 2 – Теплообменная труба; 3 – Патрубок входа хладагента; 4 – Патрубок выхода хладагента*

Такая конструкция может использоваться для концентрирования исходного жидкого продукта путем намораживания льда на внутренней поверхности теплообменной трубы (периодическое действие), а также для предварительного охлаждения среды, движущейся внутри теплообменной трубы (непрерывное действие).

Теплообмен в данном кристаллизаторе осуществляется за счет контакта исходного жидкого продукта с хладоносителем через поверхность теплообменной трубы 2. При этом исходный жидкий продукт движется внутри теплообменной трубы 2, а хладоноситель по межтрубному пространству, образованному теплообменной трубой 2 и корпусом 1. Корпус 1, в свою очередь, оснащен патрубками для входа 3 и выхода 4 хладоносителя.

Ключевое отличие кристаллизаторов от других рекуперативных теплообменников — их циклический принцип действия, состоящий из двух основных этапов. Первый этап — это охлаждение исходной жидкости ниже ее точки замерзания с помощью хладоносителя для кристаллизации. Второй этап — это отделение полученного льда и концентрированного продукта. Для отделения льда могут применяться механические средства (например, вибрация или резка) или тепловой метод, при котором используется теплоноситель с температурой, равной или выше температуры плавления льда.

Для оценки эффективности работы теплообменных аппаратов (включая кристаллизаторы) используются как натурные эксперименты (включая испытания на действующих предприятиях), так и компьютерное моделирование [4], [5], [6]. Хотя моделирование менее точно при фазовых переходах теплоносителей (что делает натурные эксперименты предпочтительнее), оно позволяет предварительно оценить целесообразность применения новой конкретной конструкции. Кроме того, компьютерное моделирование обеспечивает высокую точность при расчете параметров, не связанных с фазовыми переходами, например, количества передаваемого тепла и мощности, необходимой для перекачивания теплоносителей.

Таким образом, можно провести сравнительную оценку работы типовой конструкции кристаллизатора [7] и ряда новых конструкций при режимах работы без фазового перехода хладоносителя [9], [10], [11].

В настоящее время компьютерное моделирование широко используется для изучения процесса теплообмена, включая исследования с сопоставлением результатов моделирования с результатами натурных экспериментов.

В отечественных [12], [13], [14] работах отмечается высокая точность компьютерного моделирования. Аналогичные выводы представлены и в зарубежных публикациях [15], [16], [17]. Отмечается рациональность использования метода компьютерного моделирования и для описания различных теплообменных аппаратов со сложной геометрией каналов движения теплоносителей [18], [19], [20]. Методом компьютерного моделирования исследуется работа теплообменных аппаратов со сложными гетерогенными теплоносителями, например, с наночастицами металлов [21], [22], [23], где путем дальнейшего сопоставления с результатами натурных экспериментов, также сделаны выводы о высокой точности компьютерного моделирования.

### Методы и принципы исследования

Выполним кристаллизатор согласно нормативному документу [7] со следующими размерами: корпус из трубы Ø57×4 мм длиной 1400 мм; теплообменная труба Ø25×3 мм длиной 1500 мм; патрубки межтрубного пространства Ø32×4 мм длиной 155 мм; материал кристаллизатора — сталь марки 08X18H10T.

Проведем компьютерное моделирование работы кристаллизатора в программном комплексе "SolidWorks", приняв исходные данные: хладоноситель — этиленгликоль с массовой концентрацией 20% и температурой на входе в кристаллизатор +1°C; внутри теплообменной трубы движется вода с температурой на входе +10 °C. Скорость воды на входе примем равной 0,3 м/с, а скорость хладоносителя будет меняться от 1,5 м/с до 3,9 м/с (что соответствует диапазону значений критерия Рейнольдса 4000–10000), с шагом 0,3 м/с.

При расчете и проектировании рекуперативных теплообменных аппаратов и, в частности, кристаллизаторов одним из определяющих параметров для оценки их эффективности, вне зависимости от области применения, является теплообменная мощность [8]:

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

где  $Q$  — теплообменная мощность кристаллизатора, Вт;  $K$  — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);  $F$  — площадь поверхности теплообмена, м²;  $\Delta t$  — средняя разность температур между исходным жидким продуктом и хладоносителем, К.

Особое внимание уделяется увеличению данной характеристики при сохранении габаритных размеров кристаллизатора [2], [3].

В патентах [9], [10], [11] для повышения теплообменной мощности кристаллизатора предлагается применять теплообменные трубы с поперечным сечением в виде эписциклоиды с различным количеством каспов (рисунок 2).

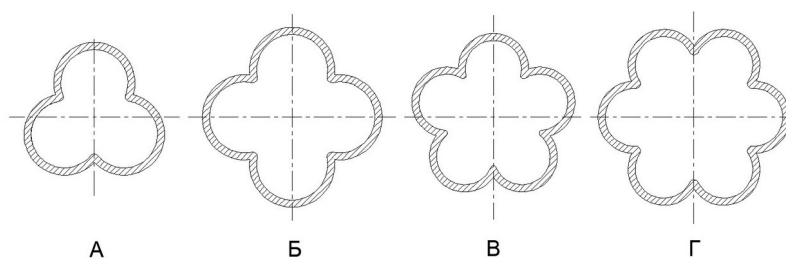


Рисунок 2 - Эписциклоиды с различным количеством каспов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.161.21.2>

Примечание: А – три каспа; Б – четыре каспа; В – пять каспов; Г – шесть каспов

Данное техническое решение увеличивает турбулентность потока хладоносителя в межтрубном пространстве кристаллизатора, что повышает его теплообменную мощность. При количестве каспов эписциклоиды более 3, дополнительно увеличивается площадь поверхности теплообмена (в сравнении с трубой круглого сечения, описывающей эписциклоиду), что в соответствии с уравнением (1), так же повысит теплообменную мощность кристаллизатора. Изменение площади поверхности теплообмена в зависимости от количества каспов эписциклоиды, в сравнении с трубой круглого сечения, описывающей эписциклоиду, представлено в таблице 1 [24].

Таблица 1 - Изменение площади поверхности теплообмена трубы-эписциклоиды в зависимости от количества ее каспов, относительно трубы круглого сечения

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.161.21.3>

Количество каспов эписциклоиды	3	4	5	6
Увеличение площади поверхности теплообмена, %	+1,9	+6,2	+9,2	+11,5

Трубы такой формы могут быть изготовлены путем применения валковой формовки (профилирования) [25], используя в качестве заготовки трубу круглого сечения. Приняв в качестве заготовки теплообменную трубу типовой конструкции кристаллизатора, можно получить теплообменные трубы-эписциклоиды с развитой поверхностью теплообмена и без изменения их массы, применение которых не отразится на габаритных размерах кристаллизатора.

К недостаткам данного технического решения можно отнести сложность изготовления труб-эписциклоид, что неизбежно приведет к увеличению стоимости кристаллизатора.

Проанализируем конструкции кристаллизаторов с теплообменными трубами-эписциклоидами с количеством каспов от 1 до 10. Примем для их моделирования те же исходные данные и габаритные размеры, что и для типовой конструкции.

Поставленная в работе цель — разработка новых конструкций оборудования холодильной техники, кристаллизаторов, и оценка рациональности их последующего внедрения для проведения опытно-промышленных испытаний на основании сравнения как между собой, так и с типовой конструкцией по показателям энерго- и ресурсосбережения — является актуальной для современной промышленности. Выбранные методы и принципы исследования соответствуют современной мировой и отечественной практике.

### Основные результаты

По итогам моделирования получены данные, позволяющие определить эмпирические коэффициенты в уравнении определения коэффициента теплоотдачи межтрубного пространства каждой из рассматриваемых конструкций кристаллизаторов в диапазоне значений критерия Рейнольдса 4000-10000. Уточненные уравнения для кристаллизаторов с разным сечением теплообменной трубы перечислены ниже.

Круглое сечение (типовая конструкция):

$$Nu = 0,008605 * Re^{0,794} * Pr^{0,4} \quad (2)$$

Эписциклоида с 1 каспом:

$$Nu = 0,005723 * Re^{0,844} * Pr^{0,4} \quad (3)$$

Эписциклоида с 2 каспами:

$$Nu = 0,001152 * Re^{1,022} * Pr^{0,4} \quad (4)$$

Эписциклоида с 3 каспами:

$$Nu = 0,001272 * Re^{1,012} * Pr^{0,4} \quad (5)$$

Эписциклоида с 4 каспами:

$$Nu = 0,00932 * Re^{0,774} * Pr^{0,4} \quad (6)$$

Эписциклоида с 5 каспами:

$$Nu = 0,039 * Re^{0,609} * Pr^{0,4} \quad (7)$$

Эписциклоида с 6 каспами:

$$Nu = 0,01 * Re^{0,747} * Pr^{0,4} \quad (8)$$

Эпициклоида с 7 каспами:

$$Nu = 0,0061 * Re^{0,551} * Pr^{0,4} \quad (9)$$

Эпициклоида с 8 каспами:

$$Nu = 0,038 * Re^{0,609} * Pr^{0,4} \quad (10)$$

Эпициклоида с 9 каспами:

$$Nu = 0,101 * Re^{0,515} * Pr^{0,4} \quad (11)$$

Эпициклоида с 10 каспами:

$$Nu = 0,297 * Re^{0,401} * Pr^{0,4} \quad (12)$$

где  $Nu$  — критерий Нуссельта;  $Re$  — критерий Рейнольдса;  $Pr$  — критерий Прандтля.

Представленные уточненные уравнения определения коэффициента теплоотдачи межтрубного пространства позволяют прогнозировать работу кристаллизаторов рассматриваемых конструкций, с учетом физико-химических свойств хладоносителя в межтрубном пространстве, его температуры и скорости на входе в кристаллизатор.

Для оценки эффективности кристаллизаторов предлагается использование ряда удельных показателей.

Отношение теплообменной мощности кристаллизатора к его массе:

$$m_y = Q/m \quad (13)$$

где  $m_y$  — удельная масса кристаллизатора Вт/кг;  $m$  — масса кристаллизатора кг.

Отношение теплообменной мощности кристаллизатора к его габаритным размерам:

$$O_y = Q/O \quad (14)$$

где  $O_y$  — компактность кристаллизатора, Вт/м<sup>3</sup>;  $O$  — габаритные размеры кристаллизатора, м<sup>3</sup>.

Отношение теплообменной мощности кристаллизатора к суммарным потерям мощности на перекачивание его рабочих сред:

$$E_y = Q/E \quad (15)$$

где  $E_y$  — удельный показатель суммарных потерь мощности к количеству передаваемого тепла при эксплуатации кристаллизатора, Вт/Вт;  $E$  — суммарные потери мощности на перекачивание рабочих сред кристаллизатора, Вт.

Отношение теплообменной мощности кристаллизатора к объему его внутритрубного пространства (максимальному объему исходного жидкого продукта):

$$O_Q = Q/O_{тр} \quad (16)$$

где  $O_Q$  — отношение теплообменной мощности кристаллизатора к объему его внутритрубного пространства, Вт/м<sup>3</sup>;  $O_{тр}$  — объем внутритрубного пространства кристаллизатора, м<sup>3</sup>.

Отношение суммарных потерь мощности на перекачивание рабочих сред кристаллизатора к объему его внутритрубного пространства:

$$O_E = E/O_{тр} \quad (17)$$

где  $O_E$  — отношение суммарных потерь мощности при эксплуатации кристаллизатора к объему его внутритрубного пространства, Вт/м<sup>3</sup>.

Для комплексной оценки кристаллизаторов различных конструкций предлагается разработанная методика сравнительной оценки, в основе которой лежат сумма отношений перечисленных удельных показателей.

Суть методики заключается в том, что в типовой конструкции величине каждого удельного показателя присваивается оценка 1,000. Оценки других конструкций кристаллизаторов получаем путем соотношения величин их удельных показателей с величинами соответствующих удельных показателей типовой конструкции. Так оценка будет показывать во сколько раз оцениваемая конструкция рациональнее к использованию в сравнении с типовой.

Оценки по удельным показателям (13)-(16) получаем путем деления величины показателя оцениваемой конструкции на величину соответствующего показателя типовой конструкции. Например, предположим, что у оцениваемой конструкции кристаллизатора отношение теплообменной мощности к его габаритным размерам равно 1500 Вт/м<sup>3</sup>, а у типовой конструкции оно равно 1234 Вт/м<sup>3</sup>. Тогда оценка оцениваемого кристаллизатора составит 1,216, а типового — 1,000.

Оценки по удельному показателю (17) получаем путем деления величины данного показателя типовой конструкции на величину этого же показателя оцениваемой конструкции. Для примера: у оцениваемой конструкции  $O_E$  равно 123, а у типовой  $O_E$  равно 98. Тогда оценка оцениваемого кристаллизатора составит 0,797, а типового — 1,000.

Чем выше оценки кристаллизатора по перечисленным удельным показателям, тем более рационально его использование в данном значении критерия Рейнольдса межтрубного пространства, относительно типовой конструкции.

Сложением всех полученных оценок каждой конструкции кристаллизаторов при каждом конкретном значении критерия Рейнольдса получаем суммарную сравнительную оценку рациональности применения новых конструкций кристаллизаторов для диапазона значений критерия Рейнольдса межтрубного пространства.

Величины удельных показателей получены по данным компьютерного моделирования всех рассматриваемых конструкций кристаллизаторов. Суммарные сравнительные оценки представлены на рисунке 3, где  $n$  — количество каспов эписциклоиды, образующей форму поперечного сечения теплообменной трубы.



Рисунок 3 - Суммарная сравнительная оценка кристаллизаторов  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.161.21.4>

Так как для получения суммарной сравнительной оценки кристаллизаторов использовались пять удельных показателей эффективности их работы, типовая конструкция имеет оценку равную 5,000 на всем диапазоне значений критерия Рейнольдса. Конструкции с оценками ниже типовой не рекомендуются к использованию, а оценки выше типовой позволяют рекомендовать данные конструкции кристаллизаторов взамен типовой.

По итогам суммарной сравнительной оценки можно рекомендовать в качестве замены типового кристаллизатора конструкции с теплообменной трубой-эписциклоидой с 9 и 10 каспами. Можно также выделить диапазон критерия Рейнольдса 7500–8500, в котором может быть рекомендована конструкция кристаллизатора с теплообменной трубой-эписциклоидой с 3 каспами.

В отличие от известных подходов к сравнительной оценке работы холодильного и теплообменного оборудования (например, представленные в работах [26], [27], [28]), предложенная методика представляет собой комплекс важных показателей энерго- и ресурсосбережения, что позволяет одновременно учитывать все наиболее важные характеристики работы кристаллизаторов.

### Обсуждение

Впервые представленные уравнения определения коэффициента теплоотдачи межтрубного пространства позволяют прогнозировать работу 10 новых конструкций кристаллизаторов с профильными теплообменными трубами. Представленные конструкции имеют потенциал широкого использования в линиях холодильной техники, например, концентрирования жидких пищевых продуктов и низкотемпературного опреснения.

Представленные результаты компьютерного моделирования позволяют рекомендовать к использованию конструкции кристаллизаторов с теплообменными трубами в форме эписциклоиды с 9 и 10 каспами в диапазоне значений критерия Рейнольдса в межтрубном пространстве 4000–10000. Для диапазона критерия Рейнольдса 7500–8500 может быть использована конструкция кристаллизатора с теплообменной трубой-эписциклоидой с 3 каспами. Данные конструкции обладают повышенной эффективностью, в сравнении с типовой конструкцией кристаллизатора по комплексу удельных показателей энерго- и ресурсосбережения: материалоемкость, компактность, потери мощности на перекачивание хладоносителя, теплообменная мощность и производительность (выраженная через максимальный объем исходного жидкого продукта в кристаллизаторе).

### Заключение

Представленные в статье результаты анализа ряда перспективных и запатентованных конструкций кристаллизаторов актуальны для разработки нового оборудования холодильной техники 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 совокупность удельных показателей энерго- и ресурсосбережения процесса.

С использованием компьютерного моделирования проведен термодинамический анализ разработанных и запатентованных конструкций кристаллизаторов с теплообменными трубами в форме эписциклоид с количеством

каспов от 1 до 10. Впервые представлены данные эффективности их работы, а также проведено сопоставление с типовой конструкцией кристаллизатора.

С применением метода вычислительного моделирования получены уточненные уравнения коэффициента теплоотдачи межтрубного пространства для кристаллизаторов типовой и рассмотренных запатентованных конструкций. Впервые представленные уравнения с уточненными эмпирическими коэффициентами позволяют прогнозировать работу кристаллизаторов и проводить углубленную оценку особенностей проявляющихся физических закономерностей хладоносителей при их эксплуатации.

Предложена методика сравнительной оценки кристаллизаторов, позволяющая определять их наиболее рациональную конструкцию с точки зрения экономичности. В отличие от традиционного подхода к оценке эффективности работы теплообменного и холодильного оборудования, предложенная методика позволяет учитывать комплекс наиболее важных показателей энерго- и ресурсосбережения, что необходимо при решении актуальной задачи современной промышленности — создании энерго- и ресурсоэффективных предприятий всех отраслей промышленности.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Ильичев В.Ю., Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Калуга  
Российская Федерация  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.161.21.5>

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

Ilichev V.Y., Bauman Moscow State Technical University,  
Kaluga Russian Federation  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.161.21.5>

### Список литературы / References

1. Коршунов А.Б. Аккумуляционные установки для охлаждения молока на фермах. / А.Б. Коршунов, Б.П. Коршунов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. — 2019. — 3(35). — С. 114–117. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=40848518> (дата обращения: 02.08.25).
2. Ugolnikova M.A. Dynamics of Water Ice Formation during the Operation of Vessel Cryoconcentrators. / M.A. Ugolnikova, V.V. Chernyavskaya // Chemical and Petroleum Engineering. — 2021. — 57(7-8). — Р. 561–566. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47532251> (accessed: 02.08.25). — DOI: 10.1007/s10556-021-00976-z
3. Чернявская В.В. Оценка влияния интенсификаторов теплообмена на энергомассовую эффективность кристаллизаторов. / В.В. Чернявская, В.Б. Сапожников, И.Ю. Голованов и др. // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2025. — 52(1). — С. 22–30. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82455897> (дата обращения: 02.08.25). — DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-22-30
4. Гильфанов К.Х. Нейросетевое моделирование теплообменных характеристик при поверхностной интенсификации теплообменного оборудования. / К.Х. Гильфанов, Р.А. Шакиров // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. — 2020. — 76(4). — С. 5–11. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44705776> (дата обращения: 02.08.25).
5. Соловьев С.В. Моделирование теплообмена жидкости в сферическом слое. / С.В. Соловьев, А.В. Чернышев // Южно-Сибирский научный вестник. — 2019. — 1(25). — С. 114–122. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37339177> (дата обращения: 02.08.25).
6. Ходяшов Е.О. Моделирование конвективного теплообменного аппарата с целью повышения его энергоэффективности. / Е.О. Ходяшов, М.П. Тюрин, О.И. Седяров и др. // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. — 2024. — 3(411). — С. 218–225. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68557906> (дата обращения: 02.08.25). — DOI: 10.47367/0021-3497\_2024\_3\_218
7. ТУ 3612-014-00220302-99. Теплообменники труба в трубе. Технические условия. — Введ. 1999-10-01. — Москва: Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт нефтяного машиностроения АООТ "ВНИИНЕФТЕМАШ", 1999. — 109 С. — URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293804/4293804404.pdf?ysclid=mdtxui8uan726956380>. (дата обращения: 02.08.25).
8. Lagutkin M.G. Increasing Efficiency of Shell-and-Tube Heat Exchanger Taking Account of Energy Consumption Reduction. / M.G. Lagutkin, E.Y. Baranova, D.I. Mishachkin et al. // Chemical and Petroleum Engineering. — 2022. — 57(9-10). — Р. 713–719. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48149174> (accessed: 02.08.25). — DOI: 10.1007/s10556-022-00997-2
9. Пат. 2833685 Российская Федерация, МПК B01D 9/04. Ёмкостный криоконцентратор / Чернявская В., Юрицына А.М., Голованов И.Ю.; заявитель и патентообладатель Чернявская В., Юрицына А.М., Голованов И.Ю.. — № 2024115628; заявл. 2024-06-06; опубл. 2025-01-28, — 9 с. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80413128>. (дата обращения: 02.08.25).
10. Пат. 228348 Российская Федерация, МПК B01D 9/04. Ёмкостный криоконцентратор / Чернявская В., Юрицына А.М., Голованов И.Ю.; заявитель и патентообладатель Чернявская В., Юрицына А.М., Голованов И.Ю.. — № 2024117971; заявл. 2024-06-28; опубл. 2024-08-23, — 7 с. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=69917874>. (дата обращения: 02.08.25).
11. Пат. 229196 Российская Федерация, МПК B01D 9/04. Ёмкостный криоконцентратор / Чернявская В., Юрицына А.М., Голованов И.Ю.; заявитель и патентообладатель Чернявская В., Юрицына А.М., Голованов И.Ю.. — №



2024117883; заявл. 2024-06-27; опубл. 2024-09-25, Chernyavskaya V., Yuritsyna A.M., Golovanov I.Yu.. — 7 с. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=73414499>. (дата обращения: 02.08.25).

12. Щетинина Ю.В. Экспериментальное подтверждение результатов компьютерного моделирования теплообменного аппарата типа «труба в трубе». / Ю.В. Щетинина, С.А. Соколова, И.Ю. Голованов и др. // VIII Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «МИЛЛИОНЩИКОВ-2025», приуроченная к 80-летию атомной промышленности (в рамках реализации программы развития передовой инженерной школы «РОСГЕОТЕХ»); — Грозный: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова", 2025. — С. 315–320. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82809024>. (дата обращения: 16.10.25).

13. Романова Е.В. Применение пакета Ansys при исследовании гидравлического сопротивления оребренного рекуператора. / Е.В. Романова, А.Н. Колиух, Е.А. Лебедев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. — 2017. — 3. — С. 420–427. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30450920> (дата обращения: 16.10.25). — DOI: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.420-427

14. Романова Е.В. Исследование гидравлического сопротивления оребренного рекуператора с применением пакета ANSYS. / Е.В. Романова, А.Н. Колиух. // Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности (ISTS "EESTE-2021"); — Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)", 2021. — С. 122–124. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47502619>. (дата обращения: 16.10.25). doi: 10.37816/eeste-2021-2-122-124

15. Bahrami H.R. Enhancing a Double Pipe PCM Reservoir Melting Efficiency Through Innovative Fin Arrangements: A Numerical Study. / H.R. Bahrami, A. Azizi, M. Ghaedi // Arabian Journal for Science and Engineering. — 2024. — 1. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13369-024-09840-7> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1007/s13369-024-09840-7

16. Kossel L. Experimental investigations and thermodynamic analyses of meter-scale helium pulsating heat pipes. / L. Kossel, J. Pfothner, F. Miller // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2025. — 236. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0017931024010925?via%3Dihub> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126263

17. Marzouk S.A. A comprehensive review of methods of heat transfer enhancement in shell and tube heat exchangers. / S.A. Marzouk, M.M. Abou Al-Sood, E.M.S. El-Said et al. // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. — 2023. — 148. — P. 7539–7578. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-023-12265-3> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1007/s10973-023-12265-3

18. Marzouk S.A. Performance analysis of twisted tape inserts and nanofluids in double-pipe helical coil heat exchangers. / S.A. Marzouk, F.A. Almeahmadi, A. Aljabr et al. // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. — 2025. — 150. — P. 11197–11211. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-025-14298-2> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1007/s10973-025-14298-2

19. Sahin M. Investigation of heat transfer enhancement using hemispherical turbulators in a double-pipe regenerative heat exchanger with phase change material. / M. Sahin, M. Kilic, M.A. Karadag // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. — 2025. — 150. — P. 10249–10265. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-025-14387-2> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1007/s10973-025-14387-2

20. Al-Mudhafar A.H.N. Enhancing PCM melting in a triple tube heat exchanger by utilizing innovative fins configurations. / A.H.N. Al-Mudhafar, A.L. Tarish // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. — 2024. — 46. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40430-024-04848-4> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1007/s40430-024-04848-4

21. Jaganathan S. Experimental investigation of the performance of silver nanofluid as a coolant in a helical shell and tube heat exchanger. / S. Jaganathan, B. Devaraj Naik, V. Ravikumar et al. // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. — 2024. — 149. — P. 439–451. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-023-12722-z> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1007/s10973-023-12722-z

22. Karabulut K. Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in a circular copper tube using graphene oxide nanofluid. / K. Karabulut, E. Buyruk, F. Kilinc // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. — 2020. — 42. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40430-020-02319-0> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1007/s40430-020-02319-0

23. Kadhim S.A. Critical review of the use of TiO<sub>2</sub> nanofluid as a heat transfer fluid in the double-pipe heat exchanger. / S.A. Kadhim, O.A.A.M. Ibrahim, M.K.S. Al-Ghezi et al. // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. — 2025. — 150. — P. 11995–12015. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-025-14531-y> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1007/s10973-025-14531-y

24. Берман Г.Н. Циклоида. Об одной замечательной кривой и некоторых других, с ней связанных / Г.Н. Берман. — Москва: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. — 117 с. — URL: [https://www.mathedu.ru/text/berman\\_tsikloida\\_1954/p0/](https://www.mathedu.ru/text/berman_tsikloida_1954/p0/). (дата обращения: 02.08.25).

25. Моисеев А.А. Особенности получения сложных замкнутых профилей из круглой трубы методом непрерывной валковой формовки. / А.А. Моисеев, О.В. Соколова, А.Е. Лепестов // Сталь. — 2018. — 11. — С. 32–34. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36512042> (дата обращения: 02.08.25).

26. Ahirwar B.K. Effect of wire coil inserts on heat transfer enhancement and fluid flow characteristics of a double-pipe heat exchanger. / B.K. Ahirwar, A. Kumar // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. — 2024. — 149. — P. 3027–3042. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-024-12889-z> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1007/s10973-024-12889-z

27. Ali R.K. Convective heat transfer enhancement inside tubes using inserted helical coils. / R.K. Ali, M.A. Sharafeldeen, N.S. Berbish et al. // Thermal Engineering. — 2016. — 63. — P. 42–50. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0040601516010018> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1134/S0040601516010018
28. Chourasia S. Numerical study of fluid flow and heat transfer in a circular tube with Trapezoidal-cut twisted tape inserts. / S. Chourasia, A. Kumar, B.K. Ahirwar // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. — 2024. — 149. — P. 9851–9866. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-024-13389-w> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1007/s10973-024-13389-w

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Korshunov A.B. Akkumulyatsionny'e ustanovki dlya oxlazhdeniya moloka na fermakh [Storage units for milk cooling on farms]. / A.B. Korshunov, B.P. Korshunov // Bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute of Animal Husbandry Mechanization. — 2019. — 3(35). — P. 114–117. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=40848518> (accessed: 02.08.25). [in Russian]
2. Ugolnikova M.A. Dynamics of Water Ice Formation during the Operation of Vessel Cryoconcentrators. / M.A. Ugolnikova, V.V. Chernyavskaya // Chemical and Petroleum Engineering. — 2021. — 57(7-8). — P. 561–566. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47532251> (accessed: 02.08.25). — DOI: 10.1007/s10556-021-00976-z
3. Chernyavskaya V.V. Ocenka vliyaniya intensivifikatorov teploobmena na e'nergomassovuyu e'ffektivnost' kristallizatorov [Evaluation of the effect of heat exchange intensifiers on the energy and mass efficiency of crystallizers]. / V.V. Chernyavskaya, V.B. Sapozhnikov, I.Yu. Golovanov et al. // Bulletin of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. — 2025. — 52(1). — P. 22–30. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82455897> (accessed: 02.08.25). — DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-22-30 [in Russian]
4. Gil'fanov K.X. Nejrosetevoye modelirovanie teploobmennyykh xarakteristik pri poverkhnostnoy intensivifikatsii teploobmennogo oborudovaniya [Neural network modeling of heat exchange characteristics during surface intensification of heat exchange equipment]. / K.X. Gil'fanov, R.A. Shakirov // Bulletin of Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev. — 2020. — 76(4). — P. 5–11. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44705776> (accessed: 02.08.25). [in Russian]
5. Solov'ev S.V. Modelirovanie teploobmena zhidkosti v sfericheskom sloe [Simulation of heat transfer of a liquid in a spherical layer]. / S.V. Solov'ev, A.V. Cherny'shev // South Siberian Scientific Bulletin. — 2019. — 1(25). — P. 114–122. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37339177> (accessed: 02.08.25). [in Russian]
6. Xodyashov E.O. Modelirovanie konvektivnogo teploobmennogo apparata s cel'yu povysheniya ego e'nergie'effektivnosti [Simulation of a convective heat exchanger in order to increase its energy efficiency]. / E.O. Xodyashov, M.P. Tyurin, O.I. Sedlyarov et al. // News of higher educational institutions. Textile industry technology. — 2024. — 3(411). — P. 218–225. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68557906> (accessed: 02.08.25). — DOI: 10.47367/0021-3497\_2024\_3\_218 [in Russian]
7. TU 3612-014-00220302-99. Teploobmenniki truba v trube. Texnicheskie usloviya [TU 3612-014-00220302-99. Heat exchangers are pipe in pipe. Technical specifications]. — Introduced 1999-10-01. — Moscow: Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy i proektno-konstruktorskiy institut neftyanogo mashinostroeniya AOOT "VNIINEFTEMASH", 1999. — 109 P. — URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293804/4293804404.pdf?ysclid=mdtxui8uan726956380>. (accessed: 02.08.25). [in Russian]
8. Lagutkin M.G. Increasing Efficiency of Shell-and-Tube Heat Exchanger Taking Account of Energy Consumption Reduction. / M.G. Lagutkin, E.Y. Baranova, D.I. Mishachkin et al. // Chemical and Petroleum Engineering. — 2022. — 57(9-10). — P. 713–719. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48149174> (accessed: 02.08.25). — DOI: 10.1007/s10556-022-00997-2
9. Pat. 2833685 Russian Federation, IPC B01D 9/04. Yomkostny'j kriokoncentrator [Capacitive cryoconcentrator] / Chernyavskaya V., Yuricy'na A.M., Golovanov I.Yu.; the applicant and the patentee Chernyavskaya V., Yuritsyna A.M., Golovanov I.Yu.. — № 2024115628; appl. 2024-06-06; publ. 2025-01-28, — 9 p. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80413128>. (accessed: 02.08.25). [in Russian]
10. Pat. 228348 Russian Federation, IPC B01D 9/04. Yomkostny'j kriokoncentrator [Capacitive cryoconcentrator] / Chernyavskaya V., Yuricy'na A.M., Golovanov I.Yu.; the applicant and the patentee Chernyavskaya V., Yuritsyna A.M., Golovanov I.Yu.. — № 2024117971; appl. 2024-06-28; publ. 2024-08-23, — 7 p. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=69917874>. (accessed: 02.08.25). [in Russian]
11. Pat. 229196 Russian Federation, IPC B01D 9/04. Yomkostny'j kriokoncentrator [Capacitive cryoconcentrator] / Chernyavskaya V., Yuricy'na A.M., Golovanov I.Yu.; the applicant and the patentee Чернявская В., Юрицына А.М., Голованов И.Ю.. — № 2024117883; appl. 2024-06-27; publ. 2024-09-25, Chernyavskaya V., Yuritsyna A.M., Golovanov I.Yu.. — 7 p. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=73414499>. (accessed: 02.08.25). [in Russian]
12. Shhetinina Yu.V. E'ksperimental'noe podtverzhdenie rezul'tatov komp'yuternogo modelirovaniya teploobmennogo apparata tipa «truba v trube» [Experimental confirmation of the results of computer simulation of a pipe-in-pipe heat exchanger]. / Yu.V. Shhetinina, S.A. Sokolova, I.Yu. Golovanov et al. // VIII All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "MILLIONAIRES-2025", dedicated to the 80th anniversary of the nuclear industry (as part of the ROSGEOTECH Advanced Engineering School Development program); — Grozny'y: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vy'sshego obrazovaniya "Grozniyskiy gosudarstvenny'j neftyanoy tekhnicheskij universitet imeni akademika M.D. Millionshhikova", 2025. — P. 315–320. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82809024>. (accessed: 16.10.25). [in Russian]
13. Romanova E.V. Primenenie paketa Ansys pri issledovanii gidravlicheskogo soprotivleniya orebrenogo rekuperatora [Application of the Ansys package in the study of the hydraulic resistance of a finned heat exchanger]. / E.V. Romanova, A.N.

- Koliux, E.A. Lebedev // Bulletin of the Tambov State Technical University. — 2017. — 3. — P. 420–427. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30450920> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.420-427 [in Russian]
14. Romanova E.V. Issledovanie gidravlicheskogo soprotivleniya orebrennogo rekuperatora s primeneniem paketa ANSYS [Investigation of the hydraulic resistance of a finned heat exchanger using the ANSYS package]. / E.V. Romanova, A.N. Koliux. // Improving energy efficiency and environmental safety of processes and devices in chemical and related industries (ISTS "EESTE-2021"); — Moscow: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vy'sshego obrazovaniya "Rossijskij gosudarstvennyj universitet imeni A.N. Kosy'gina (Texnologii. Dizajn. Iskusstvo)", 2021. — P. 122–124. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47502619>. (accessed: 16.10.25). doi: 10.37816/eeste-2021-2-122-124 [in Russian]
15. Bahrami H.R. Enhancing a Double Pipe PCM Reservoir Melting Efficiency Through Innovative Fin Arrangements: A Numerical Study. / H.R. Bahrami, A. Azizi, M. Ghaedi // Arabian Journal for Science and Engineering. — 2024. — 1. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13369-024-09840-7> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1007/s13369-024-09840-7
16. Kossel L. Experimental investigations and thermodynamic analyses of meter-scale helium pulsating heat pipes. / L. Kossel, J. Pfoth, F. Müller // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2025. — 236. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0017931024010925?via%3Dihub> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126263
17. Marzouk S.A. A comprehensive review of methods of heat transfer enhancement in shell and tube heat exchangers. / S.A. Marzouk, M.M. Abou Al-Sood, E.M.S. El-Said et al. // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. — 2023. — 148. — P. 7539–7578. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-023-12265-3> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1007/s10973-023-12265-3
18. Marzouk S.A. Performance analysis of twisted tape inserts and nanofluids in double-pipe helical coil heat exchangers. / S.A. Marzouk, F.A. Almeahmadi, A. Aljabr et al. // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. — 2025. — 150. — P. 11197–11211. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-025-14298-2> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1007/s10973-025-14298-2
19. Sahin M. Investigation of heat transfer enhancement using hemispherical turbulators in a double-pipe regenerative heat exchanger with phase change material. / M. Sahin, M. Kilic, M.A. Karadag // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. — 2025. — 150. — P. 10249–10265. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-025-14387-2> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1007/s10973-025-14387-2
20. Al-Mudhafar A.H.N. Enhancing PCM melting in a triple tube heat exchanger by utilizing innovative fins configurations. / A.H.N. Al-Mudhafar, A.L. Tarish // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. — 2024. — 46. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40430-024-04848-4> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1007/s40430-024-04848-4
21. Jaganathan S. Experimental investigation of the performance of silver nanofluid as a coolant in a helical shell and tube heat exchanger. / S. Jaganathan, B. Devaraj Naik, V. Ravikumar et al. // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. — 2024. — 149. — P. 439–451. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-023-12722-z> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1007/s10973-023-12722-z
22. Karabulut K. Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in a circular copper tube using graphene oxide nanofluid. / K. Karabulut, E. Buyruk, F. Kilinc // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. — 2020. — 42. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40430-020-02319-0> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1007/s40430-020-02319-0
23. Kadhim S.A. Critical review of the use of TiO<sub>2</sub> nanofluid as a heat transfer fluid in the double-pipe heat exchanger. / S.A. Kadhim, O.A.A.M. Ibrahim, M.K.S. Al-Ghezi et al. // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. — 2025. — 150. — P. 11995–12015. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-025-14531-y> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1007/s10973-025-14531-y
24. Berman G.N. Cikloida. Ob odnoj zamechatel'noj krivoj i nekotoryx drugix, s nej svyazannyx [The cycloid. About one remarkable curve and some others related to it] / G.N. Berman. — Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1954. — 117 p. — URL: [https://www.mathedu.ru/text/berman\\_tsikloida\\_1954/p0/](https://www.mathedu.ru/text/berman_tsikloida_1954/p0/). (accessed: 02.08.25). [in Russian]
25. Moiseev A.A. Osobennosti polucheniya slozhnyx zamknutyx profilej iz krugloj truby' metodom nepreryvnoj valkovoj formovki [Features of obtaining complex closed profiles from a round tube by continuous roll forming]. / A.A. Moiseev, O.V. Sokolova, A.E. Lepetov // Steel. — 2018. — 11. — P. 32–34. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36512042> (accessed: 02.08.25). [in Russian]
26. Ahirwar B.K. Effect of wire coil inserts on heat transfer enhancement and fluid flow characteristics of a double-pipe heat exchanger. / B.K. Ahirwar, A. Kumar // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. — 2024. — 149. — P. 3027–3042. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-024-12889-z> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1007/s10973-024-12889-z
27. Ali R.K. Convective heat transfer enhancement inside tubes using inserted helical coils. / R.K. Ali, M.A. Sharafeldeen, N.S. Berbish et al. // Thermal Engineering. — 2016. — 63. — P. 42–50. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0040601516010018> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1134/S0040601516010018
28. Chourasia S. Numerical study of fluid flow and heat transfer in a circular tube with Trapezoidal-cut twisted tape inserts. / S. Chourasia, A. Kumar, B.K. Ahirwar // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. — 2024. — 149. — P. 9851–9866. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-024-13389-w> (accessed: 16.10.25). — DOI: 10.1007/s10973-024-13389-w