

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 6221.565

DOI: 10.21822/2073-6185-2026-53-2-14-22



Оригинальная статья /Original article

**Методика определения времени цикла криоконцентрирования
в кристаллизаторе объемного принципа действия**

А.В. Чернявский, М.А. Угольникова, В.В. Чернявская

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

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка методики расчета аппаратов с внутритрубным намораживанием льда для проектирования энергетически эффективных аппаратов, работающих в условиях образования льда. Необходимо определить скорость роста слоя льда, что является нестационарной теплофизической задачей, при решении которой необходимо учитывать увеличение термического сопротивления слоя льда с течением времени. **Метод.** Исследование основано на методах термодинамического анализа процессов и объектов криогенной техники. **Результат.** Результаты исследования показывают удовлетворительную сходимость расчётных и экспериментальных данных. **Вывод.** Представленная методика может быть использована для расчета криоконцентраторов объемного принципа действия, а также другого оборудования, работающего в условиях образования льда на внутренней цилиндрической поверхности.

Ключевые слова: опреснение воды, вымораживание, ледообразование, очистка воды, кристаллизатор, скорость охлаждения, скорость замораживания, время цикла концентрирования.

Для цитирования: А.В. Чернявский, М.А. Угольникова, В.В. Чернявская. Методика определения времени цикла криоконцентрирования в кристаллизаторе объемного принципа действия. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(2):14-22. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-2-14-22

**Methodology for Determining the Cryoconcentration Cycle Time
in a Volumetric Crystallizer**

A.V. Chernyavsky, M.A. Ugolnikova, V.V. Chernyavskaya

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

Abstract. Objective. The purpose of this study is to develop a calculation method for devices with in-tube ice freezing for the design of energy-efficient devices operating under ice formation conditions. It is necessary to determine the ice layer growth rate, which is a non-stationary thermophysical problem that requires in consideration of the increase in the thermal resistance of the ice layer over time. **Method.** The study is based on methods of thermodynamic analysis of cryogenic engineering processes and objects. **Result.** The results of the study demonstrate satisfactory agreement between the calculated and experimental data. **Conclusion.** The presented method can be used for calculating volumetric cryocentrators, as well as other equipment operating under ice formation conditions on the inner cylindrical surface.

Keywords: water desalination, freezing, ice formation, water purification, crystallizer, cooling rate, freezing rate, concentration cycle time.

For citation: A.V. Chernyavsky, M.A. Ugolnikova, V.V. Chernyavskaya. Methodology for Determining the Cryoconcentration Cycle Time in a Volumetric Crystallizer. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(2):14-22. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-2-14-22

Введение. В настоящее время опреснение воды и концентрация жидких пищевых продуктов является востребованной во всём мире. Применение технологии разделения жидких сред методом вымораживания (криоконцентрирования) являются перспективными в вопросах, связанных с обеспечением чистой водой и максимально полным использованием пищевых ресурсов [1-4].

Криоскопические процессы, основанные на использовании низких температур для вымораживания воды из жидкого продукта, позволяют как производить пресную воду пищевого качества, так и получать концентраты различных продуктов такие как молочная сыворотка, соки, кофе и др., максимально полно сохраняющие полезные свойства исходных жидких продуктов [5-8]. По своему принципу действия криоконцентраторы схожи с ледогенераторами и некоторыми видами холодоаккумуляторов и их можно выделить в группу устройств, работающих в условиях ледообразования в кристаллизаторе.

В ряде случаев конструкция кристаллизатора предполагает намораживания льда на внутренней поверхности трубы [9-11]. Для проектирования энергетически эффективных аппаратов, работающих в условиях образования льда, необходимо решать задачу по определению скорости роста слоя льда, что является нестационарной теплофизической задачей, при решении которой необходимо учитывать увеличение термического сопротивления слоя льда с течением времени [12]. Для случая образования льда в ограниченном объеме жидкости, например, при внутритрубном намораживании, дополнительная сложность заключается в изменении температуры концентрируемой жидкости в процессе работы аппарата.

Постановка задачи. Рассмотрим конструкцию кристаллизатора, представляющего собой теплообменный аппарат типа «труба в трубе», показанный на рис. 1.

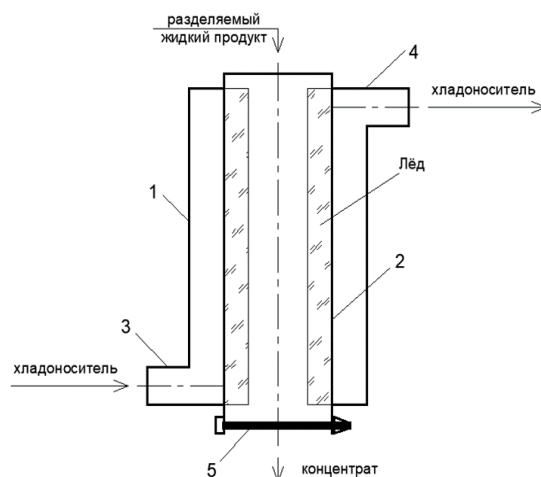


Рис. 1 - Типовая конструкция теплообменного аппарата типа «труба в трубе»

Fig. 1 - Typical design of a heat exchanger of the type

Данный аппарат работает следующим образом: в трубу 2 подается концентрируемая жидкость, после чего труба закрывается крышкой 5. Затем через патрубок 3 в кожуховую трубу 1 подается холодоноситель, который после прохода по межтрубному пространству выводится через патрубок выхода 4. Происходит теплообмен между концентрируемой жидкостью и холодоносителем через теплообменную трубу 2, в результате чего на внутренней поверхности теплообменной трубы 2 намораживается лёд.

По достижению требуемой толщины слоя льда, открывается крышка 5 и концентрат выводится из аппарата. После чего начинается процесс оттаивания для удаления льда из аппарата. При вертикальном расположении теплообменной трубы достаточно произвести оттайку пристенного слоя льда что приведёт к удалению льда из аппарата под действием собственного веса. Одной из важных задач при проектировании, для аппаратов, работающих подобным образом, является определение времени цикла намораживания.

Методы исследования. Для определения времени намораживания льда на теплообменной поверхности авторами предложена следующая методика, предполагающая

две стадии: охлаждение концентрируемой жидкости до криоскопической температуры воды; намораживание слоя льда, на внутренней поверхности теплообменной трубы, заданной толщины. Предлагаемая методика состоит из следующих этапов:

1. Определение необходимой толщины слоя льда в теплообменной трубе.

Исходя из принятых геометрических размеров кристаллизатора и рекомендаций, предложенных в работах [13-15], требуется определить необходимую толщину слоя льда в зависимости от начального объема исходного жидкого продукта. Толщину слоя льда можно выразить как:

$$\frac{V_{\text{конц}}}{V_{\text{тр}}} = \frac{R_{\text{л}}^2}{R_{\text{тр}}^2} \quad (1)$$

где: $V_{\text{конц}}$ – объем получаемого концентрата, м³;

$V_{\text{тр}}$ – внутренний объем емкости-кристаллизатора, м³.

$R_{\text{л}}$ – радиус ледяного цилиндра, м;

$R_{\text{тр}}$ – внутренний радиус теплообменной трубы, м.

$$R_{\text{л}} = \sqrt{\frac{V_{\text{конц}}}{V_{\text{тр}}} \cdot R_{\text{тр}}^2} \quad (2)$$

$$\delta_{\text{л}} = R_{\text{тр}} - R_{\text{л}} \quad (3)$$

где: $\delta_{\text{л}}$ – искомая толщина слоя льда, м.

2. Определение времени охлаждения исходного жидкого продукта $\tau_{\text{ост}}$ до криоскопической температуры воды.

Для определения времени охлаждения исходного жидкого продукта можно использовать уравнение (4) [16]:

$$\tau_{\text{ост}} = 3600 \cdot \frac{R_{\text{тр}}^2 \cdot \rho_{\text{кж}} \cdot 0,000239 \cdot C_{p \text{ кж}}}{k_{\text{т}}} \ln \frac{T_{\text{н.кж}} - T_{\text{хс}}}{T_{\text{ф}} - T_{\text{хс}}} \quad (4)$$

где: $d_{\text{тр}}$ – внутренний диаметр теплообменной трубы, м;

$\rho_{\text{кж}}$ – плотность концентрируемой жидкости, кг/м³;

$T_{\text{н.кж}}$ – начальная температура концентрируемой жидкости, заливаемой в кристаллизатор, К;

$T_{\text{ф}}$ – температура кристаллизации воды, К;

$T_{\text{хс}}$ – температура хладоносителя, К;

$C_{p \text{ кж}}$ – теплоемкость концентрируемой жидкости, Дж/кг·К.

Линейный коэффициент теплопередачи $k_{\text{т}}$ определяется по выражению [16] (5).

$$k_{\text{т}} = \frac{1}{\frac{1}{1,71969 \cdot \lambda_{\text{тр}}} \ln \frac{R_{\text{нар.тр}}}{R_{\text{тр}}} + \frac{1}{1,71969 \cdot \alpha_{\text{хс}} \cdot R_{\text{нар.тр}}}} \text{ Вт/м} \cdot \text{К}; \quad (5)$$

где: $\lambda_{\text{тр}}$ – коэффициент теплопроводности стенки теплообменной трубы, Вт/м·К;

$R_{\text{нар.тр}}$ – наружный радиус теплообменной трубы, Вт/м·К;

$\alpha_{\text{хс}}$ – коэффициент теплоотдачи на теплообменной трубе, Вт/м²·К.

3. Определение коэффициента теплоотдачи от исходного жидкого продукта к поверхности льда и от охлаждающей среды к поверхности теплообмена.

Расчет коэффициента теплоотдачи (6) от концентрируемой жидкости к поверхности льда в условиях естественной конвекции целесообразно начинать с определения критериев Прандтля и Графгофа. Движение концентрируемой жидкости в теплообменной трубе обусловлено свободной конвекцией в ограниченном пространстве. Коэффициент теплоотдачи от концентрируемой жидкости $\alpha_{\text{кж}}$ для данных условий можно определить следующим образом [17]:

$$\alpha_{\text{кж}} = \frac{q}{\bar{T}_{\text{кж}} - T_{\text{ф}}} \quad (6)$$

где: q – удельный тепловой поток, Вт/м²;

$\bar{T}_{\text{кж}}$ – средняя температура концентрируемой жидкости в теплообменной трубе во время процесса ледообразования, К.

$$q = \lambda_{\text{эк}} \cdot \frac{T_{\text{кж}} - T_{\text{ф}}}{2 \cdot \bar{R}_{\text{л}}} \quad (7)$$

где: $\lambda_{\text{эк}}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности исходного жидкого продукта, Вт/м·К;

$\bar{R}_{\text{л}}$ – средний радиус льда $\bar{R}_{\text{л}} = R_{\text{тр}} - 0,5 \cdot \delta_{\text{л}}$, м.

$$\lambda_{\text{эк}} = \lambda_{\text{кж}} \cdot \varepsilon_{\text{к}} \quad (8)$$

где $\lambda_{\text{кж}}$ – коэффициент теплопроводности концентрируемой жидкости, Вт/м·К;

$\varepsilon_{\text{к}}$ – коэффициент конвекции.

$$\varepsilon_{\text{к}} = 0,105 \cdot (Pr_{\text{кж}} \cdot Gr_{\text{кж}})^{0,3} \quad (9)$$

Выражение для коэффициента конвекции (9) справедливо при значениях $10^3 < Pr_{\text{кж}} \cdot Gr_{\text{кж}} < 10^6$.

При условии, где $10^6 < Pr_{\text{кж}} \cdot Gr_{\text{кж}} < 10^{10}$, при котором коэффициент конвекции рекомендуется вычислять по уравнению (10):

$$\varepsilon_{\text{к}} = 0,4 \cdot (Pr_{\text{кж}} \cdot Gr_{\text{кж}})^{0,2} \quad (10)$$

Значение числа Нуссельта при вынужденном движении жидкости в кольцевом канале определяется по в зависимости от режимов течения определяется по выражениям:

- для ламинарного режима [18]:

$$Nu_{\text{хс}} = 0,15 \cdot Re_{\text{хс}}^{0,33} \cdot Pr_{\text{хс}}^{0,43} \cdot Gr_{\text{хс}}^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr_{\text{хс}}}{Pr_{\text{ст}}}\right)^{0,25} \quad (11)$$

Необходимо отметить, что при ламинарном режиме течения наблюдается влияние свободной конвекции, что отражает учет числа Грасгофа $Gr_{\text{хс}}$ в формуле (11)

- для турбулентного режима [19]:

$$Nu_{\text{хс}} = 0,017 \cdot Re_{\text{хс}}^{0,8} \cdot Pr_{\text{хс}}^{0,4} \cdot \left(\frac{R_{\text{кор}}}{R_{\text{нар.тр}}}\right)^{0,18} \cdot \left(\frac{Pr_{\text{хс}}}{Pr_{\text{ст}}}\right)^{0,25} \quad (12)$$

4. Определение времени, необходимого для получения слоя льда заданной толщины $\delta_{\text{л}}$.

В первую очередь необходимо определить зависящий от времени показатель β , определяющий скорость роста слоя льда, по уравнению (13) [20]:

$$T_{\text{ф}} = \frac{T_{\text{ф}} + \frac{\alpha_{\text{хс}} \cdot T_{\text{хс}} \cdot \beta \sqrt{\tau}}{\lambda_{\text{л}}}}{\frac{\alpha_{\text{хс}} \cdot \beta \cdot \sqrt{\tau}}{\lambda_{\text{л}}} + 1} + \left(\frac{\rho_{\text{л}} \cdot L \cdot \beta}{2 \cdot \lambda_{\text{л}}} + \frac{\alpha_{\text{кж}} \cdot (T_{\text{окж}} - T_{\text{ф}}) \cdot \sqrt{\tau}}{\lambda_{\text{л}}} \right) \times$$

$$\times \beta + \left(-\frac{\rho_{\text{л}} \cdot L \cdot \beta}{2 \cdot \lambda_{\text{л}}} - \frac{\alpha_{\text{кж}} \cdot (T_{\text{окж}} - T_{\text{ф}}) \cdot \sqrt{\tau}}{\lambda_{\text{л}}} \right) \cdot \left(\frac{\beta}{2 \cdot a_{\text{л}}} + \frac{\sqrt{\tau}}{R_{\text{тр}}} \right) \cdot \frac{\beta^2}{2} \quad (13)$$

где: $T_{\text{окж}}$ – температура концентрируемой жидкости после стадии охлаждения, которую в расчётах рекомендуется принимать 275 К;

$\rho_{\text{л}}$ – плотность льда, кг/м³;

$\lambda_{\text{л}}$ – коэффициент теплопроводности льда, Вт/м·К.

Зная показатель β , определяющий скорость роста слоя льда, в соответствии с выражением (14) определяется толщина слоя льда на заданный момент времени τ [20]:

$$\delta_{\text{л}}(\tau) = \beta \cdot \sqrt{\tau} \quad (14)$$

На основании уравнений (13) и (14), можно определить время необходимое для намораживания слоя льда заданной толщины $\tau_{\text{зам}}$.

Общее время цикла работы аппарата $\tau_{\text{ц}}$ можно найти как:

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{охл}} + \tau_{\text{зам}} \quad (15)$$

Обсуждение результатов. Для проверки работоспособности представленной методики был разработан и смонтирован экспериментальный стенд. Схема экспериментального стенда выглядит следующим образом (рис. 2):

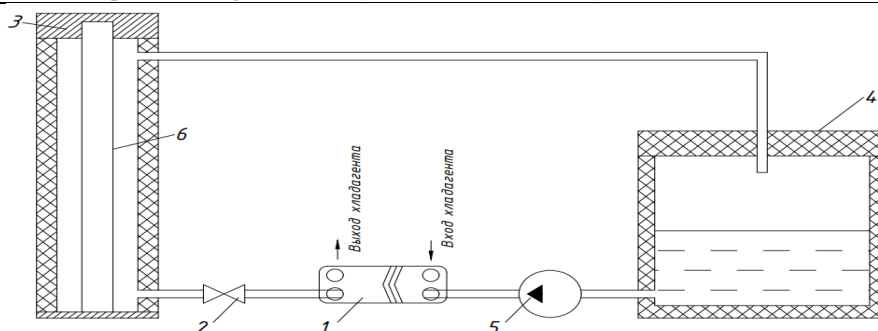


Рис. 2 - Схема экспериментального стенда

Fig. 2 - Type of experimental stand

Пропиленгликоль из расширительного бака 4 подается с помощью циркуляционного насоса 5 в пластинчатый испаритель 1 холодильной установки, где охлаждается до температуры -10°C . Охлажденный гликоль подается в пластиковую трубу 3, где за счет низкой температуры охлаждает поверхность внутренней алюминиевой трубы 6, после чего, уже отепленный возвращается в расширительный бак 4. Между пластиковой трубой 3 и расширительным баком 4 установлен регулирующий вентиль 2, необходимый для изменения расхода пропиленгликоля в экспериментальном стенде.

Внутри алюминиевой трубы 6 заливается жидкая среда, которую нужно разделить с помощью вымораживания. За счет контакта разделяемой жидкости с холодной стенкой трубы начинается процесс льдообразования, который и приводит к замерзанию жидкой среды по легко замерзающему компоненту. Для снятия показаний по скорости перемещения фронта фазового превращения в верхней части трубы 6 устанавливается измерительное устройство. С помощью подсветки камеры во время проведения опытов можно снимать данные о толщине слоя льда с мерной шкалы [19]. Общий вид экспериментального стенда и измерительного устройства представлены на рис. 3 и 4.



Рис. 3 - Устройство для измерения толщины намороженного слоя льда во время проведения эксперимента

Fig. 3 - Device for measuring the thickness of a frozen ice layer during an experiment



Рис. 4 - Экспериментальный стенд

Fig. 4 - Experimental stand

В соответствии с представленной методикой определения времени цикла концентрирования в криоконцентраторе объёмного принципа действия были произведены расчеты, соответствующие условиям теплообмена экспериментального исследования.

В качестве концентрируемой жидкости для эксперимента была принята пресная вода, для уменьшения погрешности эксперимента за счёт более стабильных теплофизических свойств. В качестве хладоносителя был принят раствор пропиленгликоля

с концентрацией 45% (температура замерзания -30°C). Геометрические параметры стенда: размеры теплообменной трубы кристаллизатора $50 \times 1,5$ мм; размеры корпуса кристаллизатора $110 \times 3,4$ мм; материал теплообменной трубы алюминий с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{тр}} = 230 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$; Экспериментальное исследование состояло из трех серий по 15 опытов в каждой. Опыты проводились для следующих условий теплообмена:

Серия опытов №1.

Начальная температура жидкого продукта $t_{\text{кж}}=3^{\circ}\text{C}$; температура охлаждающей среды $t_{\text{хс}} = -10^{\circ}\text{C}$; время проведения опыта $\tau=40$ мин.

Серия опытов №2.

Начальная температура жидкого продукта $t_{\text{кж}}=10,^{\circ}\text{C}$; температура охлаждающей среды $t_{\text{хс}} = -10^{\circ}\text{C}$; время проведения опыта $\tau=40$ мин.

Серия опытов №3.

Начальная температура исходного жидкого продукта $t_{\text{кж}}=20^{\circ}\text{C}$; температура охлаждающей среды $t_{\text{хс}} = -10^{\circ}\text{C}$; время проведения опыта $\tau=40$ мин.

В соответствии с представленной методикой были получены следующие результаты:

Для первой серии опытов:

- коэффициент теплоотдачи от охлаждающей среды к поверхности теплообмена $\alpha_{\text{хс}}=95,181 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$;

- время охлаждения воды от начальной до криоскопической температуры воды не учитывается, так как её начальная температура близка к криоскопической;

- коэффициент теплоотдачи от исходного жидкого продукта к поверхности льда $\alpha_{\text{кж}}=84,549 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$.

Результаты расчета и сопоставление их с данными опытного исследования представлены на рис. 5:

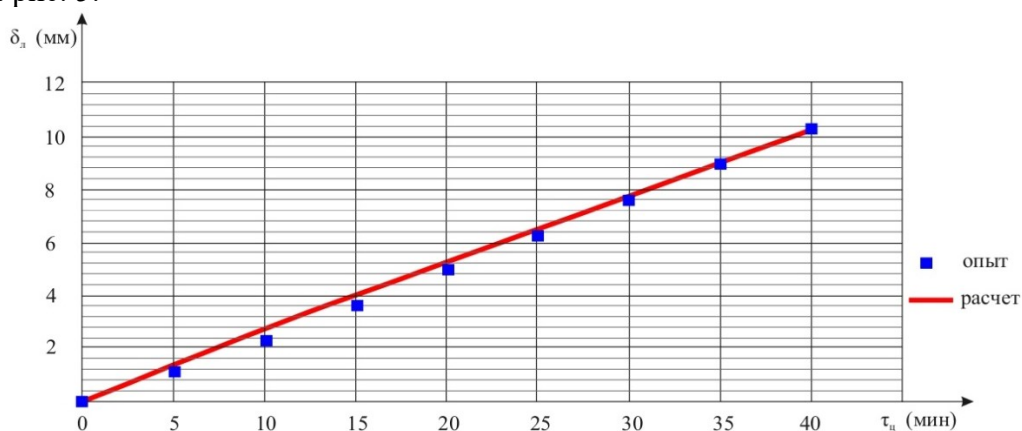


Рис. 5 - Сравнение теоретического расчета и опытных данных (для первой серии опытов)

Fig. 5 - Comparison of theoretical calculations and experimental data (for the first series of experiments)

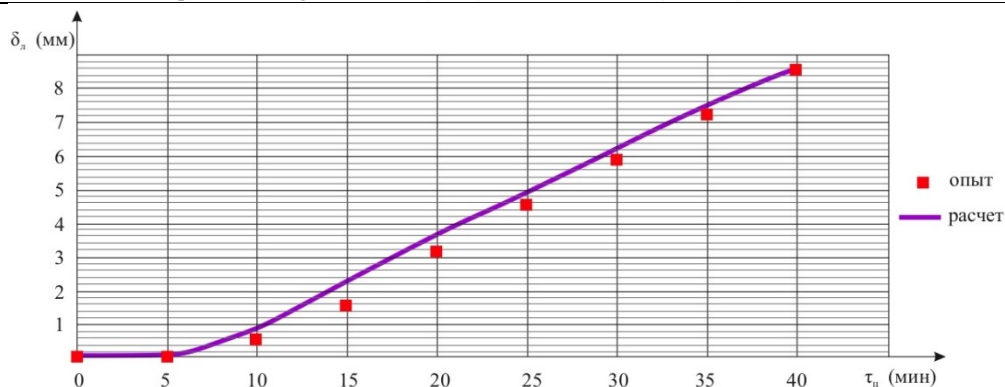
Для второй серии опытов:

- коэффициент теплоотдачи от охлаждающей среды к поверхности теплообмена $\alpha_{\text{хс}}=95,181 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$;

- время охлаждения исходного жидкого продукта от начальной до криоскопической температуры воды $\tau_{\text{ост}}= 393$ сек;

- коэффициент теплоотдачи от исходного жидкого продукта к поверхности льда $\alpha_{\text{ижп}}=84,093 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$.

Результаты расчета и сопоставление их с данными опытного исследования представлены на рис. 6:



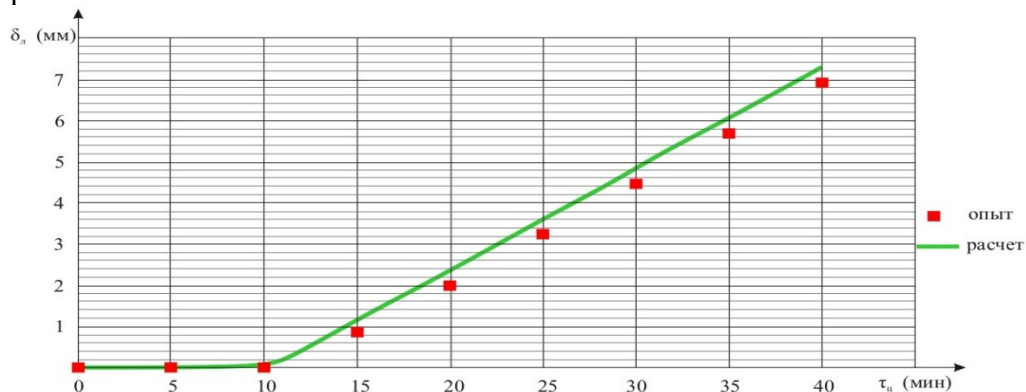
**Рис. 6 - Сравнение теоретического расчета и опытных данных
(для второй серии опытов)**

**Fig. 6 - Comparison of theoretical calculations and experimental data
(for the second series of experiments)**

Для третьей серии опытов:

- коэффициент теплоотдачи от охлаждающей среды к поверхности теплообмена $\alpha_{\text{хс}}=95,181 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
- время охлаждения исходного жидкого продукта от начальной до криоскопической температуры воды $\tau_{\text{ост}}=633 \text{ сек}$;
- коэффициент теплоотдачи от исходного жидкого продукта к поверхности льда $\alpha_{\text{ижп}}=83,69 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Результаты расчета и сопоставление их с данными опытного исследования представлены на рис. 7:



**Рис. 7 - Сравнения теоретического расчета и опытных данных
(для третьей серии опытов)**

**Fig. 7 - Comparison of theoretical calculations and experimental data
(for the third series of experiments)**

Как следует из представленных результатов расчета и данных опытного исследования (рис. 5-7), представленная методика расчета дает удовлетворительную сходимость с результатами эксперимента.

Вывод. В результате исследования была предложена методика расчета устройства объемного принципа действия, работающего в условиях ледообразования, которая учитывает время охлаждения концентрируемой жидкости в теплообменной трубе.

На базе разработанного авторами экспериментального стенда было проведено исследование с целью подтверждения работоспособности методики расчета времени цикла концентрирования для аппаратов объемного принципа действия. Результаты исследования показывают удовлетворительную сходимость расчётных и экспериментальных данных. Результаты работы могут быть использованы для расчёта и проектирования аппаратов с внутритрубным намораживанием льда.

Библиографический список:

1. Бурдо О.Г. Терзиев С.Г. Мордынский В.П. Сиротюк И.В. Фатеева Я.А. Многофункциональное оборудование для низкотемпературного разделения пищевых растворов на основе эффекта "термического парадокса". Проблемы региональной энергетики. 2022. № 1 (53). С. 42-58.
2. Конева С.А., Матвеев Ю.В., Цалоев В.М. Сравнительная оценка энергоэффективности способов опреснения морской воды. Journal of Advanced Research in Technical Science. 2022. № 28 С. 94-97.
3. Борисов И.М. Термодинамические основы процесса получения пресной воды методом кристаллизации. Российский химический журнал. 2022. № 1. С. 66-70.
4. Короткий И.А., Федоров Д.Е., Тризно Н.А., Исследование работы емкостного кристаллизатора для разделительного вымораживания жидких пищевых продуктов. Техника и технология пищевых производств. 2012. № 4(27). С. 106-110.
5. Короткий И.А., Гунько П.А., Федоров Д.Е. Исследование процессов криоконцентрирования молочной сыворотки. Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2014. № 1(88). С. 148-153.
6. Лугинин М.И. Разработка и исследование струйного криоконцентратора жидких продуктов: дис. ... канд. техн. наук. Махачкала. 2008. 138 с.
7. Лебедева С.Н., Щёктова А.В., Атласова Д.В., Аюшеева Р.Б., Хамагаева И.С., Котова Т.И. Получение обогащенного белкового концентрата на основе молочной сыворотки. Техника и технология пищевых производств. 2025. № 2. С. 257-271.
8. Кондратьева Я.И. Разработка и исследование установки для концентрирования вишневого сока вымораживанием: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж. 2018. 228 с.
9. 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.
10. 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.
11. Патент RU № 2509514 С1 Российская Федерация, МПК А23L3/00 (2006.01). Устройство для концентрирования жидких пищевых продуктов / Короткий И.А., Гунько П.А., Мальцева О.М., Учайкин А.В.; № 2012146711/13; заявл. 01.11.2012; опубл. 20.03.2014, Бюл. № 8 – 5 с.
12. Гаджиев А.М., Юсуфов Ш.А. Математическая модель образования льда на теплообменной поверхности термоэлектрического опреснителя. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016. № 2. С. 43-48.
13. Патент № 2805851 С1 Российская Федерация, МПК В01D9/04 А23С17/00 (2006.01). Способ криоконцентрирования молочной сыворотки / Ермолаев В.А., Федоров Д.Е.; № 2023105985; заявл. 15.03.2023; опубл. 24.10.2023, Бюл. № 30. – 8 с.
14. Патент № 2818334 С1 Российская Федерация, МПК А23L2/02 А23L2/08 (2006.01). Способ криоконцентрирования вишневого сока / Ермолаев В.А., Федоров Д.Е.; № 2023132221; заявл. 07.12.2023; опубл. 02.05.2024, Бюл. № 13. – 7 с.
15. Патент № 2807704 С1 Российская Федерация, МПК А23L2/02 А23L2/08 (2006.01). Способ криоконцентрирования гранатового сока. Ермолаев В.А., Федоров Д.Е.; № 2023105855; заявл. 14.03.2023; опубл. 21.11.2023. Бюл. № 33. – 8 с.
16. Ястребов А.Л. Инженерные коммуникации на вечномёрзлых грунтах. Ленинград: Стройиздат. 1972. 175 с.
17. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Москва: Энергия. 1977. 343 с.
18. Алтунин В.А., Львов М.В., Юсупов А.А., Щиголев А.А., Кореев Е.П., Яновская М.Л. Анализ методик расчета теплоотдачи к моторному авиационному маслу марки МС-20 в условиях вынужденной конвекции в кольцевом канале с учетом их верификации с экспериментом. Инженерный журнал: наука и инновации. 2023. № 7 (139). С. 1-15.
19. Дахин С.В. Расчет рекуперативных теплообменных аппаратов непрерывного действия: учеб. пособие. Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет». 2008. 110 с.
20. Угольников М.А. Моделирование процессов теплообмена при намораживании водного льда на неизолированных элементах низкотемпературного оборудования: дис. ... канд. техн. наук. Москва. 2017. 140 с.

References:

1. Burdo O.G., Terziev S. G., Mordynskiy V.P., Sirotiyuk I.V., Fateeva Ya.A. Multifunctional Equipment for Low-temperature Separation of Food Solutions Based on The Effect of "Thermal Paradox". *Problemele energeticii regionale*. 2022; 1:42-58. (In Russ)
2. Koneva S.A., Matveev Yu.V., Tsaloiev V.M. Comparative assessment of the energy efficiency of seawater desalination methods. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2022; 28: 94-97. (In Russ)
3. Borisov I.M. Thermodynamic foundations of the process of obtaining fresh water by crystallization. *Russian Chemical Journal*. 2022; 1: 66-70. (In Russ)

4. Korotky I.A., Fedorov D.E., Trizno N.A. Research on the operation of the capacitive crystallizer for freezing out of liquid food products. *Food Processing: Techniques and technology*. 2012; 4(27):106-110. (In Russ)
5. Korotkiy I.A., Gunko P.A., Fedorov D.E. The research of the milk whey cryo-concentration processes. *Bulletin of KSAU*. 2014; 1(88):148-153. (In Russ)
6. Luginin M.I. Development and research of a jet cryoconcentrator for liquid products: dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Makhachkala. 2008. 138 p.
7. Lebedeva S.N., Shchekotova A.V., Atlasova D.V., Ayusheeva R.B., Khamagaeva I.S., Kotova T.I. Fortified Protein Concentrate Based on Milk Whey. *Food Processing: Techniques and technology*. 2025; 2: 257-271. (In Russ)
8. Kondrateva Ja. I. Development and research of a plant for concentrating cherry juice by freezing: dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Voronezh. 2018. 228 p.
9. Ugolnikova M.A., Chernyavskaya V.V. Dynamics of water ice formation during the operation of vessel cryoconcentrators. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2021; 57:561-566.
10. 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.
11. Patent of the Russian Federation No № 2509514 C1, IPC A23L3/00 (2006.01). Device for concentrating liquid food products: No 2012146711/13: declared. 01.11.2012: publ. 20.03.2014. I.A. Korotkiy, P.A. Gunko, O.M. Maltseva, A.V. Uchaikin. (In Russ)
12. Gajiyev A.M., Yusufov Sh.A. Mathematical model of ice formation on teploobmennogo side of the thermo-electric desalination plant. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2016; 41(2):43-49. (In Russ)
13. Patent of the Russian Federation No 2805851 C1, IPC B01D 9/04, A23C 17/00. Method of cryoconcentration of whey: No 2023105985: declared. 15.03.2023: publ. 24.10.2023. V.A. Ermolaev, D.E. Fedorov. (In Russ)
14. Patent of the Russian Federation No № 2818334 C1 IPC A23L 2/02, A23L 2/08. Method of cryoconcentration of cherry juice: No 2023132221: declared. 07.12.2023: publ. 02.05.2024. V.A. Ermolaev, D.E. Fedorov. (In Russ)
15. Patent of the Russian Federation No №2807704 C1 IPC A23L2/02 A23L2/08 (2006.01). Method of cryoconcentration of pomegranate juice. No 2023105855: declared. 14.03.2023: publ. 21.11.2023. V.A. Ermolaev, D.E. Fedorov. (In Russ)
16. Iastrebov A.L. Engineering communications on permafrost soils. L.: Stroiizdat. 1972. 175 p.
17. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. Fundamentals of Heat Transfer - 2nd ed., reprinted. Moscow: *Energia*. 1977. 343 p.
18. Altunin V.A., Lvov M.V., Yusupov A.A., Shchigolev A.A., Koreev E.P., Yanovskaya M.L. Analysis of the methods for calculating heat transfer in regard to the MS-20 brand motor aviation oil under conditions of forced convection in the ring channel given their verification with the experiment. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii*. 2023; 7 (139): 1-15. (In Russ)
19. Dakhin S.V. Calculation of continuous recuperative heat exchangers: textbook. Voronezh: *State Educational Institution of Higher Professional Education "Voronezh State Technical University"*. 2008. 110 p.
20. Ugolnikova M.A. Modeling of heat transfer processes during freezing of water ice on uninsulated elements of low-temperature equipment: dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Moscow. 2017. 140 p

Сведения об авторах:

Чернявский Александр Васильевич, аспирант кафедры «Техника низких температур им. П.Л. Капицы»; a_ch14@mail.ru; ORCID: 0009-0000-6964-4101.

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

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

Information about authors:

Alexander V. Chernyavsky, Postgraduate Student, Department «Low Temperature Engineering named after P.L. Kapitsa»; a_ch14@mail.ru; ORCID: 0009-0000-6964-4101.

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.

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

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

Поступила в редакцию/Received 08.12.2025.

Одобрена после рецензирования/ Revised 01.02.2026.

Принята в печать/Accepted for publication 02.04.2026.