

ДОСЛІДЖЕННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПРОЦЕСІВ ОПРІСНЕННЯ ВОДИ

Мординський В.П., к.т.н., доцент, Бурдо А.К., к.т.н., доцент, Фатєєва Я. О., аспірантка,
Грещук В.П., аспірант
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. В роботі проведено аналіз установок блочного виморожування. Проаналізовано основні методи вилучення води з харчових рідин. Обґрунтовано шляхи зменшення витрат енергії та інтенсифікації процесу формування блоку льоду. Запропоновано основні підходи до спрощення цього процесу з енергетичної точки зору та з точки зору витрат часу. Досліджено кінетику утворення крижаної брили. Виявлено основні недоліки процесу заморозжування. Запропоновано шляхи удосконалення блокових морозильних установок, які допоможуть вирішити ці проблеми. Показано, що енергетична ефективність збільшується при рециклінгу льоду, використанні його енергії для переохолодження холодильного агента перед дроселюванням. Інтенсифікація процесу кристалізації проходить за ефектом «термічного парадоксу». Констатовано, що при певних узгоджених конструктивних і робочих параметрах відбувається зниження теплового опору в ланцюжку «холодоагент – поверхня кристалізатора – розчин». Запропонована методика розрахунку установок блочного виморожування для задач опріснення води. В основі алгоритму розрахунку число фазового переходу та дифузійне число Фруда. Систематизовано дані з моделювання процесів низькотемпературного опріснення води. Визначено основні завдання розрахунку, експерименту та оптимізації процесу заморозжування блоку. Наведено результати експериментального та аналітичного моделювання процесів опріснення води. Наведено результати досліджень, які дозволяють визначити раціональні режими організації процесів опріснення солоної води в блокових морозильних установках.

Ключові слова: блочне виморожування, водопідготовка, блок льоду, низькотемпературний процес, інтенсифікація, ефективність, кристалізація, розчин, опріснення, розділення, енергетичні витрати, параметри, холодильний агент, установка, моделювання, зменшення витрат, питна вода, рідина, сепарування, кристали льоду, технологічна схема, конструкція.

Вступ. Багато років водопідготовка не визначалась як галузь техніки й ще менше як галузь хімічної та харчової технології. Наразі, ключовим етапом багатьох харчових технологій є процеси вилучення води з рідких харчових систем. Задачі розділення багатокомпонентних розчинів необхідно вирішувати при їх концентруванні, доочищенні питної води, підготовці технологічної води, очищенні стічних вод та ін. За останні 30 років загальна продуктивність опріснювальних систем зросла більше, ніж у 50 разів. Принципово є три шляхи часткового вилучення води із харчових систем. Перший – це перевести воду в стан пару, другий – в тверду фазу, третій – здійснити механічне розділення рідкої системи. Економіка процесів зневоднення в значній мірі визначається рівнем енергетичних витрат. Відомо, що менша робота витрачається при переводі речовини у більш організовану структуру. Тому технології виморожування відрізняються меншими енергетичними витратами. В напрямку низькотемпературних процесів знесолення води проводились дослідження, наведені у статті.

Аналіз літературних джерел та формулювання наукової гіпотези. Низькотемпературні системи для опріснення води включають два процеси: кристалізацію та сепарування [1]. В останні роки все більше уваги приділяється знесоленню морської води [2]. Для традиційних технологій характерно, що процес формування кристалів льоду проходить інтенсивно, а сепарування є довгим та потребує значних витрат енергії [3]. Системний аналіз показує, що можна отримати загальний виграв у часі та енергетичних витратах, якщо інакше організувати процеси. Необхідно узгодити інтенсивність процесів генерації та сепарування льоду [3]. Така ідея є основою технології блочного виморожування [4 – 6]. Для реалізації ідеї блочного виморожування сформульовано ряд принципів:

- вилучити з технологічної схеми допоміжне обладнання (насоси, проміжні ємності та інш.);
- організувати на утворення поверхні блоку льоду з щільною упаковкою кристалів;
- проводити формування блоку льоду з постійним ростом поверхні розділу «тверда фаза - розчин».

Для чого процес кристалізації проводити на голчатих випарниках.

Такий підхід значно спростить етап сепарування та дозволить вилучити із технологічної схеми спеціальні апарати для розділення льоду та розчину. Також слід проводити розділення в умовах гравітаційного сепарування розчину з об'єму блоку льоду. Така організація процесу дозволила суттєво спростити технологічну схему та створити просту і надійну конструкцію установки. Основні переваги технології блочного виморожування у відсутності схемних втрат енергії у допоміжних вузлах та перехід від машинного принципу сепарування до апаратного. Організація спрощених методів кристалізації та сепарування дозволила сут-

тево зменшити витрати енергії [7]. Подальше удосконалення технології блочного виморожування пов'язано із використанням рециклінгу льоду [8]. Холодильний агент після конденсатора подавався у плавитель льоду де він охолоджувався до нульової температури. Це суттєво підвищувало питому холодильну продуктивність та холодильний коефіцієнт. Досліджувався вплив ультразвуку на процес кристалізації [9], визначено режими, при яких утворюється максимально щільна структура льоду.

Таким чином, нова реалізація установок блочного виморожування свідчить про перспективність технології. Недоліками розробки є періодичність, невелика продуктивність та ручне завантаження і вивантаження компонентів. Подальше удосконалення процесу має вирішити ці проблеми. Пропозиції авторів базуються на гіпотезі про те, що «перехід низькотемпературних опріснювачів із рециклінгом льоду до установок безперервної дії можливий за умови послідовної організації на поверхнях теплопередачі процесів кристалізації, сепарування та плавлення». Варіантом реалізації даної ідеї є система електромагнітних клапанів на лініях холодильного агента та води за допомогою яких керується послідовність і час етапів процесу та температура льоду.

Моделювання низькотемпературних процесів опріснення води. Технічна ідея установки з рециклінгом льоду наведена на (рис.1).

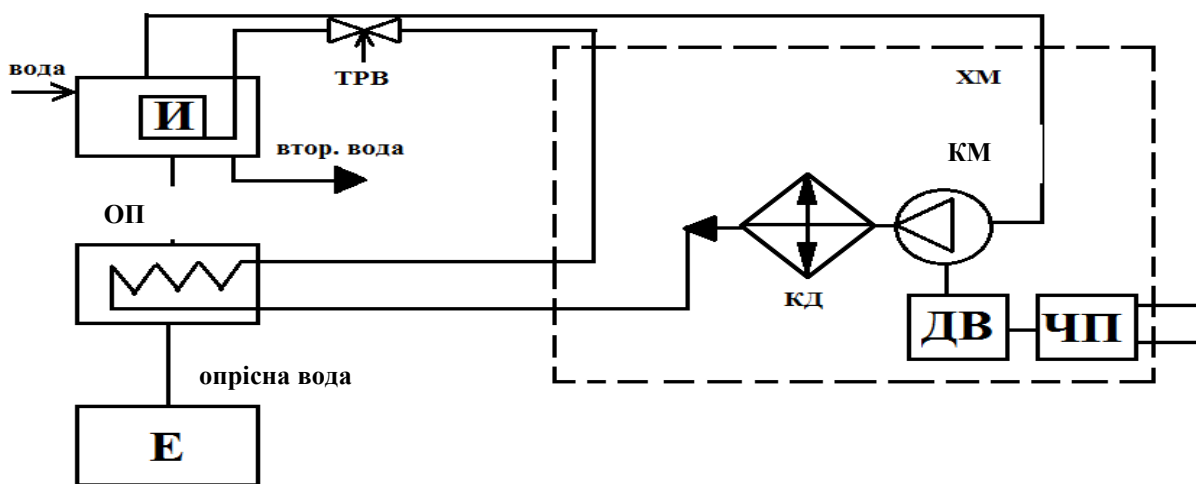


Рис. 1 – Схема опріснювача з рециклінгом льоду та частотним управлінням потужності

Основними елементами опріснювача є: холодильна машина з компресором (КМ), конденсатором (КД), випарником (И), терморегулюючим вентилем (ТРВ) та охолоджувач холодильного агента (ОП). Прісна вода збирається у ємність (Е). Двигун компресора (Д) управляється частотним перетворювачем (ЧП), який забезпечує відповідну холодопродуктивність ХМ при запуску установки (без льоду в системі) та в штатному режимі з рециклінгом льоду. Реально охолоджувати холодильний агент після конденсації до 1 ... 3 °С.

Подальше математичне моделювання доцільно проводити на основі теорії подібності при наступних припущеннях:

- тепломасоперенесення здійснюється на поверхні випарників, кристалізація в об'ємі відсутня;
- процес проходить в умовах природної конвекції, а температура поверхні льоду визначається кріоскопічними умовами $t_{\text{л}} = t_{\text{с}}$;
- всі сухі речовини розглядаються як один компонент;
- зміна ентальпії льоду незначна порівняно з теплотою кристалізації.

Загальне рівняння теплового балансу має вигляд:

$$Q = c_p * V_p * \rho_p \frac{\Delta t_p}{\Delta \tau} + \Omega F_{\text{л}} \frac{\Delta r_{\text{л}}}{\Delta \tau} + Q_{\text{пот}} \quad (1)$$

З урахуванням прийнятих припущень для безрозмірної координати $x = (r_{\text{л}} - r_{\text{и}})/(r_{\text{к}} - r_{\text{и}})$ визначається безрозмірний час виморожування:

$$F_0 = \frac{Ph}{2(n+1)} \left(1 + \frac{2}{Bi_T} \right) \quad (2)$$

де Bi_T – число Біо теплове:

$$Bi_{iT} = \alpha_{\chi} * r_T \left(\frac{\ln r_k}{r_T \lambda_T} + \frac{\ln r_l}{r_k \lambda_l} \right), \quad (3)$$

Ph – число фазового переходу:

$$Ph = \frac{\rho_p \Omega}{\rho c_{p_l}(t_p - t_k)} \quad (4)$$

В рівняннях (1 - 4) n - константа, яка залежить від форми блоку льоду, (для циліндра $n = 1$); α_x - коефіцієнт тепловіддачі від холодильного агенту до стінки кристалізатора, Вт/(м²К); r_t - внутрішній радіус стінки кристалізатора, м; r_k - радіус концентратора, м; r_l - радіус блоку льоду, м; λ_k - теплопровідність стінки кристалізатора, Вт/(мК); λ_l - теплопровідність льоду, Вт/(мК); ρ_p , ρ_l - щільність розчину та льоду, кг/м³; Ω - питома теплота кристалізації, Дж/кг; C_{pl} - питома теплоємність льоду, Дж/(кг К).

З урахуванням змін ентальпії твердої фази та особливостей масоперенесення на границі «льоду та розчину» дійсний час процесу буде:

$$\tau = \tau_0 \psi_1 \psi_2 \quad (5)$$

де ψ_1 - коефіцієнт, що враховує зміну ентальпії льоду:

$$\psi_1 \approx 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Bi_T}{Bi_T + 1} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\sqrt{1 + 2 \frac{F r_l}{Ph V_l}} - 1 \right) \quad (6)$$

де F - площа поверхні блоку льоду, м²; V_l - об'єм блоку льоду, м³.

$$\psi_2 = A(Bi_o)^k; \quad (7)$$

число Біо дифузійне:

$$Bi_o = \frac{\beta r_l \ln(r_l/r_k)}{D} \quad (8)$$

де β - коефіцієнт інтенсивності масоперенесення від розчину до блоку льоду, м/с; D - коефіцієнт дифузії, м²/с.

Урахування умов стиснення проводиться за значенням кільцевого зазору $\Delta r = r_k - r_l$.

Основні витрати енергії приходяться на процес кристалізації:

$$-Q = \rho_l \Omega \frac{dV_l}{dr_l} * \frac{dr_l}{d\tau} \quad (9)$$

Їх має забезпечити поверхня кристалізаторів F :

$$Q = \frac{F(t_p - t_k)}{R_\Sigma} \quad (10)$$

при відповідному значенню суми термічних опорів:

$$R_\Sigma = \frac{1}{\alpha_x d_k} + \frac{\ln(r_k/r_t)}{\lambda_T} + \frac{\ln(r_l/r_k)}{\lambda_l} + \frac{1}{\alpha_p d_l} \quad (11)$$

Мінімально необхідний час для формування льоду безрозмірного шару X визначається з числа Фур'є:

$$F_0 \rightarrow no X = \frac{r_l - r_u}{r_k - r_l} \quad (12)$$

в межах $r_u < r_l < r_k$. За умовою $Bi \rightarrow \infty$

$$\tau = \frac{F_0 \rho_l c_p (r_l - r_u)^2}{\lambda_l} \quad (13)$$

Таким чином, результати моделювання визначають задачі експериментальних досліджень.

Обговорення результатів досліджень. Об'єктом досліджень є вода із масою G_l та температурою t_l . Концентрація солі на вході $C_1 = 0,325$, а на виході $C = 0,1$. Задачами розрахунку, експерименту та оптимізації є: кінетика формування блоку льоду, кінетика зміни концентрації розчину, визначення продуктивності установки та її енергетичних характеристик. Задача оптимізації вирішується шляхом варіантних розрахунків, цільовою функцією приймаються економічні показники, а параметрами — температура кипіння холодильного агенту.

Ключовим елементом розрахунку є число фазового переходу (Ph), яке визначається для ідеальних умов ($Bi \rightarrow \infty$). Знаходиться мінімально необхідний час ідеального процесу (τ), для якого визначається об'єм блоку льоду (V_l), його маса (M_l), об'єм розчину (V_{sol}) та його концентрація (C_l). Послідовно, з шагом ΔX змінюється значення границі розділу фаз. Поправку, яка враховує дійсне значення числа Bi знайдено по результатах експериментального моделювання. Ця поправка встановить вплив сукупності конструктивних, та режимних параметрів на розвиток теплових та дифузійних процесів в апараті. Блок - схему розрахунку наведено на рис.2.

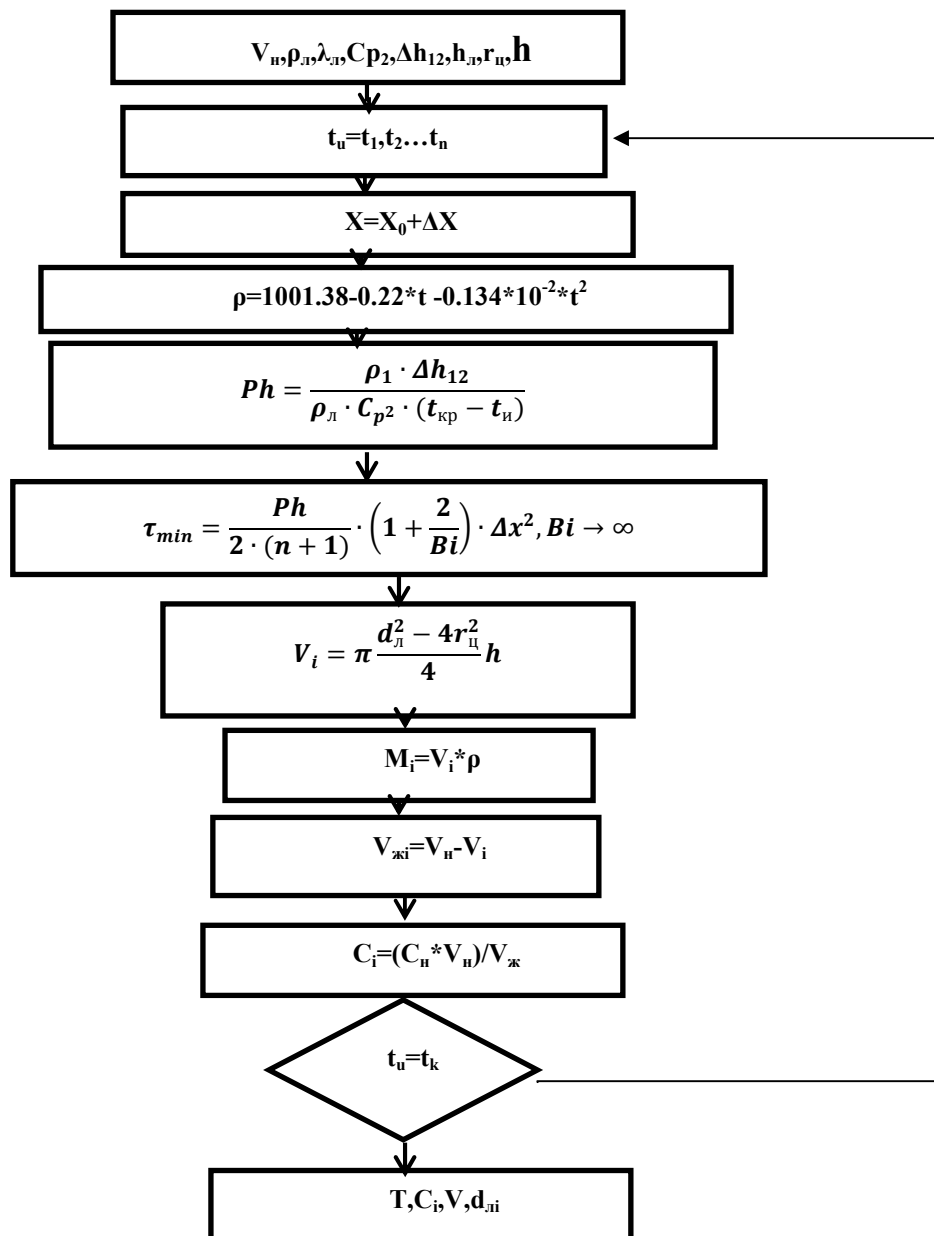


Рис. 2 – Алгоритм розрахунку опріснювача блочного типу

В розрахунках прийняті значення щільності льоду $\rho_{\text{л}} = 917 \text{ кг/м}^3$, його теплопровідності $\lambda_{\text{л}} = 2 \text{ Вт/мК}$, прихованої теплоти фазового переходу при кристалізації води в лід $\Delta h_{1-2} = 333 \text{ кДж/кг}$, питома теплоємність льоду $C_{p2} = 2,05 \text{ кДж/кгК}$. Товщина шару льоду задається з кроком $\Delta X = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Для першого кроку $X = \Delta X$. Розрахунок проводять при постійній криоскопічній температурі (t_k), а при розрахунку щільності розчину (ρ) враховують його температуру (t). Для кожного значення X і температури кипіння (t_o) визначають число фазового переходу Ph , яке дає можливість встановити час процесу (τ_{min}), діаметр блоку льоду ($d_{\text{л}}$), його об'єм ($V_{\text{л}}$) і масу (M). З матеріального балансу розраховують об'єм ($V_{\text{жi}}$) розчину і його концентрацію (C_i). Методика передбачає розрахунок числа (Ph) для умов $Bi \rightarrow \infty$.

Результатом розрахунку для кожного аналізованого моменту часу за рис.2 є: об'єм блоку льоду (V), час процесу (τ) для умов ($Bi \rightarrow \infty$) і поточне значення концентрації розчину (C).

Поправку, яка враховує дійсне значення числа Bi необхідно визначити за результатами експериментального моделювання. Така поправка встановить вплив сукупності конструктивних і режимних параметрів на розвиток теплових і дифузійних процесів в досліджуваному апараті.

Розрахунки та експеримент проведено для апарата, який мав змієвиковий кристалізатор діаметром $0,006 \text{ м}$, загальною довжиною $h = 7 \text{ м}$. Об'єм води складав $V_n = 4 \text{ л}$.

Результати визначення ключового параметра (числа Ph) наведено в табл.1. Оцінка проведена для трьох рівнів температур кипіння в кристалізаторі.

Залежність числа Ph від температури

Параметри	$t_x = -8^\circ\text{C}$				$t_x = -12^\circ\text{C}$			$t_x = -15^\circ\text{C}$		
$\tau, \text{с}$	1385	3116	5540	8656	2077	3693	5771	1662	2981	4620
Ph	22.159	22.159	22.159	22.159	14.772	14.772	14.772	11.818	11.818	11.818

Порівняння даних розрахунку з результатами експериментів (рис. 2) показало, що поправочний коефіцієнт $\psi = 2,5$. Тому, $\tau = \psi \tau_{\min}$.

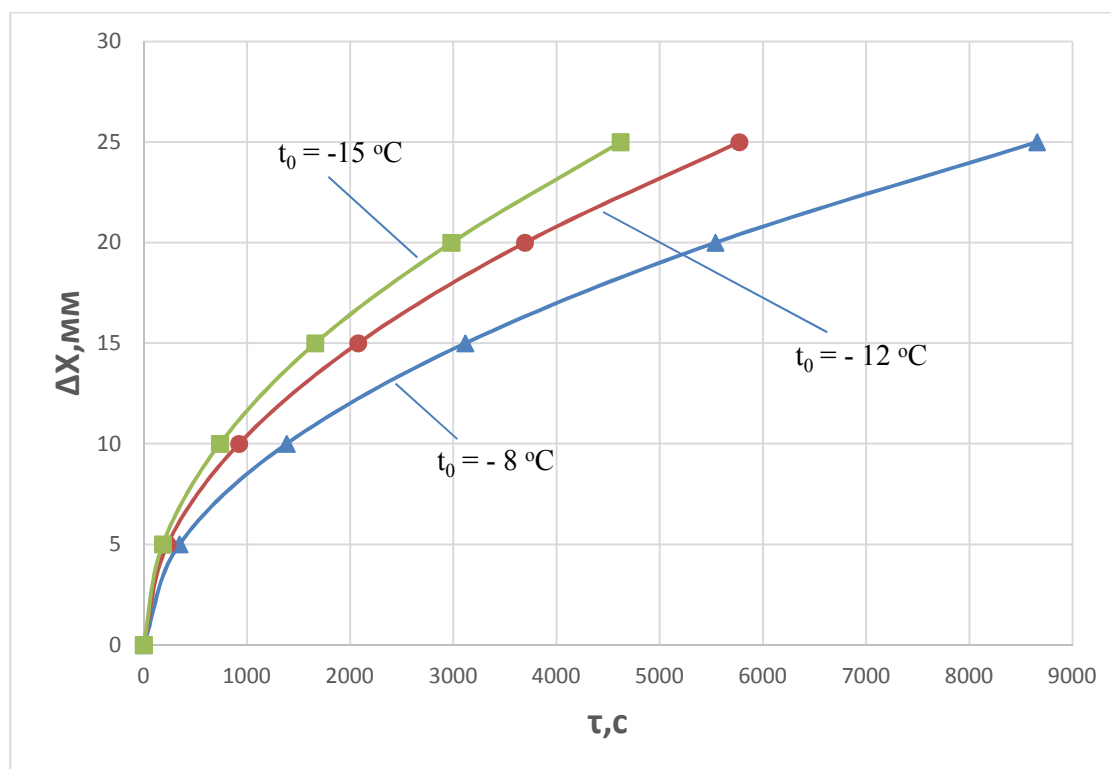


Рис. 3 – Кінетика формування блоку льоду

Наведені результати дозволяють визначати раціональні режими організації процесів опріснення солоної води в апаратах блочного виморожування.

Висновки. Актуальність організації енергоефективних процесів розділення багатокомпонентних водних розчинів динамічно зростає. При цьому, особливе місце займають проблеми опріснення солоної води. Серед багатьох принципів знесолення низькотемпературні апарати блочного виморожування вигідно відрізняються своєю енергоефективністю. В порівнянні із традиційними дистиляторами вони витрачають у 7 разів менше енергії на фазові перетворення. В останні роки зростає інтерес до розробок ОНТУ – апаратів блочного виморожування, які добре себе зарекомендували як кріоконцентратори. В роботі розвинуто наукові основи цих апаратів для задач опріснення. Досліджено кінетику та енергетику процесів опріснення в апаратах блочного виморожування. Аналітичне та експериментальне моделювання показало, що кінетика формування блоку льоду має вигляд експоненти.

Зниження темпів росту товщини блоку льоду (рис.3) та, маси льоду свідчить за те, що необхідна холодильна потужність з часом знижується. Тому, енергетично ефективні системи блочного виморожування мають враховувати таку специфіку. Пропонується регулювати та узгоджувати холодильну потужність за допомогою частотного перетворювача.

References

1. <http://aqua-technolog.od.ua/content/Belikov.pdf>
2. http://www.o8ode.ru/article/answer/pnanetwater/Review_of_methods_of_desalination_of_sea_water
3. Burdo O.G., Trishyn F.A., Yarovyi I.I. (2020) *Enerhetychni monitorynh kharchovykh ta pererobnykh vyrobnytstv*. [Energy monitoring of food and processing industries], Odesa: Madzhenta

4. Burdo O.G., Svetlichnyi P.I., Milinchuk S.I. Sposib kontsentrivannia ridkykh kharchovykh produktiv [Method of concentration of liquid food products] Patent Ukrainy UA 35222. A23L2/08.
5. Burdo O.G. (2009). *Kholodylni tekhnologii v systemi APK* [Refrigeration technologies in the agribusiness system] Odesa: Polihraf, .
6. Burdo O.G., Terziev S.G., Mordynskiy V.P., Sirotiyuk I.V. (2022) Development of Low-Temperature Block Type Facility for Sea Water Desalination. *Problemele Energeticii Regionale*. Vol. 54. Is. 2. pp. 13–25.
7. <http://nanofood.com.ua>
8. Trishyn F.A., Trach O.R., Orlovskaya Yu.V. (2018) Management of Energy Flows in Low-temperature Separation Units. *Problemele Energeticii Regionale*. Vol. 36. Is. 1. pp. 72–86.

RESEARCH OF LOW TEMPERATURE PROCESSES OF WATER DESALINATION

Mordynskiy V.P., Burdo A.K., Fateeva Ya. O., Greschuk V.P.
Odesa National University of Technology, Odesa

Abstract. *The work shows the relevance of the problem of separation of multicomponent solutions both in the processes of water preparation and water purification, as well as in food technologies. The main methods of extracting water from food liquids are analyzed. The main approaches to simplifying this process from the energy point of view and in terms of time costs are proposed. An analysis of block freezing installations was carried out. The kinetics of ice block formation was studied. The main shortcomings of the freezing process were revealed. Ways of improving block freezing units that will help solve these problems are proposed. Ways of reducing energy consumption and intensifying the process of ice block formation are substantiated. It is shown that energy efficiency increases when recycling ice, using its energy to supercool the refrigerant before throttling. The intensification of the crystallization process takes place due to the effect of the "thermal paradox". It is stated that with a certain agreed design and operating parameters, there is a decrease in thermal resistance in the chain "refrigerant - surface of the crystallizer - solution". A method of calculating block freezing units for water desalination problems is proposed. The calculation algorithm is based on the phase transition number and the diffusion Froude number. Data on modeling of low-temperature water desalination processes have been systematized. The main tasks of calculation, experiment and optimization of the block freezing process were identified. The results of experimental and analytical modeling of water desalination processes are given. The results of research that allow determining rational modes of organization of salt water desalination processes in block freezing devices are presented.*

Keywords: block freezing, water preparation, ice block, low-temperature process, intensification, efficiency, crystallization, solution, desalination, separation, energy costs, parameters, refrigerant, installation, simulation, cost reduction, drinking water, liquid, ice crystals, flow chart, construction.

Список використаної літератури

1. <http://aqua-technolog.od.ua/content/Belikov.pdf>
2. http://www.o8ode.ru/article/answer/pnanetwater/Review_of_methods_of_desalination_of_sea_water
3. Бурдо О.Г., Трішин Ф.А., Яровий І.І. Енергетичний моніторинг харчових та переробних виробництв. – Одеса: Маджента, 2020. – 246 с.
4. Бурдо О.Г., Светлічний П.І., Мілінчук С.І. .Спосіб концентрування рідких харчових продуктів Патент України UA 35222. A23L2/08.
5. Бурдо О.Г. Холодильні технології в системі АПК – Одеса: Поліграф, 2009 .
6. Burdo O.G., Terziev S.G., Mordynskiy V.P., Sirotiyuk I.V. Development of Low-Temperature Block Type Facility for Sea Water Desalination. *Problemele Energeticii Regionale*. 2022. Vol. 54. Is. 2. pp. 13–25.
7. <http://nanofood.com.ua>
8. Trishyn F.A., Trach O.R., Orlovskaya Yu/ V. Management of Energy Flows in Low-temperature Separation Units. *Problemele Energeticii Regionale*. 2018. Vol. 36. Is. 1. pp. 72–86.

Отримано в редакцію 09.08.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 09.08.2024
Approved 25.09.2024