

НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІ УСТАНОВКИ ДЛЯ РОЗДІЛЕННЯ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ

Мординський В.П.¹, к.т.н., доц., Грещук В.П.¹, аспірант, Коляновська Л.М.², к.т.н., доц.

¹Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

²Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна

Анотація. Розглянуто методи опріснення солоних вод. Наведено енергетичні та якісні переваги низькотемпературних технологій опріснення, дана їх класифікація та визначено проблеми. Аналізуються перспективи технологій блочного виморожування. Метою роботи є розробка методів розрахунку та оптимізації комплексу «кристалізатор – сепаратор». Поставлено задачу системного моделювання основних процесів блочного виморожування. Розроблено статичні балансові моделі процесів кристалізації та сепарування. Розглянуто параметричні, фізичні та енергетичні моделі цих процесів. Обґрунтовано, що ключовим параметром, яким можна оптимізувати роботу системи, є температура поверхні кристалізатора. Наведено математичні моделі кінетики кристалізації та сепарування. Проведено випробування дослідного зразка опріснювача блочного типу. Результати випробувань становлять основний науково-практичний результат роботи. За критерієм енергетичної ефективності рекомендуються режими виморожування 2 години, та сепарування 6 годин. Температура поверхні кристалізації -8°C потребує найменших витрат енергії. Проведено випробування на воді Чорного моря. Отримано, що через короткий час роботи опріснювача блок льоду вже відповідав допустимим стандартам питної води як по загальному вмісту солей, так й по основним показникам.

Ключові слова. водні розчини, енергоефективність, технології водопідготовки, харчові технології, блочне виморожування.

Вступ. Низькотемпературні технології, порівняно з традиційним випарюванням, характеризуються нижчим рівнем енергетичних витрат. Найменша робота потрібна для переведення речовини у більш організовану структуру. Тому технології виморожування відрізняються меншою енергоемністю, ніж випарювання. Ніколи не заперечується той факт, що процеси низькотемпературного поділу розчинів забезпечують високу якість готового продукту, цей фактор особливо цінний для харчових технологій, метою яких є максимально зберегти весь комплекс природних корисних компонентів сировини.

Формування на стадії кристалізації блоку льоду дає можливість простими методами організувати процес сепарування розчину з структури пористої блоку. Процеси гравітаційного сепарування дозволяють надійно регулювати концентрацію неводних компонентів у розплаві льоду. Використання нових методів організації процесів кристалізації та сепарування дозволило створити гамму установок блочного типу, що виморожують. Це установки багатофункціонального призначення. Вони випробувані в технологіях концентрування соків, екстрактів, молочних продуктів, оцтових розчинів, кави, фракціонування вина та молочної сироватки.

Аналіз останніх досліджень і формулювання проблеми.

Система зворотного осмосу Aquarum AMRO-250 L з мембраною Hydranautics – Aquarum AMAquarum AMRO-250L – це високопродуктивна система зворотного осмосу для професійного використання на автомийках, у лабораторіях та невеликих виробництвах. Установка призначена для знесолення води та видалення до 98% розчинених солей, жорсткості, заліза, марганцю, органіки та інших шкідливих домішок. У системі використовується мембрана Hydranautics ESPA4-LD 4040, яка забезпечує стабільну якість очищення та тривалий термін служби. Відцентровий насос Lowara (Італія) забезпечує високий тиск і надійну роботу. Контролер з дисплеєм повністю автоматизує процес очищення, включно з захистом від «сухого ходу», промивками, відображенням стану та управлінням дозуванням антискалantu. Продуктивність до 250 л/год, потужність 0,75 кВт, габарити: 450×600×1300 мм [1]. Потужні установки зворотного осмосу широко використовуються у харчовій, фармацевтичній, хімічній промисловості, автомийках, котельнях і теплицях [2]. Вони забезпечують 99% фільтрації та оптимізують витрати підприємства. Комплектуються мембранами Hydranautics – продукцією провідного світового виробника мембранних елементів, що гарантує найвищий рівень очищення та довговічність обладнання. Системи зворотного осмосу (RO) це технології фільтрації води, в якій використовується напівпроникна мембрана для видалення домішок і забруднень з води [3]. Зазвичай використовуються для очищення питної води в будинках, на підприємствах та промисловості. У стандартній системі вода спочатку проходить через попередній фільтр видалення великих частинок і осаду. Потім попередньо відфільтрована вода проходить через напівпроникну мембрану, яка пропускає лише молекули води, блокуючи інші молекули та забруднюючі речовини, такі як бактерії, віруси, мінерали та розчинені тверді речовини. Очищена вода зберігається в резервуарі для використання. Системи зворотного осмо-

су можуть видаляти широкий спектр забруднюючих речовин, включаючи хлор, фторид, нітрати, миш'як, свинець та інші шкідливі хімічні речовини та мінерали. Вони використовуються для виробництва чистої та безпечної питної води. Для більш простих завдань очищення і знезараження води використовується змінна ультрафіолетова лампа Sterilight S950RL-HO [4]. Ресурс роботи обмежений – 1 рік або 9000 годин (до зменшення інтенсивності УФ до 75%). Sterilight S950RL-HO – лампа низького тиску, середньої інтенсивності ультрафіолетового випромінювання з довжиною хвилі 254 нм. Чутлива до перепадів напруги, тому при експлуатації рекомендується використовувати з регулятором напруги. Використовують сорбційні методи очищення [5]. Так, зерниста засипка TetraMIX Sorb A, основним компонентом якої є Сорбент АС, служить для знезалізнання води. Даний сорбент використовується в якості основного шару і є придатним для роботи сумісно з усіма окисниками, які прискорюють реакцію перенесення нерозчинного заліза у вигляді суспензії з подальшим його осадженням і вмістом фільтрувального шару. Основою при виготовленні Сорбенту АС є активні метали без нанесеного оксидного напilenня. Завдяки цьому гарантується висока зносостійкість матеріалу, а також унеможливаються втрати каталітичних властивостей, зумовлених стиранням активного шару. До переваг також можна віднести простоту завантаження та легкість промивання. Низький рівень рН і вміст сірководню у воді не створюють складнощів при використанні TetraMIX SORB A з метою знезалізнання.

Способи водопідготовки суттєво відрізняються за енергетичними витратами, за її реалізації. Найменші витрати енергії мають мембранні методи, вони не вимагають витрат на фазові перетворення [4]. Найбільші витрати енергії вимагають термічні методи, оскільки в результаті процесу утворюється менш організована структура води – пара. А ця пов'язана із значними енергетичними витратами. Холодильні методи стали відомі з другої половини ХХ століття і нині менш поширені, незважаючи на низку їх переваг. У порівнянні з дистильційними опріснювачами, холодильні мають меншу корозію, менші капітальні витрати, більш високу термодинамічну ефективність. У них відсутня утворення накипів.

Розглянемо два методи очищення води – дистильцію та кріоконцентрування. Останній застосовують для ефективного очищення води шляхом її перекристалізації. Кріоконцентрування є значно ефективнішим дистильції, оскільки фенол, хлорфеноли і легка хлорорганіка (ряд хлорвмісних сполук є отруйними) є леткими і при випарюванні транспортуються разом з водяною парою. При цьому, якщо ми очищатимемо воду виморожуванням, то нам вдасться відокремити її від даних шкідливих домішок. Крім вищесказаного метод кріоконцентрування найбільш економічний порівняно з дистильційним методом очищення води, оскільки питома теплота пароутворення приблизно дорівнює 2258 кДж/кг, а питома теплота утворення льоду дорівнює 338 кДж/кг.

Вибір методу і технології опріснення води залежить від вимог до якості та солевмісту, що пред'являються до води, а також техніко-економічних показників. В залежності від реалізованого методу знесолення води використовуються різні типи опріснювачів [5]. Дистильтори застосовуються при опрісненні морської води і солоних вод з високим солевмістом до 35 г/л. на частку дистильційних опріснювальних установок, 2,9% – електродіалізних, 1% – зворотноосмотичних та 0,1% – на частку заморожувальних та іонообмінних опріснювальних установок.

Головним завданням опріснення води є організація процесу з мінімальними витратами енергії та коштів на обладнання. Це є важливою вимогою, оскільки країна, яка вимушена в більшій мірі покладатися на опріснену воду, має витримувати економічну конкуренцію з іншими країнами, що мають більш доступні та дешеві джерела прісної води.

Відповідно до проектних розробок транспортування прісної води з природного джерела навіть на відстань до 400–500 км дешевше за опріснення тільки для невеликих водоспоживачів. Оцінка прогнозних експлуатаційних запасів солонуватих і солоних підземних вод у посушливих районах з урахуванням їх віддаленості від природних прісноводних джерел дозволяє дійти невтішного висновку у тому, що опріснення є єдиним можливим і економічно виправданим методом водозабезпечення. Методи, що застосовуються при опрісненні солоних вод, можуть бути ефективно використані для повернення природі використаної води, що не чинить негативного впливу на загальний стан прісних водоймищ.

Холодильні технології опріснення класифікують на: кристалогідратне, природне, вакуумне, контактне та штучне, яке має найбільше розповсюдження. Ключові положення технологій блочного виморожування наведено на сайті [6] та в публікаціях [7, 8].

Постановка задачі системного моделювання основних процесів штучного виморожування.

Ключовими процесами запропонованої технології опріснення солоних вод є кристалізація та гравітаційне сепарування. На першому етапі моделювання необхідно визначити технологічний параметр, який має суттєвий вплив на кінетику та енергетику цих процесів. Таким параметром, який допоможе «зшивати» математичні моделі процесів кристалізація та гравітаційного сепарування, має стати температура поверхні кристалізації (t_0). Тоді системна модель процесів буде мати вигляд (рис. 1). Саме температура t_0 визначальним чином впливає на кінетику формування твердої фази (льоду), на його структуру та на енергетичні характеристики процесу кристалізації. Температура t_0 визначає час процесу і масовий витрата льоду в блоці M_6 . Структура льодового блоку (його пористість ϵ) також є функцією температури t_0 . У свою чергу, споживана установкою потужність залежить від цих параметрів.

Якщо t_0 зменшується, то маса блоку (M_b) збільшується, час процесу (τ) скорочується і пористість блоку (ϵ) зростає. При сепаруванні ключовим фактором є температура навколишнього середовища (t_c). Саме вона визначає час сепарування (τ_2), масу льоду (M_l) та концентрацію в ньому солей (X_l).

Поеднання розглянутих параметрів 1 стадії впливають на значення продуктивності очищеної води M_d , і на вміст солей у цій воді X_d . Важливе значення ефективності сепарування надає температура t_c , коли організується процес сепарування. Енергетика процесу сепарування (необхідна процесу потужність N_c) залежить від часу процесу τ_2 .

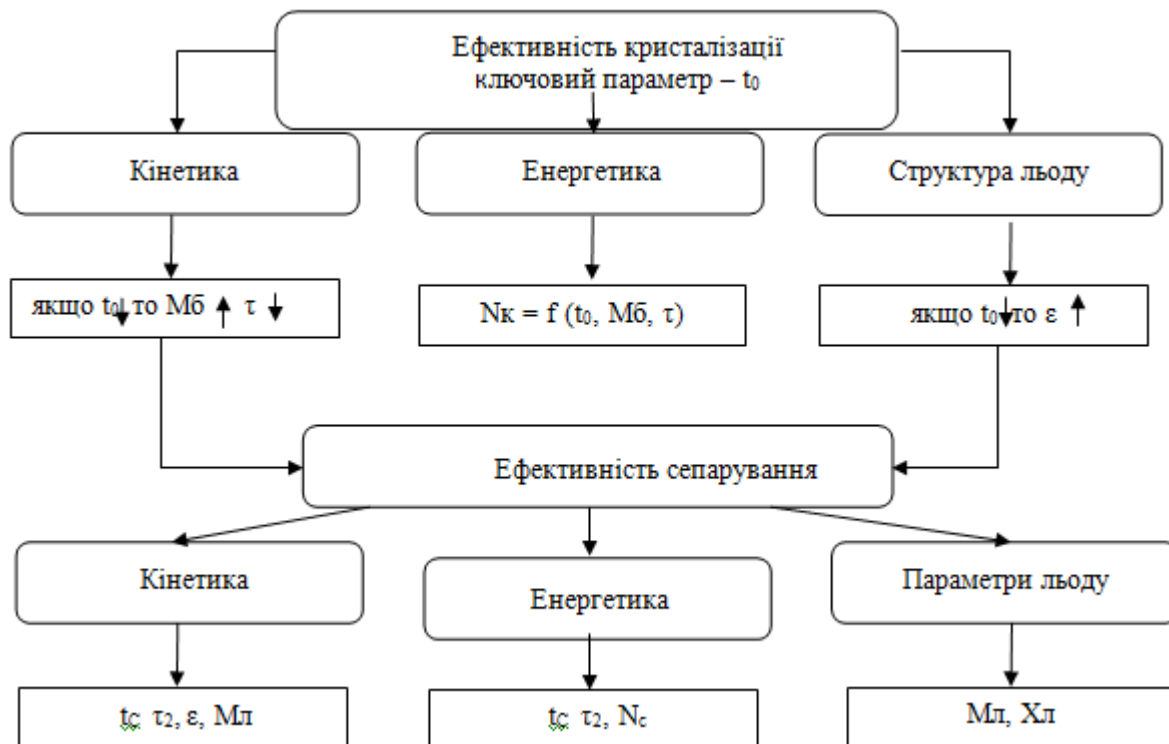


Рис. 1 – Системна модель взаємного зв'язку технологічних параметрів при виморожуванні

На основі рис.1 складено параметричну модель:

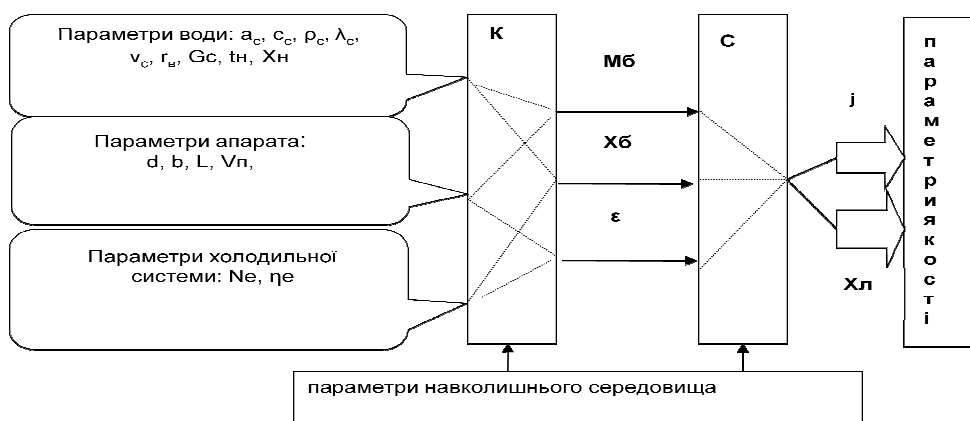


Рис. 2 – Параметрична модель опріснювача

Зі схеми (рис. 2) можна встановити завдання аналітичного та експериментального дослідження.

1. Визначити умови фазових рівноваг у системі «лід – розчин». Побудувати кріоскопічну криву.
2. Розробити методику та експериментальний стенд для дослідження впливу режимних та конструктивних параметрів на кінетику формування блоку льоду та його структурні характеристики.
3. Розробити методику та експериментальний стенд для дослідження впливу режимних та конструктивних параметрів на кінетику сепарування блоку льоду.
4. Встановити залежність між енергетичними, економічними та якісними показниками при опрісненні води методом виморожування.

Розглянемо завдання моделювання статичних процесів.

Статичні моделі матеріальних та енергетичних потоків при кристалізації та сепарування.

Схема матеріальних потоків (рис. 3) показує співвідношення кількостей (витрат) розчину та льоду.

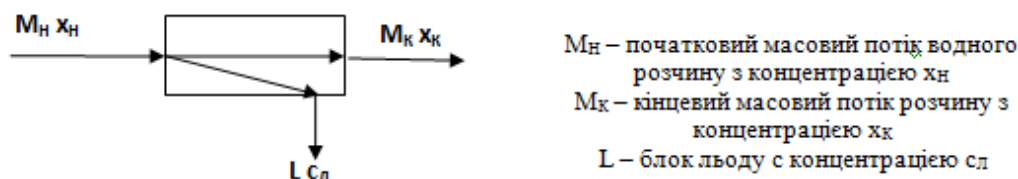


Рис. 3 – Балансова модель матеріальних потоків під час кристалізації

Для традиційних технологій характерно, що процес утворення кристалів льоду протікає інтенсивно, а сепарування, як правило, є тривалим, трудомістким і потребує великих витрат енергії. У загальному енергетичному балансі витрати енергії на кристалізацію становлять лише половину всіх витрат енергії. Можна зробити висновок, що сепарування значною мірою визначає енергетику технології та величину втрат продукту з крижаною фракцією. Системний аналіз показує, що можна отримати загальний вигравш у тривалості, енергетичних витратах, якщо інакше організувати процеси. Видається доцільним узгодити інтенсивність процесів генерації льоду та сепарування. Ця ідея є основою технології блочного виморожування.

Формулюється кілька принципів для реалізації ідеї блочного виморожування:

- виключити з технологічної схеми допоміжне обладнання: насоси, проміжні ємності тощо;
- організувати процес утворення на холодній поверхні блоку льоду із щільною упаковкою кристалів;
- вирощування блоку льоду проводити за умови постійного зростання величини поверхні розділу «лід - розчин». Для цього процес поділу проводити на голчастих випарниках.

Такий підхід дозволяє серйозно спростити другий етап сепарування. Ставиться задача:

- виключити з технологічної схеми спеціальні апарати для поділу льоду та розчину;
- сепарування проводити в умовах гравітаційного стікання концентрату із блоку льоду;
- як керуючий фактор використовувати температуру в сепараторі.

Основна відмінність технології блочного виморожування полягає в тому, що замість машинного принципу роботи кристалізатора використовують апаратний. Це є серйозними передумовами для суттєвого спрощення технологічної схеми, що дозволяє створити просту і надійну конструкцію роздільної установки, що виморожує, значно знизити витрату енергії. Поділ потоків виражається співвідношенням повного матеріального балансу та балансу за сухими речовинами:

$$\left. \begin{aligned} M_H - M_K &= L \\ M_H x_H - M_K x_K &= L c_L \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Із системи (1) визначаються невідомі складові матеріального балансу процесу кристалізації. Нескладно визначаються початкові (M_H) та кінцеві (M_K) кількості розчину, звідки розраховується кількість льоду (L). Концентрація розчину в твердій фазі, що утворилася, знаходиться шляхом спільного вирішення рівнянь системи (1):

$$c_L = \frac{M_H x_H - M_K x_K}{M_H - M_K} \quad (2)$$

Розглянемо енергетичні баланси процесу кристалізації. Постановка задачі передбачає теплову взаємодію між розчином, холодильним агентом та навколишнім середовищем (рис.4). Розглядається апарат з горизонтальним розташуванням кристалізатора, в якому при зростанні блоку льоду формуються в основному вертикальні капілярні канали, з яких при сепаруванні ефективніше евакууються рідини.

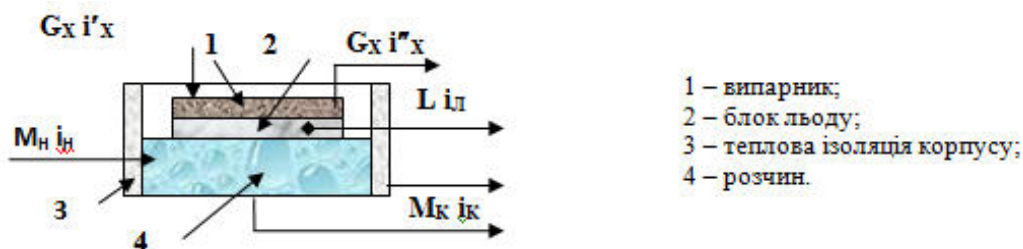


Рис. 4 – Схема теплових потоків під час кристалізації

Тепловий баланс складемо за схемою (рис.4) з урахуванням наступних припущень:

- розчин є квазігомогенним, а тепловим випромінюванням у системі можна знехтувати;
- теплофізичні властивості розчину та блоку льоду постійні у часі та в об'ємі;
- процес кристалізації є спрямованим, розвивається тільки по осі у.

При таких припущеннях тепловий баланс процесу кристалізації може бути записаний у вигляді рівнос-

тей на основі суми відповідних густин теплових потоків. Так, рівняння теплового балансу щодо щільності теплового потоку через стінку кристалізатора (q_{CT}) матиме вигляд:

$$q_{CT} = q_p + (\rho w_y)_p i_{pg} - (\rho w_y)_l i_{lg} \quad (3)$$

де $(\rho w_y)_p$ – густина потоку маси суміші з розчину до межі розділу фаз; i_{pg} – ентальпія розчину на межі розділу фаз; $(\rho w_y)_l$ – густина потоку маси в розчин від поверхні блоку льоду; i_{lg} – ентальпія льоду на межі поділу фаз.

У співвідношенні (3) сумарний ефект конвективного теплообміну від приграничного шару до об'єму розчину виражений доданком (q_p). Це загальний внесок теплопровідності, конвекції та молекулярної дифузії. З приграничного шару здійснюється процес кристалізації льоду. Потік теплоти, що приходить до межі розділу від розчину та обумовлений безпосередньо процесом кристалізації льоду, враховано другим складником рівняння (3). Третій член цього співвідношення представляє тепловий потік, що переноситься від поверхні поділу всередину приграничного шару.

В умовах режиму зростання блоку льоду справедливо:

$$(\rho w_y)_p = (\rho w_y)_l = (\rho w_y) \quad (4)$$

Інтенсивність процесу охолодження розчину характеризується коефіцієнтом тепловіддачі (α) і визначається рівняння Ньютона – Ріхмана. Тоді:

$$q_p = \frac{\alpha}{c_{pp}} (i_p - i_{pg}) \quad (5)$$

а ентальпію розчину на межі розділу фаз можна записати як суму ентальпії льоду на межі фаз та теплоти кристалізації (Ω):

$$i_{pg} = i_{lg} + \Omega \quad (6)$$

Враховуючи (5) та (6) співвідношення (3) можна подати у вигляді:

$$q_{CT} = \frac{\alpha}{c_{pp}} (i_p - i_{pg}) + \rho w_y (i_{lg} - \Omega) + \rho w_y (i_{lg}) \quad (7)$$

Оскільки число Стантона записується як:

$$St = \frac{\alpha}{\rho w c_{pp}} \quad (8)$$

то

$$q_{CT} = \frac{\alpha}{c_{pp}} \left[(i_p - i_{pg}) + \frac{\Omega}{St} \right] \quad (9)$$

Рівняння (9) може бути перетворене на основі того, що ентальпія розчину, дотримуючись положення адитивності, представляється через концентрації компонентів розчину ($i = \sum m_j i_j$):

$$q_{CT} = \frac{\alpha}{c_{pp}} \left\{ \left[\left(\sum c_{pj} i_{pj} - \sum c_{pgj} i_{pgj} \right) \right] + \frac{\Omega}{St} \right\} \quad (10)$$

Співвідношення (10) вимагає знання масових потоків компонентів розчину, тобто. підключення до їхнього розрахунку математичного апарату теорії дифузійного перенесення при кристалізації.

Випробування опріснювача. Завдання стендових випробувань №1 «Визначити залежність продуктивності опріснювача від температури кипіння холодильного агенту» (табл. 1).

Таблиця 1

Результати випробувань по завданню №1

№	Параметри	Температура кипіння, °C		
		–8	–12	–15
1	Маса блоку льоду, кг	20	20	20
2	Час процесу, с	5540	5370	4620
3	Питомі енерговитрати, МДж/кг	0,86	1,15	1,29

Чим менше температура кипіння, тим більша продуктивність опріснювача, але енергоефективні режими при температурах кипіння –8°C.

Завдання стендових випробувань №2 «Визначити залежність продуктивності опріснювача, витрат енергії та параметрів прісної води від режимів (часу) виморожування та сепарування» (табл. 2).

Таблиця 2

Результати випробувань по завданню №2

№	Параметри	Режими			
		1	2	3	4
1	Маса блоку льоду, кг	5	10,5	13,5	16
2	Час виморожування, год	1	2	3	4
3	Час сепарування, год	3	6	6	6
4	Питомі енерговитрати, МДж/кг	1,46	1,44	1,51	1,66

Після 2 годин роботи продуктивність опріснювача по льоду зменшується. Тому, за критерієм продуктивності рекомендується режим №2 із часом заморожування 2 години.

Завдання стендових випробувань №3 «Обґрунтувати доцільні режими роботи опріснювача, які забезпечують мінімальні витрати енергії».

На основі системного аналізу бази даних (таблиця 2) за критерієм енергетичної ефективності рекомендуються режими виморожування 2 години, та сепарування 6 годин. Досліджено вплив на ефективність роботи опріснювача температури навколишнього середовища. Отримані результати показали, що для всіх значень температур навколишнього середовища графічні залежності питомої енергоефективності ($J = f(\tau)$) мають локальний мінімум при значенні $\tau = 2$ год. Причому, для $\tau > 2$ год J зростає швидше, ніж при $\tau < 2$ год. Так як в межах $0 < \tau < 2$ год мінімум має нечіткий характер, то рекомендуються значення $\tau = 1,5 - 2$ год.

Завдання стендових випробувань №4 «Визначити кінетичні залежності формування блоку льоду та концентрації стоків для режимів за п. 3». Результати випробувань наведено на рис. 5–7.

Під час виконання досліджень було отримано та побудовано такі залежності, як: кінетика формування блоку льоду, процес кристалізації води, концентрація солей, як у блоці льоду, так і у воді (рис.5–7).

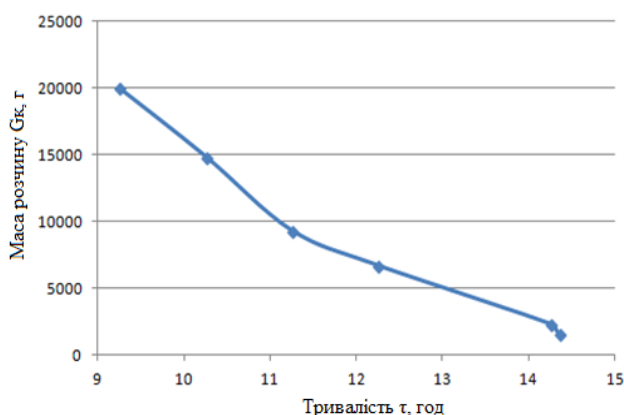


Рис. 5 – Кінетика зміни маси розчину

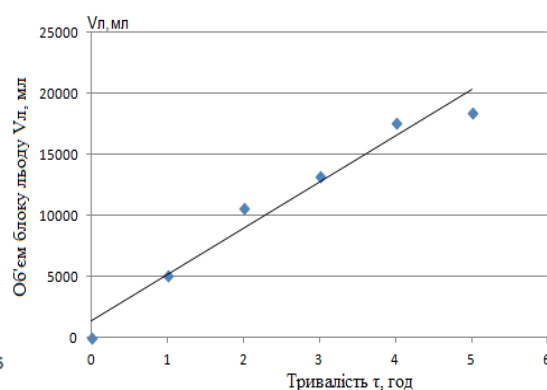


Рис. 6 – Кінетика формування блоку льоду

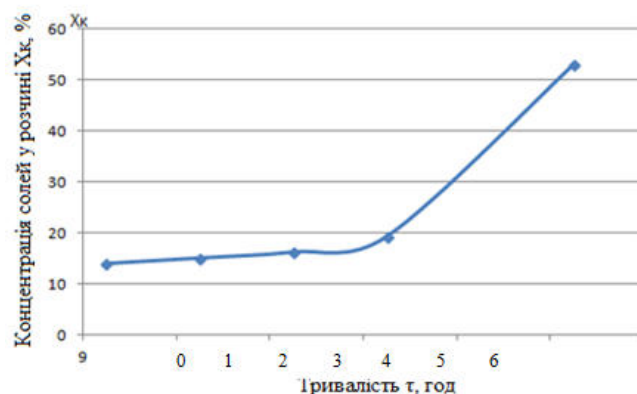


Рис. 7 – Зміна концентрації солей у розчині в часі

Витрати електроенергії на процес блочного виморожування в схемі з рециклінгом льоду скорочуються в 1,2–1,4 рази.

Визначено залежності питомих енерговитрат від температури кипіння холодильного агента для різних

початкових концентрацій розчину. Згідно проведеному аналізу можна дійти висновку, що кожна початкова концентрація розчину має свій яскраво виражений мінімум.

Самостійний інтерес мають результати експериментів із водою Чорного моря (табл.3).

Таблиця 4

Результати аналізу складу води

Показник	Вода Чорного моря	Тала вода	Показник	Вода Чорного моря	Тала вода
pH	9,0	8,5	NO ₃ , мг/л	4	0
kH, °	7,5	5,5	NO ₂ , мг/л	0	0
PO ₄ , мг/л	0,1	0	NH _{3/4} , мг/л	0,25	0

Отримано, що через короткий час роботи опріснювача блок льоду вже відповідав допустимим стандартам питної води як по загальному вмісту солей, так й по основним показникам (таблиця 3).

Висновки.

Опріснювач (апарат блочного виморожування) реалізує ефект «термічного парадоксу» та принцип керуваної кристалізації. Інструментом реалізації таких процесів є оригінальна конструкція випарників, виконаних у вигляді трубок Фільда. Це голчасті випарники, термічний опір процесу тепло перенесення при зростанні блоку льоду може не зростати (ефект термічного парадоксу). По-перше, це забезпечує стабільні режими формування блоку льоду із щільною упаковкою кристалів льоду. По-друге, спрощує процес сепарування льоду, переходу до гравітаційного розділення твердої фази та рідини.

Визначено за енергетичними критеріями раціональні температури кипіння холодильного агенту – 8°C, час виморожування – 2 години, час сепарування – 6 годин. Визначена економічна ефективність використання при «рециклінгу» частотного перетворювача, що зменшує на 30% витрати енергії.

Створений опріснювач має 3 важливі інновації: використання випарників голчастого типу, формування блоку льоду при його кристалізації та рециклінг льоду. Опріснювач має відмінні технологічні та енергетичні характеристики і перспективи впровадження в школах, лікарнях, дитячих садках, офісах.

Експериментальні зразки знесолоної води із опріснювача пройшли аналіз в ДП Українського науково-дослідного інституту медицини транспорту МОЗ України в лабораторії гігієни та екології води. Об'єктами дослідження були 2 зразка. Перший – після одноступеневого очищення водопровідної води, а другий – після двоступеневого очищення водопровідної води. Згідно (ДСанПіН 2.2.4-171-10) обидва зразки відповідають нормативам для питної води, що фасується у пунктах розливу. Зразок за №2 за жорсткістю в 10 разів чистіше, ніж зразок за №1, за сухим залишком – у 5 разів, за вмістом нітратів – у 4,5 рази.

References

1. Aquarum. (n.d.). *Reverse osmosis system Aquarum AMRO 250 L/h with Hydranautics membrane*. Retrieved from <https://www.aqua-room.com.ua/sistema-obratnogo-osmosa-aquarum-amro-250-l-s-membranoj-hydranautics>
2. Aquarum. (n.d.). *Industrial water treatment: Industrial reverse osmosis systems*. Retrieved from <https://www.aqua-room.com.ua/promyshlennaya-vodopodgotovka/prom-osmos>
3. Aquarum. (n.d.). *Advantages of Aquarum industrial reverse osmosis systems*. Retrieved from <https://www.aqua-room.com.ua/post-perevagi-promislovihi-sistem-zvorotnogo-osmosu-virobnitstva-aquarum>
4. Aquarum. (n.d.). *Sterilight S950RL UV disinfection system*. Retrieved from <https://www.aqua-room.com.ua/sterilight-s950rl>
5. Aquarum. (n.d.). *Terramix Sorb-A filtering medium*. Retrieved from <https://www.aqua-room.com.ua/terramix-sorb-a-filtruyuschaya-zagruzka>
6. Nanofood. (n.d.). *Nanofood – Innovative food technologies and equipment*. Retrieved from <http://nanofood.com.ua>
7. Burdo, O. G., Terziev, S. G., Mordynskiy, V. P., & Sirotyuk, I. V. (2022). Development of low-temperature block type facility for sea water desalination. *Problemele Energeticii Regionale*, 54(2), 13–25.
8. Trishyn, F. A., Trach, O. R., & Orlovskaya, Yu. V. (2018). Management of energy flows in low-temperature separation units. *Problemele Energeticii Regionale*, 36(1), 72–86.

LOW-TEMPERATURE INSTALLATIONS FOR SEPARATION OF AQUEOUS SOLUTIONS

Mordynskiy V.P., Greschuk V.P., Kolianovska L.M.

¹Odesa National University of Technology, Odesa

²Vinnitsia National Agrarian University, Vinnitsia, Ukraine

Abstract. In current paper methods for desalination of salt water are considered. The energy and qualitative advantages of low-temperature desalination technologies are presented, their classification is given and problems

are identified. The prospects of block freezing technologies are analyzed. The aim of the work is to develop methods for calculating and optimizing the “crystallizer-separator” complex. The task of system modeling of the main processes of block freezing is set. Static balance models of crystallization and separation processes are developed. Parametric, physical and energy models of these processes are considered. It is substantiated that the key parameter by which the system operation can be optimized is the surface temperature of the crystallizer. Mathematical models of crystallization and separation kinetics are presented. A prototype block-type desalination unit is tested. The test results constitute the main scientific and practical result of the work. According to the criterion of energy efficiency, freezing modes of 2 hours and separation of 6 hours are recommended. The temperature of the crystallization surface of -8°C requires the least energy consumption. Tests were conducted on the water of the Black Sea. It was found that after 30 minutes of operation of the desalination plant, the ice block already met the permissible standards for drinking water both in terms of the total salt content and the main indicators. The desalinators have excellent technological and energy characteristics and prospects for implementation in schools, hospitals, kindergartens, and offices.

Keywords: aqueous solutions, energy efficiency, water treatment technologies, food technologies, block freezing.

Список використаної літератури

1. Електронний ресурс: <https://www.aqua-room.com.ua/sistema-obratnogo-osmosa-aquarum-amro-250-l-s-membranoj-hyadranautics>.
2. Електронний ресурс: <https://www.aqua-room.com.ua/promyshlennaya-vodopodgotovka/prom-osmos>
3. Електронний ресурс: <https://www.aqua-room.com.ua/post-perevagi-promislovihi-sistem-zvorotnogo-osmosu-virobnitstva-aquarum>
4. Електронний ресурс: <https://www.aqua-room.com.ua/sterilight-s950rl>
5. Електронний ресурс: <https://www.aqua-room.com.ua/terramix-sorb-a-filtruyuschaya-zagruzka>
6. Електронний ресурс: <http://nanofood.com.ua>
7. Burdo O.G., Terziev S.G., Mordynskiy V.P., Sirotyuk I.V. Development of Low-Temperature Block Type Facility for Sea Water Desalination. Problemele Energeticii Regionale. 2022. Vol. 54. Is. 2. pp. 13–25.
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 11.06.2025
Прийнято до друку 02.09.2025

Received 11.06.2025
Approved 02.09.2025