

УДК 628.165.048:[621.565.94+620.9+504.06]
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.1\(503\).1.9](https://doi.org/10.15589/znp2026.1(503).1.9)

FREEZE DESALINATION: TECHNOLOGICAL FEATURES AND PROSPECTS FOR APPLICATION IN ZERO LIQUID DISCHARGE SYSTEMS

ОПРІСНЕННЯ ВИМОРОЖУВАННЯМ: ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ В СИСТЕМАХ НУЛЬОВОГО РІДКОГО СКІДУ

Oleg B. Vasylyv
oleg_vas@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0597-8863

Olena O. Kovalenko
e_kov@ukr.net
ORCID: 0000-0002-8009-1103

Bogdan O. Vasylyv
ORCID: 0009-0002-3459-4858

О. Б. Василів,
канд. техн. наук, доцент

О. О. Коваленко,
докт. техн. наук, професор

Б. О. Василів,
аспірант

Odesa National University of Technology, Odesa

Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Abstract. Purpose. The purpose of this study is to systematize the technological features, energy characteristics, and environmental indicators of freeze desalination in order to substantiate the prospects for its application in modern desalination systems, in particular in hybrid configurations with zero liquid discharge, and to identify directions for further technological development through multiphysics mathematical modeling. **Method.** The theoretical investigation is based on a critical analysis and synthesis of data on freeze desalination technologies from peer-reviewed scientific publications, including those indexed in the Scopus and Web of Science scientometric databases. Based on data on specific energy consumption, the carbon and water footprints of freeze desalination units were calculated using a simplified LCA methodology. The possibilities for integrating freeze desalination into hybrid desalination systems with zero liquid discharge have been analyzed. **Results.** Data on the design features of freeze desalination units (direct, indirect suspension, and progressive, as well as vacuum and eutectic processes) have been systematized, along with their energy and technological characteristics and environmental and economic indicators. It has been established that freeze desalination ensures stable operation in the salinity range exceeding 70 g/L up to the eutectic point of the solution, where reverse osmosis and most thermal processes are technologically limited. It is shown that the specific energy consumption of freeze desalination varies from 1.7 to 59.2 kWh/m³ depending on the system configuration and the degree of cold energy recovery. When integrated with renewable energy sources, the carbon footprint is reduced to 0.6 kg CO₂-eq/m³. **Scientific novelty.** Information on the performance indicators of freeze desalination units has been generalized, and engineering criteria for their application to the desalination of highly mineralized waters and brines have been formulated. **Practical importance.** The data on the energy and environmental performance of various types of freeze desalination units systematized in this study can be used for the pre-design analysis of hybrid desalination systems with zero liquid discharge.

Key words: freeze desalination; zero liquid discharge; hybrid desalination systems; carbon and water footprint; specific energy consumption; mathematical modeling.

Анотація. Мета. Систематизація технологічних особливостей, енергетичних характеристик та екологічних показників опріснення виморожуванням для обґрунтування перспектив його застосування в сучасних опріснювальних системах, зокрема в гібридних з нульовим рідким скидом, та визначення напрямів подальшого розвитку технології через мультифізичне математичне моделювання. **Методика.** Теоретичне дослідження базується на критичному аналізі та узагальненні даних про технології опріснення виморожуванням із рецензованих наукових публікацій, зокрема індексованих у наукометричних базах Scopus та Web of Science. На основі даних про питоме енергоспоживання за спрощеною методикою LCA розраховані вуглецевий та водний слід установок виморожування. Проаналізовано можливості інтеграції виморожування в гібридні опріснювальні системи з нульовим рідким скидом. **Результати.** Систематизовано відомості про конструктивні особливості установок

опріснення виморожуванням (прямого, непрямого суспензійного та прогресивного, вакуумного й евтектичного), а також дані щодо їх енергетичних і технологічних характеристик та екологічних і економічних показників. Встановлено, що виморожування забезпечує стійку роботу в діапазоні мінералізації понад 70 г/л аж до евтектичної точки розчину, де зворотний осмос та більшість термічних процесів є технологічно обмеженими. Показано, що питоме енергоспоживання виморожування варіюється від 1,7 до 59,2 кВт·год/м³ залежно від конфігурації та ступеня рекуперації холоду. При інтеграції з відновлюваними джерелами енергії вуглецевий слід знижується до 0,6 кг CO₂-екв./м³. *Наукова новизна.* Узагальнено відомості про показники ефективності установок виморожування та сформовано інженерні критерії їх застосування для опріснення високомінералізованих вод і розсолів. *Практична значимість.* Систематизовані в роботі дані щодо енергетичних та екологічних показників установок виморожування різних типів можуть бути використані при передпроектному аналізі гібридних опріснювальних систем з нульовим рідким скидом.

Ключові слова: опріснення виморожуванням; нульовий рідкий скид; гібридні опріснювальні системи; вуглецевий і водний слід; питоме енергоспоживання; математичне моделювання.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Глобальний дефіцит прісної води набуває дедалі гострішого характеру з серйозними наслідками для економічного розвитку, продовольчої безпеки та стабільності екосистем. За даними Всесвітньої метеорологічної організації, у 2018 р. близько 3,6 млрд осіб мали обмежений доступ до прісної води, а до 2050 р. ця цифра може перевищити 5 млрд [1]. Найгостріше ця проблема проявляється у вододефіцитних регіонах Близького Сходу, Північної Африки, Центральної та Південної Азії, а також на островах та у прибережних зонах, де саме й зосереджене основне зростання потужностей опріснювальних установок. У контексті глобальних кліматичних змін дефіцит прісної води спостерігається і у південних регіонах України, що обумовлює необхідність розвитку технологій опріснення для забезпечення водою промисловості, портів та населення [2]. Станом на 2020 р. глобальна встановлена потужність опріснювальних установок, розміщених в 181 країні світу, досягла 114,9 млн м³/добу [3]. Опріснення морської води становить близько 61% від цієї потужності. При цьому мембранні технології забезпечують майже половину загального обсягу, а термічні процеси – решту [3].

Традиційні технології опріснення досягли високого рівня технологічної зрілості. Зворотний осмос (RO) домінує на світовому ринку з часткою близько 69% [4], що обумовлено постійним вдосконаленням мембранних матеріалів, пристроїв рекуперації енергії та оптимізацією процесів. Багатоступенева флеш-дистиляція (MSF) та багатоступенева дистиляція (MED) залишаються поширеними в регіонах з доступом до дешевої теплової енергії [5; 6]. Водночас кожна технологія має притаманні їй обмеження: мембранні процеси обмежені осмотичним тиском та стрімким зростанням енергоспоживання при підвищеній мінералізації [7], а термічне опріснення характеризується високим питомим енергоспоживанням та значним вуглецевим слідом [8; 9].

Критичною екологічною проблемою традиційного опріснення є утворення концентрованого розсолу, обсяг якого може становити 50–70% від об'єму

живильної води [10]. Скидання розсолу негативно впливає на морські екосистеми через локальне підвищення солоності, термічне забруднення та накопичення хімічних домішок [11]. Ці впливи, разом із дедалі жорсткішими екологічними вимогами, посилюють інтерес до систем нульового рідкого скиду (ZLD – zero liquid discharge).

Системи ZLD передбачають повне виключення скидання розсолів в навколишнє середовище з одночасним максимальним вилученням прісної води та інших цінних ресурсів, зокрема твердих солей [12; 13]. Їх можна утилізувати на звалищах або використовувати як вторинну сировину. Для досягнення такого результату розсіл необхідно поступово концентрувати від вмісту солей, типового для звичайної морської води (35 г/л) до граничної евтектичної точки (близько 260 г/л для NaCl). Жодна окрема технологія не може ефективно працювати в такому широкому діапазоні мінералізації [14; 10]. Тому застосовують гібридні схеми, в яких різні технології послідовно доповнюють одна одну (рис. 1). На першій стадії мембранні процеси (зворотний осмос) виконують первинне опріснення морської води. На другій стадії термічна дистиляція або опріснення виморожуванням концентрують розсіл до високих значень мінералізації. На третій, фінальній стадії кристалізаційні технології (зокрема, евтектична кристалізація виморожуванням, термічна кристалізація) вилучають залишкову воду та переводять розчинені солі у тверду фазу, досягаючи повного нульового рідкого скиду [15; 16].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Сучасний стан розвитку технологій опріснення визначається домінуванням мембранних способів, серед яких найбільш поширеним є зворотний осмос [4]. За показниками питомого енергоспоживання (2–6 кВт·год/м³) та собівартості опрісненої води (0,30–0,56 \$/м³) зворотний осмос є найбільш енергоефективною технологією для вод із мінералізацією до 35 г/л, включаючи як солонуваті, так і морські води [7]. Відносна ефективність сучасних установок зворотного осмосу сягає 59–61% від термодинамічного

мінімуму [4], що свідчить про наближення технології до теоретичної межі енергоефективності. Однак при роботі з розсолами понад 70 г/л питоме енергоспоживання різко зростає до 3–9 кВт·год/м³, прискорюється деградація мембран, а економічна доцільність процесу знижується [7].

Термічні технології (MSF, MED) характеризуються високою стійкістю до змін складу живильної води та стабільністю роботи в широкому діапазоні мінералізації. Разом з тим ці переваги досягаються ціною підвищеного питомого енергоспоживання та значного вуглецевого сліду [8; 9]. Електродіаліз (ED) є економічно виправданим для солонуватих вод (до 10 г/л), проте при вищих концентраціях його енергоспоживання стрімко зростає [17].

На тлі обмежень класичних підходів дослідники звертають увагу на опріснення виморожуванням (FD) та евтектичне виморожування (EFC) як на технології з принципово іншим функціональним призначенням. Виморожування не конкурує зі зворотним осмосом у первинному опрісненні морської води, а доповнює його на фінальних стадіях концентрування розсолів у гібридних ZLD-системах. На відміну від зворотного осмосу та більшості термічних процесів, ефективність яких різко падає при мінералізації понад 60–70 г/л, виморожування зберігає працездатність у широкому діапазоні високих мінералізацій – аж до евтектичної точки [18; 19]. Термодинамічна перевага кристалізації льоду полягає у тому, що вона потребує лише однієї сьомої від прихованої теплоти випаровування [20]. У поєднанні з низькотемпературним режимом роботи це забезпечує експлуатаційні та екологічні переваги.

У раніше виконаному авторами критичному аналізі [17] було встановлено, що домінуючі способи опріснення мають суттєві обмеження при роботі з високомінералізованими розсолами та реалізації

концепції нульового рідкого скиду. Виморожування було виділено як найбільш перспективний напрямок для оброблення висококонцентрованих розсолів із мінералізацією від 30 до 250 г/л.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Незважаючи на зростаючий інтерес до опріснення виморожуванням, промислове впровадження цієї технології все ще стримується низкою невирішених проблем. Наявна в літературі інформація стосується переважно експериментальних і пілотних установок [18; 21]. Одним з основних обмежень подальшого розвитку та масштабування технології є відсутність верифікованих фізично обґрунтованих моделей, здатних адекватно описувати взаємопов'язані процеси теплообміну, масообміну та фазових перетворень при кристалізації льоду із сольових розчинів. Зокрема, бракує мультифізичних моделей кінетики росту льоду в нерівноважних умовах з урахуванням сольового відторгнення, кількісного опису формування двофазної зони та інтегрованих енергетичних моделей, що враховують рекуперацію холоду та нестационарні режими роботи [18; 21].

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є систематизація та критичний аналіз технологічних особливостей, енергетичних характеристик та екологічних показників опріснення виморожуванням для обґрунтування його застосування при концентруванні високомінералізованих розсолів у гібридних опріснювальних схемах з нульовим рідким скидом, а також визначення напрямів подальшого розвитку цієї технології.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ

ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дана робота є теоретичним дослідженням. Методологічну основу становлять загальнонаукові методи

СТАДІЯ 1 Первинне опріснення	СТАДІЯ 2 Концентрування розсолу	СТАДІЯ 3 Фінальна кристалізація
Зворотний осмос (RO)	Термічна дистиляція або опріснення виморожуванням (FD)	Термічна кристалізація або евтектична кристалізація виморожуванням (EFC)
35 г/л → 60–70 г/л	70 г/л → 200–250 г/л	250 г/л → ~260 г/л (евтектична точка)
↓ Прісна вода → Концентрований розсіл	↓ Додаткова вода → Високомінералізований розсіл	↓ Максимум води → Тверді солі БЕЗ РІДКИХ СТОКІВ

Рис. 1. Принципова схема гібридної опріснювальної системи з нульовим рідким скидом (ZLD)

аналізу та синтезу. Інформаційною базою слугували рецензовані наукові публікації в журналах, зокрема індексованих у наукометричних базах Scopus та Web of Science.

Об'єктом дослідження є технологія опріснення виморожуванням та її різновиди (пряме, непряме суспензійне та прогресивне, вакуумне, евтектичне виморожування).

Предметом дослідження є конструктивні особливості установок виморожування, показники питомого енергоспоживання, вилучення прісної води, вуглецевого та водного сліду, а також потенціал інтеграції виморожування в гібридні системи з нульовим рідким скидом.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Принцип дії та класифікація способів виморожування

Опріснення виморожуванням – це спосіб, що базується на фракціонуванні високомінералізованої води внаслідок її охолодження та фазового переходу «рідина – лід». У процесі виморожування із живильної води утворюються кристали льоду та концентрований розсіл. Виморожений лід піддають додатковій обробці: промиванню, дробленню, пресуванню [22], центрифугуванню, поступовому плавленню, перекристалізації [23] – для досягнення необхідної якості опрісненої води. Розплав відокремленого льоду і є кінцевим продуктом – опрісненою водою.

З термодинамічного погляду виморожування є вигідним процесом, оскільки прихована теплота кристалізації льоду становить лише одну сьому від прихованої теплоти випаровування води, що забезпечує економію енергії порівняно з термічними способами [20]. Низькі робочі температури процесу зменшують ризики корозії, утворення накипу та біоплівки в обладнанні [18], а також термічного розкладання хімічних реагентів попередньої водопідготовки [24]. Виморожування є найбільш стійким до домішок і мінералізації живильної води способом опріснення [23]. Рідкі стоки установки не перевищують температури довкілля і не спричиняють термічного забруднення водою [25]. Екологічній безпечності сприяє використання холодоагентів із низьким потенціалом глобального потепління.

Стримуючими факторами для промислового впровадження залишаються прогалини в розумінні, моделюванні та оптимізації взаємопов'язаних процесів фазових перетворень, тепло– і масообміну, що одночасно відбуваються в установці виморожування, а також високі первинні інвестиції, більша тривалість і менша продуктивність процесів отримання прісної води [24]. Водночас огляд джерел літератури засвідчує повернення інтересу до опріснення виморожуванням. Це обумовлено зростаючим дефіцитом прісної води та більш жорсткими вимогами до енергетичної ефективності та екологічної безпечності в умовах сталого розвитку [21].

Технології виморожування дають змогу опріснювати воду та розсоли в широкому діапазоні початкової мінералізації. Обмеженням виступає евтектична точка сольового розчину [20]. Морську воду з мінералізацією близько 35 г/л ефективно опріснюють виморожуванням із конкурентоспроможними показниками порівняно з традиційними способами [21]. Особливо перспективним є виморожування для оброблення розсолів із мінералізацією 70–76 г/л та вище, де можливості поширених мембранних і дистильційних технологій обмежені [15]. Виморожування також ефективне для концентрування розсолів перед вилученням цінних компонентів [16] та очищення високомінералізованих промислових стоків [26].

Пряме та непряме виморожування

Виморожування здійснюють різними способами, що відрізняються характером взаємодії рідини з холодоносієм та організацією кристалізації льоду [24]. Пряме виморожування передбачає безпосередній контакт леткого холодоагенту із живильною водою. Спосіб забезпечує високу інтенсивність теплообміну, проте потребує вилучення залишків фреону з кінцевого продукту та використання складного обладнання для відділення кристалів льоду від розсолу [24]. Різновидом прямого виморожування є гідратне розділення, засноване на властивості газів-гідратуутворювачів за певного тиску і температури утворювати з молекулами води тверді кристали (газові гідрати). Його перевагою є вищі робочі температури порівняно з іншими способами виморожування, що знижує витрати енергії на охолодження. Недоліками є складність відділення дрібних кристалів, висока вартість обладнання високого тиску та потреба в доочищенні опрісненої води від розчинених газів [24].

Для практичного застосування більш перспективними вважаються способи непрямого виморожування: суспензійне та прогресивне [25]. При непрямому виморожуванні теплообмін між холодоносієм і водою здійснюється через теплообмінну поверхню. При суспензійному виморожуванні зародки кристалів льоду формуються в окремому теплообміннику, звідки переміщуються в основний реактор з мішалкою, де продовжується їх ріст. Укрупнені кристали осідають на дно реактора, відділяючись від розсолу. Установки суспензійного виморожування є габаритними, а собівартість опрісненої води в них вища в порівнянні з прогресивним виморожуванням [25].

До прогресивних відносять способи з виморожуванням тонкого шару льоду, блочне виморожування та виморожування з падаючою плівкою рідини [25]. Утворення зародків та ріст кристалів відбуваються на охолоджуваній теплоносієм теплообмінній поверхні у формі труб або пластин. Особливістю таких установок є рухомий фронт кристалізації, швидкість якого регулюють температурою холодоносія та перемішуванням рідини. Перевагами прогресивного

виморожування є простіший процес відділення кристалів льоду від розсолу, краща якість опрісненої води та менші експлуатаційні витрати.

Приклад промислової реалізації прогресивного непрямого виморожування описано в патенті [27]. Установа використовує вертикальні трубчасті теплообмінні елементи (трубки Фільда діаметром 12 мм), по яких циркулює проміжний холодоносіє. Особливістю способу є автоматичне регулювання температури холодоносія залежно від стадії процесу: початкове охолодження до $-5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ для утворення центрів кристалізації, підвищення до $-2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ для росту кристалів при мінімальному переохолодженні ($0,6\text{--}1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$), та поступове зниження до $-4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ на завершальному етапі. Така стратегія дозволяє зменшити питоме енергоспоживання на 10–13 % порівняно з роботою при постійній температурі холодоносія [27].

Евтектичне та вакуумне виморожування

Евтектичне виморожування здійснюють при температурі евтектичної точки розчину. В процесі отримують лід та кристалічну сіль (часто у формі кристалогідратів) із високим ступенем чистоти. Цей спосіб генерує найменший скид рідких стоків серед усіх відомих способів опріснення. До його переваг відносять вищу енергоефективність порівняно з термічною кристалізацією та відсутність потреби в хімічних реагентах для осадження солей. Недоліками залишаються високі капітальні витрати, складність відділення кристалів льоду і солі від розсолу та вищі енерговитрати порівняно з іншими способами виморожування [15].

Вакуумне опріснення виморожуванням полягає у створенні вакуумним насосом низького тиску, за якого частина живильної води миттєво випаровується, а решта рідини стрімко охолоджується з утворенням кристалів льоду. Перевагами є відсутність фреонів та громіздких теплообмінників, а також висока якість опрісненої води. Водночас спосіб характеризується складністю ефективного відділення дрібних кристалів від концентрованого розсолу [24].

Показники ефективності опріснення виморожування

Продуктивність установок виморожування та вилучення прісної води залежить від конструктивних особливостей та робочої температури. Якість опрісненої води визначається мінералізацією живильної води, швидкостями охолодження, нуклеації та росту кристалів льоду [18]. Підвищенню ефективності процесу сприяють підтримка оптимального переохолодження рідини, її перемішування [21], ефективне відділення льоду від розсолу [28]. Застосування ультразвуку дає змогу прискорити утворення кристалів, скоротити час кристалізації та отримати більш чисті кристали [29]. Виморожування під впливом зовнішнього електричного поля дає змогу керувати морфологією кристалів, формуючи відкриті канали для відведення розсолу [30].

Вилучення прісної води для одноступеневої установки становить 51–72% для морської води [22; 31]. При багатоступеневому виморожуванні загальне вилучення може сягати 75–89% для морської води та 68–76% для концентрованих розсолів [31; 32]. Оптимізація параметрів та застосування гібридних систем сприятимуть підвищенню вилучення прісної води до 90% [31].

Енергетичні характеристики

Прихована теплота плавлення льоду становить близько $93\text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$, що визначає теоретичний мінімум теплової енергії для процесу виморожування. Питоме енергоспоживання залежить від конструкції та продуктивності установки, мінералізації живильної води, ефективності холодильного циклу та систем відділення льоду від розсолу [15]. За даними [21] питоме енергоспоживання одноступеневої установки непрямого блочного виморожування при опрісненні морської води становить $11,34\text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ при вилученні прісної води 39,9% з кінцевою мінералізацією $2,5\text{ г/л}$. Для гібридної багатоступеневої установки цей показник сягає $59,2\text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ при вилученні 74% з кінцевою мінералізацією $0,5\text{ г/л}$ [24].

Зниження питомого енергоспоживання досягається завдяки рекуперації холоду, акумульованого льодом під час плавлення, для попереднього охолодження живильної води [18]. Перспективним є розміщення установок біля терміналів зрідженого природного газу (ЗПГ): утилізація криогенного ресурсу від регазифікації ЗПГ ($830\text{--}860\text{ кДж/кг}$) забезпечує необхідну холодопродуктивність без додаткових холодильних циклів [28]. Зниження питомого енергоспоживання при непрямому виморожуванні до $1,7\text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ досягається при застосуванні ультразвуку [18]. Загальне питоме енергоспоживання гібридної системи «виморожування – зворотний осмос» становить $5,17\text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ – це на 25% нижче питомого енергоспоживання традиційної установки зворотного осмосу [24].

Екологічні та економічні показники

Дані про вуглецевий і водний слід опріснення виморожуванням в джерелах літератури відсутні або наведені без зазначення методики їх розрахунку. Це є причиною некоректного порівняння таких екологічних показників для різних технологій. В даному дослідженні відповідні розрахунки виконані авторами. Вуглецевий слід розраховано для умов енергосистеми України із загальнодержавним зваженим коефіцієнтом викидів парникових газів $316\text{ г CO}_2\text{-екв./кВт}\cdot\text{год}$ для електричної енергії (постанова Кабінету Міністрів України від 5 лютого 2026 р. № 156), а також для випадків використання сонячної енергії (пряме живлення від фотоелектричної панелі та живлення через систему накопичення енергії). Водний слід розраховано з використанням показника водного сліду електроенергетики України $2,79\text{ м}^3/\text{МВт}\cdot\text{год}$ (розраховано за методикою [33]).

Таблиця 1. Екологічні показники установок опріснення води виморожуванням

Питоме енергоспоживання, кВт·год/м ³	Вуглецевий слід, кг CO ₂ -екв./м ³			Водний слід, м ³ /м ³
	для умов енергосистеми України	пряме живленням від сонячних панелей	фотоелектрична система з накопичення енергії	
11,34	3,6	0,6	1,0	0,032
59,20	18,7	3,2	5,2	0,165

В табл. 1 наведені розраховані значення вуглецевого та водного сліду установок опріснення морської води виморожуванням з питомим енергоспоживанням 11,34 та 59,2 кВт·год/м³ – одноступенева і багаступенева установки непрямого виморожування.

Згідно з результатами розрахунків (табл. 1) при живленні установок виморожування електроенергією від загальної енергосистеми України вуглецевий слід знаходиться в межах 3,6–18,7 кг CO₂-екв./м³. Суттєве зменшення вуглецевого сліду досягається при використанні відновлюваних джерел енергії: вуглецевий слід систем із сонячним живленням не перевищує 5,2 кг CO₂-екв./м³. Також можна прогнозувати низьке значення вуглецевого сліду для установок виморожування з рекуперацією холоду. Розраховане значення водного сліду установок виморожування для умов України знаходиться в діапазоні 0,032–0,165 м³/м³. Зменшити водний слід можна застосовуючи для опріснення гібридні системи, в яких як завершальний етап оброблення води використовується евтектичне виморожування.

Капітальні витрати на обладнання для виморожування становлять 50–85% від загальних інвестицій. Непрямі капітальні витрати знаходяться на рівні 40% від прямих [34]. Собівартість опрісненої води при непрямому виморожуванні морської води на лабораторних та пілотних установках з продуктивністю до 30 м³/добу знаходиться в діапазоні 0,4–1,2 \$/м³ [35]. Інтеграція з фотоелектричними панелями для живлення компресорів або сонячними колекторами для плавлення льоду знижує операційні витрати та покращує екологічні показники [36].

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Систематизація та аналіз даних, наведених у даній роботі, свідчать про те, що опріснення виморожуванням посідає принципово відмінну позицію в ієрархії опріснювальних технологій. Хоча виморожування не мінімізує питоме енергоспоживання в абсолютних величинах, воно забезпечує стійку працездатність у діапазоні концентрацій, недоступному для зворотного осмосу, електродіалізу та більшості термічних процесів. Поєднання низького водного сліду з високими значеннями вилучення прісної води та відсутність ризиків корозії і накипоутворення обумовлюють придатність виморожування для фінальних стадій концентрування та реалізації ZLD-орієнтованих гібридних схем.

Значна варіативність показників питомого енергоспоживання (від 1,7 до 59,2 кВт·год/м³) для різних

конфігурацій виморожування слід інтерпретувати не як прояв технологічної нестабільності, а як показник високої чутливості процесу до рівня рекуперації холоду, організації тепло-і масообміну та ступеня інтеграції з іншими технологіями. Саме ця гнучкість відкриває можливості для широкого практичного використання виморожування в складі гібридних опріснювальних систем.

Перехід від лабораторних досліджень до промислового впровадження потребує вирішення низки проблем. Наявні дослідження переважно базуються на емпіричних залежностях або лабораторних спостереженнях, що суттєво обмежує можливості масштабування результатів. Удосконалення математичних моделей, що описують взаємно пов'язані теплові, масообмінні та гідродинамічні процеси, ускладнені фазовим перетворенням та реалізація їх в середовищах чисельного мультифізичного моделювання, зокрема COMSOL Multiphysics, є необхідною передумовою для оптимізації конструкцій установок виморожування та обґрунтування проектних рішень для ZLD-орієнтованих гібридних опріснювальних систем.

ВИСНОВКИ

1. Опріснення виморожуванням забезпечує стабільну роботу в діапазоні мінералізації від 70 г/л до евтектичної точки (~260 г/л для NaCl), де зворотний осмос та термічні процеси є технологічно обмеженими. Це робить виморожування перспективною технологією для фінальних стадій концентрування розсолів у гібридних ZLD-системах.

2. Питоме енергоспоживання установок виморожування варіюється від 1,7 до 59,2 кВт·год/м³ залежно від їх конструкції та ступеня рекуперації холоду. Гібридні схеми з інтеграцією виморожування і зворотного осмосу демонструють зниження енергоспоживання до рівнів, конкурентних з автономним зворотним осмосом при опрісненні морської води.

3. Для умов енергосистеми України вуглецевий слід виморожування становить 3,6–18,7 кг CO₂-екв./м³ при використанні електроенергії з мережі. Інтеграція з відновлюваними джерелами енергії знижує вуглецевий слід до 0,6 кг CO₂-екв./м³. Водний слід технології становить 0,032–0,165 м³/м³, що нижче за показники термічних процесів.

4. Основними перешкодами для промислового впровадження опріснення виморожуванням є: відсутність верифікованих моделей процесів

кристалізації льоду із сольових розчинів, недостатній кількісний опис формування двофазної зони та обмежені дані щодо роботи установок у нестационарних режимах. Вирішення цих проблем потребує розробки мультифізичних моделей, що поєднують тепло- і масообмін, гідродинаміку та фазові перетворення.

5. Пріоритетними напрямками наших подальших досліджень є: розробка та експериментальна верифікація мультифізичних моделей непрямого виморожування на вертикальних трубчастих теплообмінних елементах; оптимізація гібридних ZLD-конфігурацій з урахуванням взаємодії різних технологічних стадій та їх техніко-економічна оцінка.

REFERENCES

- [1] Wang, Y., Morosuk, T., & Cao, W. (2024). Carbon Footprint of Seawater Desalination Technologies: A Review. *Journal of Energy Resources Technology*, 146(8). <<https://doi.org/10.1115/1.4065251>>
- [2] Kuznetsova, S. A. (2023). Water desalination circuits using the heat of the gas-steam mixture and circulating water in contact gas-steam turbine plants. *Proceedings of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*, 2--3(491--492). [https://doi.org/10.15589/znpp2023.2-3\(491-492\).8](https://doi.org/10.15589/znpp2023.2-3(491-492).8)
- [3] Almasoudi, S., & Jamoussi, B. (2024). Desalination technologies and their environmental impacts: A review. *Sustainable Chemistry One World*, 1, 100002. <https://doi.org/10.1016/j.scowo.2024.100002>
- [4] Eke, J., Yusuf, A., Giwa, A., & Sodi, A. (2020). The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity. *Desalination*, 495, 114633. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114633>
- [5] El-Ghonemy, A. M. K. (2018). Performance test of a sea water multi-stage flash distillation plant: Case study. *Alexandria Engineering Journal*, 57(4), 2401--2413. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.08.019>
- [6] Shahzamanian, B., Varga, S., Soares, J., Palmero-Marrero, A. I., & Oliveira, A. C. (2024). Theoretical performance assessment of a multi-effect distillation system integrated with thermal vapour compression unit running on solar energy. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 19, 908--921. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctae010>
- [7] Davenport, D. M., Deshmukh, A., Werber, J. R., & Elimelech, M. (2018). High-pressure reverse osmosis for energy-efficient hypersaline brine desalination: Current status, design considerations, and research needs. *Environmental Science & Technology Letters*, 5(8), 467--475. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.8b00274>
- [8] Shahzad, M. W., Burhan, M., Ang, L., & Ng, K. C. (2017). Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability. *Desalination*, 413, 52--64. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.03.009>
- [9] Panagopoulos, A. (2025). Assessing the Energy Footprint of Desalination Technologies and Minimal/Zero Liquid Discharge (MLD/ZLD) Systems for Sustainable Water Protection via Renewable Energy Integration. *Energies*, 18(4), 962. <<https://doi.org/10.3390/en18040962>>
- [10] Alrashidi, A., Aleisa, E., & Alshayji, K. (2024). Life cycle assessment of hybrid electrodialysis and reverse osmosis seawater desalination systems. *Desalination*, 578, 117448. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117448>
- [11] Elsaid, K., Kamil, M., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T., & Olabi, A. (2020). Environmental impact of desalination technologies: A review. *Science of The Total Environment*, 748, 141528. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141528>
- [12] Abdelfattah, I., & El-Shamy, A. M. (2024). Review on the escalating imperative of zero liquid discharge (ZLD) technology for sustainable water management and environmental resilience. *Journal of Environmental Management*, 351, 119614. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119614>
- [13] Ting, W. H. T., Tan, I. A. W., Salleh, S. F., Abdul Wahab, N., Atan, M. F., Abdul Raman, A. A., Kong, S. L., & Lam, L. S. (2024). Sustainable saline wastewater treatment using eutectic freeze crystallization: Recent advances, challenges and future prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 112919. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112919>
- [14] Lee, S., Choi, J., Park, Y.-G., Shon, H., Ahn, C. H., & Kim, S.-H. (2019). Hybrid desalination processes for beneficial use of reverse osmosis brine: Current status and future prospects. *Desalination*, 454, 104--111. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.02.002>
- [15] Nemmour, A., Zhang, H., El Kadi, K. E., & Janajreh, I. (2024). Thermodynamic modeling of eutectic freezing for enhanced seawater desalination and reverse osmosis brine treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 68, 106483. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106483>
- [16] Culcasi, A., Ktori, R., Pellegrino, A., Rodriguez-Pascual, M., van Loosdrecht, M. C. M., Tamburini, A., Cipollina, A., Xevgenos, D., & Micale, G. (2022). Towards sustainable production of minerals and chemicals through seawater brine treatment using eutectic freeze crystallization and electrodialysis with bipolar membranes. *Journal of Cleaner Production*, 368, 133143. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133143>>
- [17] Vasylyv, B., Doroshenko, V., Vasylyv, O., & Kovalenko, O. (2025). Enerhetychna, ekonomichna ta ekolohichna efektyvnist suchasnykh sposobiv oprishnennia vody ta rozsoliv. *Refrigeration Engineering and Technology*, 61(4). <https://doi.org/10.15673/ret.v61i4.3330> [in Ukrainian]
- [18] Janajreh, I., Zhang, H., El Kadi, K., & Ghaffour, N. (2023). Freeze desalination: Current research development and future prospects. *Water Research*, 229, Article 119389. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119389>
- [19] Shishiny, A. M., Kader, A. M., Ahmed, S., & Rashad, M. I. (2025). An investigation of a proposed freezing desalination system integrating sweating effect and a centrifugal-based brine rejection technique. *Separation and Purification Technology*, 353, 128390. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128390>

- [20] Yi, S., Yuan, H., Zhou, P., Peng, W., & Zhang, Z. (2025). Theoretical analysis and optimization of ocean thermal energy driven multigeneration system utilizing multistage freezing desalination for integrated power and desalination. *Desalination*, 613, 119036. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119036>
- [21] Xie, X., Chen, Y., Dai, L., & Xu, L. (2025). A review of indirect freezing desalination: Key parameters, experimental research, and numerical modeling. *Desalination and Water Treatment*, 322, 101070. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101070>
- [22] Rashad, M. I., Faiad, H. A., Ghonim, A. T., Ahmed, S., & Farahat, M. A. (2023). Single-stage freezing desalination study with slurry pressing piston and enhanced vacuum for brine extraction. *Desalination*, 566, 116947. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116947>
- [23] Zhao, S., Zhu, R., Song, J., & Yuan, H. (2024). An overview of sustainable desalination with freezing crystallization: Current development, future challenges, and prospects. *Sustainability*, 16(22), Article 10138. <https://doi.org/10.3390/su162210138>
- [24] Najim, A. (2022). A review of advances in freeze desalination and future prospects. *npj Clean Water*, 5, Article 15. <https://doi.org/10.1038/s41545-022-00158-1>
- [25] El Kadi, K., Adeyemi, I., & Janajreh, I. (2021). Application of directional freezing for seawater desalination: Parametric analysis using experimental and computational methods. *Desalination*, 520, 115339. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115339>
- [26] Khalil, A., Mohammed, S., Hashaikh, R., & Hilal, N. (2022). Lithium recovery from brine: Recent developments and challenges. *Desalination*, 528, 115611. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115611>
- [27] Vasylyv O.B., Kovalenko O.O., Titlov O.S., Ishchenko S.V. (2014). Ustanovka dlia oprisnennia vody. Patent Ukrainy № 105299. Biul. № 8. [in Ukrainian]
- [28] Hendijanifard, M., & Sharifi, H. (2024). Simplified freeze desalination through enhanced recovery rate and desalination efficiency. *AUT Journal of Mechanical Engineering*, 8(1), 43--52. <https://doi.org/10.22060/ajme.2024.22809.6077>
- [29] Burdo, O. G., Kovalenko, E. A., & Kharenko, D. A. (2008). Intensification of the processes of low-temperature separation of food solutions. *Applied Thermal Engineering*, 28*(4), 311--316. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.02.035>
- [30] Yu, Y., Ding, C., Tong, H., Ren, N., & You, S. (2025). Flashover-Inspired Electro-Assisted Crystallization for Controllable Freeze Desalination. *Environmental Science & Technology*, 59 (14), 7399--7407. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c14381>
- [31] Salajeghe, M., & Ameri, M. (2023). Thermodynamic analysis of single and multi-effect freeze desalination. *Applied Thermal Engineering*, 225, 120148. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120148>
- [32] Wang, P., & Chung, T.-S. (2012). A conceptual demonstration of freeze desalination--membrane distillation (FD--MD) hybrid desalination process utilizing liquefied natural gas (LNG) cold energy. *Water Research*, 46(13), 4037--4052. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.04.042>
- [33] Lohrmann, A., Farfan, J., Caldera, U., Lohrmann, C., & Breyer, C. (2021). Assessment of the water footprint for the European power sector during the transition towards a 100% renewable energy system. *Energy*, 233, 121098. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121098>
- [34] Chen, Q., Zhou, D., Zhu, Y., Luo, M., & Wu, Z. (2024). An insight into freezing crystallization with a perspective on its application in high-salinity industrial wastewater. *Desalination*, 590, 117985. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117985>
- [35] Sharon, H., & Reddy, K. S. (2015). A review of solar energy driven desalination technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1080--1118. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.002>
- [36] Hendijanifard, M., HajAli, A., & Farhadi, S. (2024). Comparing energy and exergy of multiple effect freeze desalination to MEE MSF RO. *npj Clean Water*, 7(1), 95. <https://doi.org/10.1038/s41545-024-00395-6>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Wang, Y., Morosuk, T., & Cao, W. (2024). Carbon Footprint of Seawater Desalination Technologies: A Review. *Journal of Energy Resources Technology*, 146(8). <https://doi.org/10.1115/1.4065251>
- [2] Kuznetsova, S. A. (2023). Water desalination circuits using the heat of the gas-steam mixture and circulating water in contact gas-steam turbine plants. *Proceedings of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*, 2--3(491--492). [https://doi.org/10.15589/znp2023.2-3\(491-492\).8](https://doi.org/10.15589/znp2023.2-3(491-492).8)
- [3] Almasoudi, S., & Jamoussi, B. (2024). Desalination technologies and their environmental impacts: A review. *Sustainable Chemistry One World*, 1, 100002. <https://doi.org/10.1016/j.scowo.2024.100002>
- [4] Eke, J., Yusuf, A., Giwa, A., & Sodiq, A. (2020). The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity. *Desalination*, 495, 114633. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114633>
- [5] El-Ghonemy, A. M. K. (2018). Performance test of a sea water multi-stage flash distillation plant: Case study. *Alexandria Engineering Journal*, 57(4), 2401--2413. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.08.019>
- [6] Shahzamanian, B., Varga, S., Soares, J., Palmero-Marrero, A. I., & Oliveira, A. C. (2024). Theoretical performance assessment of a multi-effect distillation system integrated with thermal vapour compression unit running on solar energy. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 19, 908--921. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctae010>
- [7] Davenport, D. M., Deshmukh, A., Werber, J. R., & Elimelech, M. (2018). High-pressure reverse osmosis for energy-efficient hypersaline brine desalination: Current status, design considerations, and research needs. *Environmental Science & Technology Letters*, 5(8), 467--475. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.8b00274>
- [8] Shahzad, M. W., Burhan, M., Ang, L., & Ng, K. C. (2017). Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability. *Desalination*, 413, 52--64. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.03.009>

- [9] Panagopoulos, A. (2025). Assessing the Energy Footprint of Desalination Technologies and Minimal/Zero Liquid Discharge (MLD/ZLD) Systems for Sustainable Water Protection via Renewable Energy Integration. *Energies*, 18(4), 962. <<https://doi.org/10.3390/en18040962>>
- [10] Alrashidi, A., Aleisa, E., & Alshayji, K. (2024). Life cycle assessment of hybrid electrodialysis and reverse osmosis seawater desalination systems. *Desalination*, 578, 117448. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117448>
- [11] Elsaid, K., Kamil, M., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T., & Olabi, A. (2020). Environmental impact of desalination technologies: A review. *Science of The Total Environment*, 748, 141528. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141528>
- [12] Abdelfattah, I., & El-Shamy, A. M. (2024). Review on the escalating imperative of zero liquid discharge (ZLD) technology for sustainable water management and environmental resilience. *Journal of Environmental Management*, 351, 119614. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119614>
- [13] Ting, W. H. T., Tan, I. A. W., Salleh, S. F., Abdul Wahab, N., Atan, M. F., Abdul Raman, A. A., Kong, S. L., & Lam, L. S. (2024). Sustainable saline wastewater treatment using eutectic freeze crystallization: Recent advances, challenges and future prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 112919. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112919>
- [14] Lee, S., Choi, J., Park, Y.-G., Shon, H., Ahn, C. H., & Kim, S.-H. (2019). Hybrid desalination processes for beneficial use of reverse osmosis brine: Current status and future prospects. *Desalination*, 454, 104--111. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.02.002>
- [15] Nemmour, A., Zhang, H., El Kadi, K. E., & Janajreh, I. (2024). Thermodynamic modeling of eutectic freezing for enhanced seawater desalination and reverse osmosis brine treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 68, 106483. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106483>
- [16] Culcasi, A., Ktori, R., Pellegrino, A., Rodriguez-Pascual, M., van Loosdrecht, M. C. M., Tamburini, A., Cipollina, A., Xevgenos, D., & Micale, G. (2022). Towards sustainable production of minerals and chemicals through seawater brine treatment using eutectic freeze crystallization and electrodialysis with bipolar membranes. *Journal of Cleaner Production*, 368, 133143. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133143>>
- [17] Василів, Б., Дорошенко, В., Василів, О., & Коваленко, О. (2025). Енергетична, економічна та екологічна ефективність сучасних способів опріснення води та розсолів. *Refrigeration Engineering and Technology*, 61(4). <https://doi.org/10.15673/ret.v61i4.3330>
- [18] Janajreh, I., Zhang, H., El Kadi, K., & Ghaffour, N. (2023). Freeze desalination: Current research development and future prospects. *Water Research*, 229, Article 119389. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119389>
- [19] Shishiny, A. M., Kader, A. M., Ahmed, S., & Rashad, M. I. (2025). An investigation of a proposed freezing desalination system integrating sweating effect and a centrifugal-based brine rejection technique. *Separation and Purification Technology*, 353, 128390. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128390>
- [20] Yi, S., Yuan, H., Zhou, P., Peng, W., & Zhang, Z. (2025). Theoretical analysis and optimization of ocean thermal energy driven multigeneration system utilizing multistage freezing desalination for integrated power and desalination. *Desalination*, 613, 119036. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119036>
- [21] Xie, X., Chen, Y., Dai, L., & Xu, L. (2025). A review of indirect freezing desalination: Key parameters, experimental research, and numerical modeling. *Desalination and Water Treatment*, 322, 101070. <<https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101070>>
- [22] Rashad, M. I., Faiad, H. A., Ghoni, A. T., Ahmed, S., & Farahat, M. A. (2023). Single-stage freezing desalination study with slurry pressing piston and enhanced vacuum for brine extraction. *Desalination*, 566, 116947. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116947>
- [23] Zhao, S., Zhu, R., Song, J., & Yuan, H. (2024). An overview of sustainable desalination with freezing crystallization: Current development, future challenges, and prospects. *Sustainability*, 16(22), Article 10138. <https://doi.org/10.3390/su162210138>
- [24] Najim, A. (2022). A review of advances in freeze desalination and future prospects. *npj Clean Water*, 5, Article 15. <https://doi.org/10.1038/s41545-022-00158-1>
- [25] El Kadi, K., Adeyemi, I., & Janajreh, I. (2021). Application of directional freezing for seawater desalination: Parametric analysis using experimental and computational methods. *Desalination*, 520, 115339. <<https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115339>>
- [26] Khalil, A., Mohammed, S., Hashaikeh, R., & Hilal, N. (2022). Lithium recovery from brine: Recent developments and challenges. *Desalination*, 528, 115611. <<https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115611>>
- [27] Василів О.Б., Коваленко О.О., Тітлов О.С., Іщенко С.В. (2014). Установа для опріснення води. Патент України № 105299. Бюл. № 8.
- [28] Hendijanifard, M., & Sharifi, H. (2024). Simplified freeze desalination through enhanced recovery rate and desalination efficiency. *AUT Journal of Mechanical Engineering*, 8(1), 43--52. <https://doi.org/10.22060/ajme.2024.22809.6077>
- [29] Burdo, O. G., Kovalenko, E. A., & Kharenko, D. A. (2008). Intensification of the processes of low-temperature separation of food solutions. **Applied Thermal Engineering*, 28*(4), 311--316. <<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.02.035>>
- [30] Yu, Y., Ding, C., Tong, H., Ren, N., & You, S. (2025). Flashover-Inspired Electro-Assisted Crystallization for Controllable Freeze Desalination. *Environmental Science & Technology*, 59 (14), 7399--7407. <<https://doi.org/10.1021/acs.est.4c14381>>
- [31] Salajeghe, M., & Ameri, M. (2023). Thermodynamic analysis of single and multi-effect freeze desalination. *Applied Thermal Engineering*, 225, 120148. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120148>
- [32] Wang, P., & Chung, T.-S. (2012). A conceptual demonstration of freeze desalination--membrane distillation (FD--MD) hybrid desalination process utilizing liquefied natural gas (LNG) cold energy. *Water Research*, 46(13), 4037--4052. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.04.042>

- [33] Lohrmann, A., Farfan, J., Caldera, U., Lohrmann, C., & Breyer, C. (2021). Assessment of the water footprint for the European power sector during the transition towards a 100% renewable energy system. *Energy*, 233, 121098. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121098>
- [34] Chen, Q., Zhou, D., Zhu, Y., Luo, M., & Wu, Z. (2024). An insight into freezing crystallization with a perspective on its application in high-salinity industrial wastewater. *Desalination*, 590, 117985. <<https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117985>>
- [35] Sharon, H., & Reddy, K. S. (2015). A review of solar energy driven desalination technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1080--1118. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.002>
- [36] Hendijanifard, M., HajAli, A., & Farhadi, S. (2024). Comparing energy and exergy of multiple effect freeze desalination to MEE MSF RO. *npj Clean Water*, 7(1), 95. <https://doi.org/10.1038/s41545-024-00395-6>

© Василів О. Б., Коваленко О. О., Василів Б. О.

Дата першого надходження статті до видання: 11.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)