

ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА ІНДИКАТОРИ ПРОМИСЛОВОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЙ ОПРІСНЕННЯ ВОДИ (ЗА МАТЕРІАЛАМИ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ «ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ У ХХІ СТОЛІТТІ» 2024. КИЇВ. УКРАЇНА)

Отримано 13 жов. 2024 р.; рекомендовано до публікації 27 лист. 2024 р.

Доступно онлайн 11 груд. 2024 р.

Бриль А. О.¹, Васько П. Ф.², Кромпляс Б. А.³

Автор для кореспонденції: Васько Петро,
e-mail: ivevasko@gmail.com

¹ наук. співроб.

<https://orcid.org/0000-0002-5134-0393>

² д-р техн. наук

<https://orcid.org/0000-0001-8807-7173>

³ канд. техн. наук

<https://orcid.org/0000-0001-7164-8056>

^{1, 2, 3} Інститут відновлюваної енергетики
НАН України, м. Київ, Україна

Узагальнено основні результати доповідей на секції гідроенергетики стосовно опріснення води в промислових масштабах. Актуальність задачі опріснення морської води в Україні зумовлена участю країни в реалізації європейської програми «2×40 GW Green Hydrogen Initiative», якою передбачено побудову на її території 10 ГВт потужностей електролізерів для виробництва зеленого водню з енергоживленням від офшорних та прибережних вітро-фотоелектростанцій загальною встановленою потужністю на рівні 40 ГВт. Очікуваний обсяг виробництва водню становить 1,65 млн т на рік, що потребуватиме споживання підготовленої прісної води не менше 24 млн м³/рік. Одним з альтернативних варіантів постачання прісної води для функціонування електролізерів у цьому проєкті є використання опрісненої морської води. Мета публікації полягає в аналізі кількісних показників сучасних світових досягнень промислових технологій опріснення морської і солонуватої води, що можуть слугувати індикаторами визначення пріоритетності застосування конкретної технології для вирішення аналогічних задач в нашій країні. Розглянуто досягні результати реалізації основних чотирьох промислових технологій, визначено ретроспективні тренди та кількісні значення на кінець 2023 року обсягів та вартості виробництва води, розподіл капітальних та експлуатаційних витрат на виробництво, сучасний стан ринку капіталу й темпи його зростання на найближче десятиліття, основних учасників ринку обладнання і проєктних рішень опріснювальних заводів. Основними чинниками витрат на опріснення води визначено взаємопов'язані фактори вибору технології, розміру заводу та місця його розташування, потреби у воді та електроенергії, режими екологічного регулювання стосовно викидів, утилізація розсолу, доцільне проєктне рішення. Бібл. 52, табл. 2, рис. 8.

Ключові слова: вода, довкілля, екологія, енергія, завод, опріснення, потужність, ринок, технологія, фінанси.

MAIN TRENDS AND INDICATORS OF THE INDUSTRIAL IMPLEMENTATION OF WATER DESALINATION TECHNOLOGIES (ACCORDING TO THE MATERIALS OF THE SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE "RENEWABLE ENERGY AND ENERGY EFFICIENCY IN THE XXI CENTURY" 2024. KYIV. UKRAINE)

Received Oct. 13, 2024; accepted Nov. 27, 2024

Available online Dec. 11, 2024

Bryl A.¹, Vasko P.², Kromplyas B.³

Author for correspondence: Vasko Petro,
e-mail: ivevasko@gmail.com

¹ Researcher

<https://orcid.org/0000-0002-5134-0393>

² Dr. of Tech. Sciences

<https://orcid.org/0000-0001-8807-7173>

³ Cand. of Tech. Sciences

<https://orcid.org/0000-0001-7164-8056>

^{1, 2, 3} Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The main results of reports at the hydropower section regarding water desalination on an industrial scale are summarized. The relevance of the task of seawater desalination in Ukraine is determined by the country's participation in the implementation of the European program

"2x40 GW Green Hydrogen Initiative", which provides for the construction of 10 GW of electrolyser capacity on its territory for the production of "green" hydrogen with power supply from offshore and coastal wind and solar power plants with a total installed capacity of 40 GW. The expected volume of hydrogen production is 1.65 million tons per year, which will require consumption of prepared fresh water of at least 24 million m³/year. One of the alternative options for supplying fresh water for the operation of electrolyzers in this project is to use desalinated sea water. The purpose of the publication is to analyze quantitative indicators of modern world achievements in industrial technologies for desalination of sea and brackish water, which can serve as indicators for determining the priority of using a specific technology to solve similar problems in our country. The achievable results of the implementation of the main four industrial technologies are considered, the retrospective trends and quantitative values at the end of 2023 of the volume and cost of water production, the distribution of capital and operating costs for production, the current state of the capital market and its growth rates for the next decade, the main participants of the equipment market and design solutions of desalination plants. Interrelated factors of technology selection, plant size and location, water and electricity needs, environmental regulation regimes regarding emissions, brine disposal, appropriate design decision are defined as the main factors of water desalination costs. Bibl. 52, tables 2, fig. 8.

Key words: water, environment, ecology, energy, plant, desalination, capacity, market, technology, finance.

Вступ. У роботі XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (Україна. Київ. 22–24 травня 2024 року) взяли участь дослідники з 7 країн: України, Польщі, Чехії, Німеччини, Литви, Узбекистану, Іспанії [1]. Обговорення актуальних питань сьогодення відбувались за такою тематикою: енергоефективність, комплексні системи з відновлюваними джерелами енергії, вітроенергетика, сонячна енергетика, енергія біомаси, гідроенергетика, геотермальна енергетика, воднева енергетика, енергетика довкілля, розумні мережі.

На інформаційній платформі секції гідроенергетики висвітлювалась тематика, яка безпосередньо належить до сфери створення й експлуатації гідроелектростанцій, та деякі аспекти промислової реалізації технологій опріснення води. Актуальність останніх зумовлена підривом греблі Каховської ГЕС агресором, що посилює несприятливу ситуацію з водозабезпеченням південних регіонів країни [2]. Участь України в європейській програмі «2x40 GW Green Hydrogen Initiative» [3, 4] передбачає спорудження на території України 10 ГВт потужностей електролізерів для виробництва зеленого водню в обсязі 1,65 млн т на рік, що також потребуватиме споживання підготовленої прісної води в обсягах не менше 24 млн м³/рік [5]. Застосування технологій опріснення води має хороші перспективи в промисловому, приватному, сільськогосподарському секторах економіки та знесоленні шахтних вод [6–9].

Основний зміст доповідей щодо опріснення води торкався висвітлення передових досягнень з реалізації різних технологій в промислових масштабах.

Мета публікації полягає в аналізі кількісних показників сучасних світових досягнень промислових технологій опріснення морської і солонуватої води, що можуть слугувати індикаторами визначення пріоритетності застосування конкретної технології для вирішення аналогічних задач в нашій країні.

Сучасні промислові технології опріснення води. Опріснення являє собою процес видалення солі з води, незалежно від того, чи це морська вода, солонувата, або мінералізована. На сьогодні для опріснення води в промислових масштабах широко застосовують термальну та мембранну технології [10–14].

Сутність термальної технології полягає в тому, що солону воду нагрівають до кипіння і вихідну пару збирають та конденсують. Утворюється прісна вода, що зветься дистиллятом. Випарювати воду можна як при кипінні, так і без кипіння. В останньому випадку воду нагрівають при вищому тиску, ніж тиск в камері випаровування, куди подається вода. Для пароутворення використовується теплота, що міститься в самій воді, яка при цьому охолоджується до температури насичення розсолу, який залишився. Процеси термічного знесолення в промислових масштабах засновані на зміні фаз стану солоної води, до яких належать: багатостадійне швидке випаровування (MSF), багаторазова дистиляція (MED), дистиляція з механічним та термічним стисненням пари (MVC, TVC).

Багатостадійне швидке випаровування (MSF) має декілька стадій обробки солоної води. На початковому етапі вода нагрівається при підвищеному тиску, а при надходженні в першу і наступні випарні камери тиск поступово скидається, що викликає швидке закипання води та швидке випаровування (подібне спалаху) пари, що конденсується в трубках теплообмінника на кожній стадії (рис. 1).

Солона вода розбризкується через форсунки, потрапляючи на зовнішню поверхню нагрітих труб випарника-конденсатора. Вода на трубах випаровується, розсілюється вниз і відкачується насосом, а пара через тумановловлювач (дефлегматор) надходить у компресор. Стиснена та нагріта пара потрапляє у труби, де вона охолоджується й конденсується. Конденсат відкачується насосом. Гарячий конденсат і гарячий розсіл у

теплообміннику віддають тепло живильній солоній воді. Вакуум-насос підтримує всередині випарника-конденсатора вакуум, що забезпечує кипіння солоної води за заданої температури (зазвичай не вище 70 °C). Основна ідея стиснення пари полягає в тому, щоб змусити вторинну пару конденсуватися за вищої температури, ніж температура випаровування, що досягається внаслідок

підвищення тиску конденсації. Повторне використання енергії конденсації знижує витрати енергії на виробництво дистилату, за винятком обсягу споживання електроенергії компресором. Цей метод вважається ефективнішим, ніж MSF, оскільки нижчі температури знижують інтенсивність корозійних процесів, а вторинне використання тепла знижує обсяги споживання енергії.

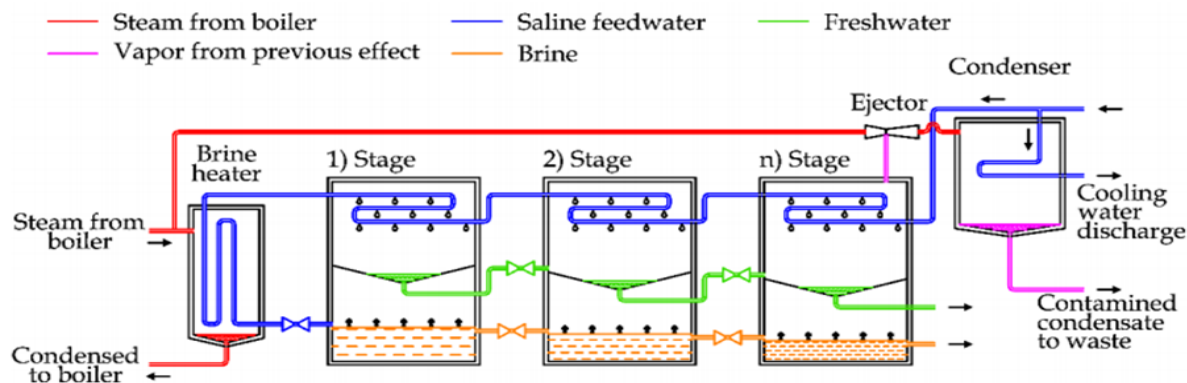


Рис. 1. Схема опріснювальної установки з багатастадійним випаровуванням (MSF) [15]

Fig. 1. A schema of a Multi-Stages Flash (MSF) desalination unit [15]

Багаторазова дистиляція (MED) відбувається за тим же принципом, тільки вода нагрівається перед кожною

камерою теплом, отриманим в процесі конденсації (рис. 2).

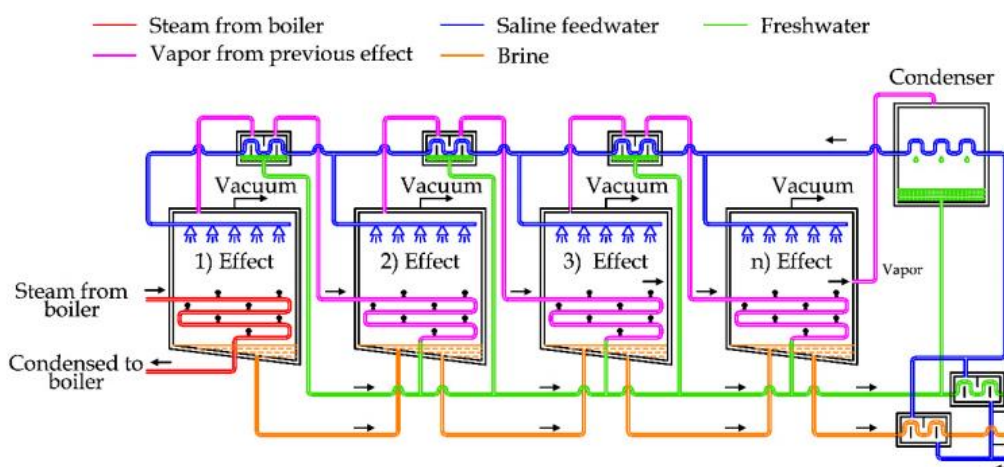


Рис. 2. Схема опріснювальної установки з багаторазовою дистиляцією (MED) [15]

Fig. 2. A schema of a Multi-Effect Distillation (MED) unit [15]

Технології мембранного опріснення використовують мембрани для відділення прісної води від солоної живильної води. Живильна вода подається на поверхню мембрани, яка вибірково пропускає воду і не пропускає солі. Найбільшого поширення набули технології зворотного осмосу (RO) та електродіалізу (ED).

Технологія RO [16] ґрунтується на принципі проникнення молекул води через напівпроникну мембрану під дією гідростатичного тиску, що створюється гідронасосами з приводом від електричних двигунів зі

споживанням електроенергії (рис. 3). Мембрана відокремлює молекули води з низьким вмістом солей від основного об'єму солоної води. Для проникнення води через мембрану необхідно створити тиск, який перевищує осмотичний бар'єр, значення якого залежить від концентрації солей у живильній воді. Потрібно щонайменше 7 кПа (1 psi) на кожні 100 мг/л розчинених у воді солей. Тиск на мембрану повинен бути більшим за осмотичний тиск, який для типової морської води з концентрацією солей 35 000 ppm становить близько 26 бар. З урахуванням гідравлічного опору самої мембрани

необхідно створювати тиск у межах 50–70 бар. Обсяг отриманої прісної води може досягати близько 25–30 % початкового об'єму живильної морської води. Технологічним рішенням з наближення необхідного тиску на вході до теоретично мінімального значення осмотичного бар'єра є двостадійна схема опріснення, в якій послідовно з'єднані кілька насосів високого тиску і мембранних модулів. На першому етапі досягається лише частина загального вилучення солі, отже процес відбувається при нижчому значенні прикладеного тиску.

Потім концентрат з цього ступеня доводиться до вищого тиску перед подачею на другий ступінь, де досягається додаткове вилучення. Такий режим роботи дозволяє доводити менші об'єми води до вищого тиску, а отже, споживати менше електроенергії, проте для цього необхідне застосування додаткових насосів, що збільшує капітальні витрати. Оскільки тиск соляного концентрату (ропи) на виході з модуля RO залишається значним, то його можна використати для відновлення частини енергії, застосовуючи пристрої рекуперації енергії.

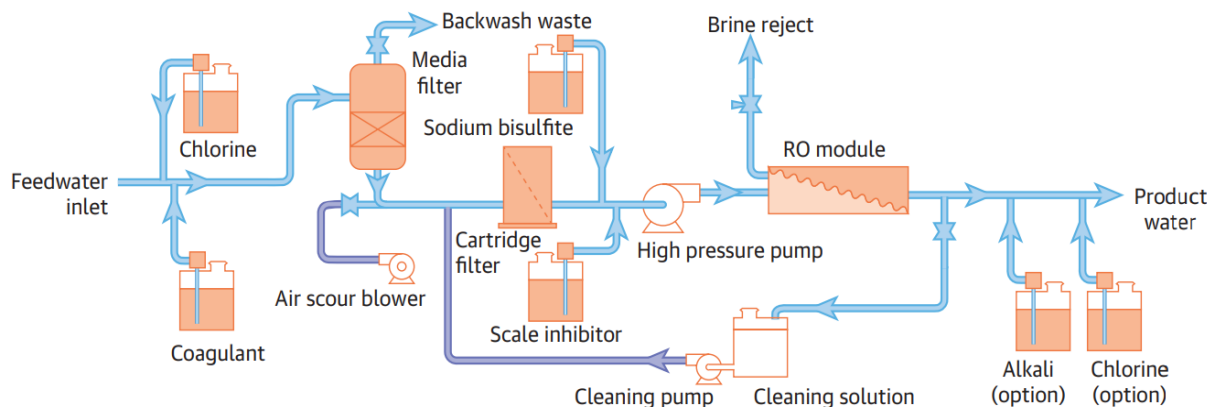


Рис. 3. Схема технологічного процесу зворотного осмосу [17]

Fig. 3. A schema of the technological process of reverse osmosis [17]

Завдяки селективним властивостям мембран RO опріснена вода проходить через них, а іони розчинених солей залишаються. Мембрани RO виготовляються переважно у вигляді порожнинних волокон, рулонів або плоскокамерних мембранних елементів. Через мікропори цих мембран можуть вільно проникати невеликі молекули води, тоді як більші іони солі та інші домішки затримуються мембраною. Установки зворотного осмосу дуже чутливі до якості живильної води (солоність, каламутність, температура). Висока каламутність може спричинити засмічення та закупорювання пор мембран зваженими речовинами. Морська вода, яка підходить для опріснення системами зворотного осмосу, може містити до 45 000 проміле вмісту розчинених твердих речовин. Тому перед опрісненням методом зворотного осмосу необхідна відповідна попередня очистка живильної води від домішок та забруднень різної дисперсності та природи. Після видалення грубих (механічних) домішок різними способами необхідне очищення води від тонких (завислих) та колоїдних забруднень. Ця стадія очистки відбувається з використанням відстоювання, хлорування, підкислення, введення коагулянтів або флокулянтів. На стадії попередньої очистки найбільші труднощі пов'язані з морськими водоростями та бактеріями, тому в воду додають хлор, мідний купорос або гідросульфід натрію. Для порожнинно-волоконних та рулонних мембран після попереднього хлорування і підкислення в воду вводять коагулянт (сульфат-хлорид заліза), виконують відстоювання і фільтрування через двохшаровий фільтр (кварцовий пісок / антрацит), дозування гідросульфату натрію і гексаметафосфату натрію, фільтрування через шар активованого

вугілля, дозування сірчаної кислоти. В разі застосування мембран з поліаміду, який відносно легко окислюється хлором, здійснюють старанну очистку води від його залишків. Реалізація процесу попередньої обробки живильної води значною мірою впливає на собівартість опрісненої води.

Електродіаліз (ED) – це ще один мембранний процес, який використовує електричну енергію для опріснення води [18]. Вода переміщується через пару електронних мембран з різними електричними потенціалами, внаслідок чого позитивні й негативні іони солей притягуються до відповідних електродів, опріснюючи живильну воду (рис. 4).

Питомі витрати електроенергії для мембранного опріснення значною мірою залежать від концентрації солі в живильній воді. Питомі витрати електроенергії на ED менші, ніж на RO при концентрації солей до 5000 проміле. Тому на цей час ED широко використовується для опріснення солонуватої води, а не морської.

Гібридне застосування технологічних схем опріснення морської води. Концепція гібридного опріснення полягає в поєднанні двох або більше технологічних процесів з метою забезпечення менших питомих значень витрат енергії та вартості прісної води, ніж може забезпечити кожен з них окремо. Наведений нижче аналіз виконано за результатами семінару, проведеного в Массачусетському технологічному інституті у співпраці з Глобальним альянсом з опріснення чистої води 17-18 жовтня 2016 року [19].

Перші пропозиції щодо гібридного опріснення ґрунтувалися на усуненні необхідності другого проходження процесу зворотного осмосу, щоб воду з вищою мінералізацією можна було поєднувати з продуктом кращої

якості, отриманим за технологією багатоступеневого швидкого опріснення (MSF), або багаторазової дистиляції (MED). Це найпростіше застосування. На сьогодні реалізуються й інші гібридні схеми.

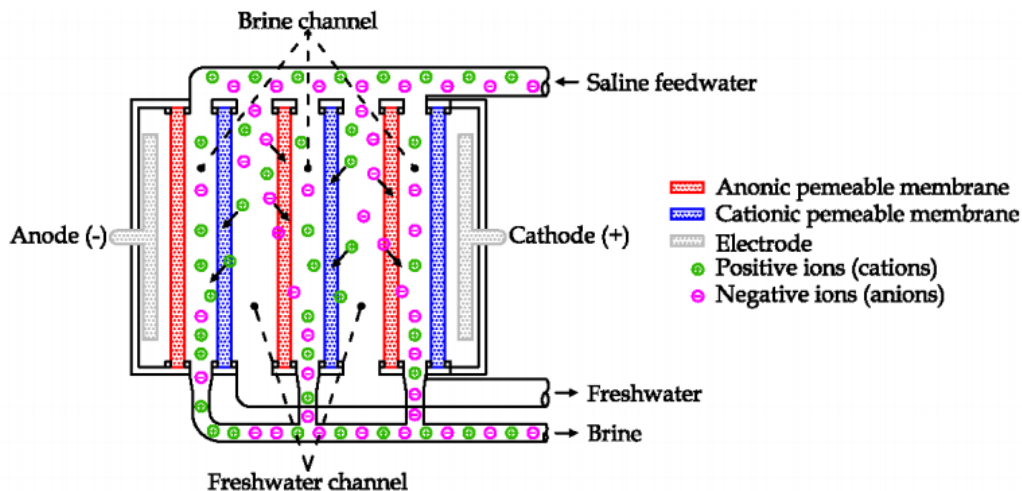


Рис. 4. Принцип роботи електродіалітичної опріснювальної установки [15]

Fig. 4. The working principle of an Electrodialysis desalination unit [15]

Гібридні опріснювальні установки використовують теплову енергію пари низького тиску для процесів MSF та MED дистиляції, а також електроенергію – для технології зворотного осмосу (RO) та механічного стиснення пари. Поєднання двох (трьох) технологій забезпечує значну економію витрат на енергію порівняно з варіантом, що передбачає лише дистиляцію.

При реалізації гібридного опріснювального процесу MSF/RO або MED/RO можливі такі переваги:

- зменшується забір морської води;
- можливо використовувати однопровідний процес RO;
- змішування дистиляції з мембранними продуктами знижує вимоги до видалення бору методом RO;
- термін служби мембрани RO подовжується.
- температура води, що подається на установку RO, оптимізується і контролюється за допомогою охолоджувальної води з секції відведення тепла конденсатора MSF/MED або конденсатора електростанції;
- пара низького тиску з установки MSF/MED використовується для деаерації або застосування деаерованого розсолу як живильної води для установки RO, щоб мінімізувати корозію та зменшити залишковий хлор;
- деякі компоненти процесу попереднього очищення морської води можуть бути інтегровані;
- використовується одна система очищення для стічних вод обох технологій;
- розсіл з установки RO повторно використовується в MSF або MED;

- застосування нанофільтрації (NF) як пом'якшувального мембранного процесу для живлення дистиляційних установок MSF і MED може сприяти значному поліпшенню продуктивності.

Гібридне застосування технологічних схем дозволяє використовувати частину нагрітого відпрацьованого теплоносія дистиляційної установки як сировину для установки RO. Вища температура подачі покращує продуктивність мембрани (потік при постійному тиску збільшується на 1,5–3 % на кожен градус Цельсія). Це дуже важливо взимку, коли температура морської води знижується, оскільки тепліша морська вода зменшує споживання енергії та хімікатів і подовжує термін служби мембран RO. Для варіанту «класичної гібридної схеми» відпрацьований розсіл установки RO стає сировиною для установки MSF або MED, особливо якщо морська вода пом'якшується нанофільтраційною мембраною. Коефіцієнт відновлення води гібридної установки значно збільшується. Застосування технології пом'якшення нанофільтраційної мембрани в поєднанні з дистиляцією та гібридними варіантами NF-MSF-RO або NF-MED-RO надає нові можливості для вдосконалення гібридних систем. Використання відходів теплоносія дистиляційних установок як сировини для установки RO в межах вибраних гібридних схем зменшує потреби в морській воді, розсолі та відходах теплоносія порівняно з негібридними, окремими автономними тепловими установками та установками RO.

Для всіх мембран водопроникність (тобто виробництво пермеату) знижується в процесі експлуатації, тоді як солоність продукту і концентрація хлоридів зростають. Зменшення продуктивності з часом можна компенсувати, встановивши додаткові мембрани. Підвищення

солоності продукту не може бути компенсоване, окрім як масштабною заміною мембран. Для гібридних систем (зворотний осмос + дистиляція) можна використовувати однопрохідну систему зворотного осмосу, зберігаючи при цьому тривалий термін служби мембрани. Це стає можливим завдяки змішуванню води продукту зворотного осмосу з дистильованою водою високої чистоти, що виробляється на установці термічного опріснення.

Мембранна технологія пом'якшення NF може значно покращити експлуатацію та знизити вартість процесу MED, усунувши ризик утворення накипу та засмічення. Технологія NF дозволить підвищити верхню температуру, що приведе до значного збільшення продуктивності та коефіцієнта корисної дії. Процес MED працює при температурі верхнього розсолу лише від 64 до 75 °C, залежно від солоності морської води, щоб уникнути відкладення накипу на поверхнях теплопередачі. Процес NF видаляє всі сульфати, розчинені в живильній воді, що дозволяє експлуатувати MED при максимальній температурі розсолу майже 80 °C без проблем з відкладенням накипу.

Існує багато потенційних варіантів гібридизації NF з NF-MED-RO. Одним з варіантів є попереднє нагрівання морської води в секції відходів MSF або MED, а потім її пом'якшення за допомогою нанофільтраційної мембрани з подальшим проходженням через RO. Відпрацьований розсіл RO має значно знижений рівень іонів сульфату, кальцію та магнію, що утворюють накип, і тому він може бути сировиною для дистиляційної установки.

Витрати на постачання морської води, попередню обробку і відведення розсолу доволі високі (довгі лінії забору і відведення, велика потреба в насосній потужності, висока каламутність морської води тощо), тому вони є важливою складовою собівартості опрісненої води разом з вартістю енергії та капітальними затратами.

Передові досягнення з реалізації технологій опріснення морської води в промислових масштабах. Виробництво прісної води з морської стало обов'язковим для багатьох економік світу. На сьогодні введено в експлуатацію близько 21 000 опріснювальних заводів та установок, здатних продукувати до 99 млн кубічних метрів прісної води щодня [20, 21]. Ці заводи є стратегічними не лише для повсякденного життя людей, але і для промислової діяльності. У країнах Близького Сходу споруджено найбільші в світі опріснювальні заводи, характеристики першої десятки яких висвітлені нижче станом на кінець 2023 року.

1. Опріснювальний завод Jebel Ali, UAE (проектне виробництво прісної води на добу 2 227 587 м³/добу) [22, 23] складається з дев'яти окремих модулів, які простягаються на три кілометри вздовж узбережжя Перської затоки і є найбільшим за продуктивністю опріснювальним заводом у світі. Спочатку завод був введений в експлуатацію в 2013 році з продуктивністю 640 000 м³ води на добу, але після завершення модернізації 2022 року продуктивність зросла до поточного значення. Виробничі технології, які використовуються в Jebel Ali, складаються з 87 % багатоступеневої флеш-дистиляції (MSF), а решта 13 % – це зворотний осмос (RO).
2. Опріснювальний завод Ras Al Khair, Saudi Arabia (1 036 000 м³/добу) [24, 25], розташований за 75 км на північний захід від Джубайля. Загальна структура заводу складається з восьми модулів багатоступеневої флеш-дистиляції (MSF) і 17 модулів зворотного осмосу (RO). Модулі MSF виробляють 70 % добової продукції, а модулі RO – решту 30 %.
3. Опріснювальний завод Taweelah, UAE (909 201 м³/добу) [26], розташований у місті Та-віла, Абу-Дабі. На сьогодні Taweelah є найбільшим у світі заводом зі 100%-м опрісненням води за допомогою зворотного осмосу та ціною прісної води 0,49 дол. США за кубічний метр.
4. Опріснювальний завод Shuaiba, Saudi Arabia (880 000 м³/добу) [27, 28], розташований за 120 км на південь від міста Джидди в Саудівській Аравії. Використовується 100%-ва багатоступенева флеш-дистиляція (MSF) опріснення води. У межах зеленої ініціативи реалізуються плани заміни до 2025 року термальної технології на зворотний осмос.
5. Опріснювальний завод Marafiq IWPP, Jubail, Saudi Arabia (800 000 м³/добу) [29], являє собою комплекс у складі 16 газових турбін GE з потужністю близько 2700 МВт і 27 опріснювальних установок виробництва SIDEM, які виробляють 800 000 м³/добу опрісненої води. Використовується технологія багаторазової дистиляції (MED).
6. Опріснювальний завод Umm Al Quwain, UAE (682 000 м³/добу) [30], розташований в еміраті Умм-аль-Кувейн, перебуває на завершальній стадії введення в експлуатацію, використовується технологія 100%-го зворотного осмосу (RO), вартість проєкту – 797 млн доларів США.
7. Опріснювальний завод Sorek, Israel (624 000 м³/добу) [31], є найбільшим в Ізраїлі опріснювальним заводом і одним з найбільших заводів 100%-го зворотного осмосу (RO) на планеті. Розташований за 15 км на південь від Тель-Авіва поблизу узбережжя Середземного моря. Введений в експлуатацію 2013 року. Вперше у світі опріснювальний завод Sorek використовує вертикальне розташування модулів зворотного осмосу діаметром 16 дюймів замість більш поширених горизонтально розташованих модулів діаметром 8 дюймів. Будівництво та введення в експлуатацію заводу коштувало близько 500 млн доларів США.
8. Опріснювальний завод Jubail 3a IWP, Saudi Arabia (600 000 м³/добу) [32], побудований 2022 року, використовується технологія зворотного осмосу (RO). Інвестиційна вартість оцінена в 650 млн доларів США.

9. Опріснювальний завод Rabigh 3 IWP, Saudi Arabia (600 000 м³/добу) [33], введено в експлуатацію 2021 року, використовується технологія зворотного осмосу (RO).
10. Опріснювальний завод Fujairah 2, UAE (586 500 м³/добу) [34]. Застосовується технологія багаторазової дистиляції (MED) для виробництва 450 000 м³ води на добу й технологія зворотного осмосу (RO) для виробництва 136 500 м³ прісної води на добу.

Передові досягнення з реалізації технологій опріснення солонуватої води в промислових масштабах.

Аналіз сучасного стану реалізації технологій опріснення солонуватої води виконано на прикладі США, де зосереджено найбільші обсяги виробництва. Використовувалась інформація фінансового вебсайту InsiderMonkey [35] та результати досліджень лабораторії APMResearchLab, яка являє собою консалтингову компанію і є підрозділом AmericanPublicMediaGroup [36].

У Сполучених Штатах набагато більше прісної води, ніж у багатьох інших країнах світу, проте все одно існують проблеми з водою, оскільки населення зростає, навколишнє середовище змінюється, а економіка продовжує розвиватися. За інформацією офісу Міністерства енергетики (DOE), однією з цілей діяльності в цій галузі є «запуск технологій опріснення, які забезпечують конкурентоспроможну чисту воду» в деяких регіонах країни. Хоча опріснювальні заводи можуть бути не надто економічно конкурентоспроможними, для багатьох штатів та міст існують передумови для їх спорудження, зумовлені дозвільними та інженерними проблемами будівництва довгих трубопроводів для транспортування прісної води з багатих на воду регіонів. Згідно з аналізом даних Тихоокеанського інституту, проведеним дослідницькою лабораторією APMResearchLab, приблизна вартість опрісненої морської води в Каліфорнії в 2015 році становила від 1900 до 4100 доларів США за акр-фут води, а вартість опріснення солонуватої води коливалася від 840 до 1700 доларів за акр-фут води. Вартість збору води зливових стоків коливалася від 230 до 1300 доларів США за акр-фут води (акровий фут – кількість води, необхідна, щоб покрити один акр глибиною в один фут).

Відповідно до оновленого огляду муніципальних опріснювальних заводів США, опублікованого в грудні 2018 року, у Флориді було 167 заводів, у Каліфорнії – 58, а в Техасі – 52. За результатами досліджень APMResearchLab, десятка найпотужніших заводів наведена нижче. Продуктивність заводів зазначена в галонах для рідини (1 американський рідинний галон дорівнює 3,78541 л).

1. Опріснювальний завод Claude «Bud» Lewis Carlsbad (50 млн галонів/добу). Використовується технологія зворотного осмосу морської води. Завод розташований у штаті Каліфорнія в 60 милях на південь від м. Гантінгтон-Біч і забезпечує понад 7 % води в регіоні Сан-Дієго. Вартість заводу близько 1 млрд доларів.
2. Завод пом'якшення води Boca Raton Membrane Softening Plant (40 млн. галонів/добу). Використо-

вується мембранна нанофільтрація для виробництва питної води. Завод розташований у Флориді та є основним постачальником води для м. Бока-Ратон.

3. Hollywood – нанофільтраційний водоочисний завод (36 млн галонів/добу). Завод розташований у Флориді та використовує нанофільтрацію для виробництва питної води.
4. Водоочисний завод № 3 округу Палм-Біч (28 млн галонів/добу), розташований у Флориді та використовує нанофільтрацію для виробництва питної води.
5. Опріснювальний завод Kay Bailey Hutchison (27,5 млн галонів/добу), виробляє питну воду шляхом зворотного осмосу солонуватої води. Розташований у Техасі, відкритий 2007 року для боротьби з посухою, надзвичайними ситуаціями, а також збільшенням використання солонуватої води. Завод запрацював на повну потужність у травні 2012 року.
6. Завод з опріснення морської води Tamra Bay (23 млн галонів/добу), використовує зворотний осмос морської води для виробництва питної води. Завод введений в експлуатацію 2007 року й забезпечує до 10 % потреб регіону Тампа-Бей.
7. Завод у місті Порт-Сент-Люїс (22,5 млн галонів/добу), розташований у Флориді та виготовляє питну воду за допомогою зворотного осмосу солонуватих вод.
8. Опріснювальний завод Yuma Desalting Plant (22 млн. галонів/доба), розташований в Юмі, штат Арізона, виробляє питну воду за допомогою зворотного осмосу солонуватої води.
9. Опріснювальний завод Miami Dade WRP (21 млн галонів/добу), розташований у Флориді та виготовляє прісну воду за допомогою зворотного осмосу солонуватих вод.
10. Опріснювальний завод North Collier County, FL (20 млн галонів/добу), виробляє питну воду за допомогою зворотного осмосу солонуватої води.

За інформацією фінансового вебсайту Insider Monkey [35], індустрія опріснення води в Сполучених Штатах все ще розвивається, і в цій галузі працює дуже мало публічних компаній. Ті, що котируються на NYSE або NASDAQ, отримують більшу частину своїх доходів з інших галузей. Проте потенційно є п'ять компаній, які могли б отримати вигоду від подальшого розвитку індустрії опріснення через очікувано менші витрати, або в разі збільшення попиту на воду. Короткі характеристики компаній наведено нижче.

Brookfield Infrastructure Partners L.P. (NYSE: BIP) є одним із найбільших власників і операторів глобальних інфраструктурних мереж, а також материнською компанією Poseidon Water, яка керує опріснювальним заводом імені Клода «Бада» Льюїса в Карлсбаді, що виробляє 50 млн галонів води на день. Якщо витрати в галузі знизяться, то Poseidon Water потенційно може створити

більше опріснювальних заводів і Brookfield Infrastructure Partners L.P може отримати вигоду.

Edison International (NYSE: EIX) керує опріснювальним заводом на острові Каталіна і може отримати вигоду, якщо витрати на обслуговування заводу зменшаться. Edison International є однією з найбільших електричних компаній Сполучених Штатів і отримує значну частину свого доходу від виробництва та передачі енергії.

Energy Recovery, Inc. (NASDAQ: ERII) розробляє технології, які вирішують складні проблеми для ринків промислових рідинних потоків у всьому світі, причому основним продуктом компанії є технологія PX, що використовується також для опріснення.

General Electric Company (NYSE: GE) – промисловий конгломерат, який також виробляє обладнання для очищення води. Компанія працює в багатьох галузях промисловості, і її прибутки не сильно залежать від галузі опріснення води, проте вона може виграти від підвищення попиту на опріснену воду.

Ecolab Inc. (NYSE: ECL) є світовим лідером у сфері водопостачання, гігієни та рішень для запобігання інфекціям. Компанія працює у більш ніж 40 галузях промисловості, включно з індустрією опріснення води. Однією з дочірніх компаній Ecolab Inc. є Aquatech International, яка належить до найбільших опріснювальних компаній у світі.

Основні тенденції та індикатори розвитку промислових технологій опріснення води. Вони достатньо повно висвітлені в звітах Міжнародного банку реконструкції та розвитку [37], авторитетної консалтингової фірми Fortune Business Insights™ [38], всесвітньої організації з дослідження ринку та консалтингу Polaris Market Research [39, 40]. Стислий аналіз результатів зазначених досліджень наведено нижче.

Ретроспективний аналіз становлення та рангування промислових технологій опріснення до 2014 року наведено на рис. 5.

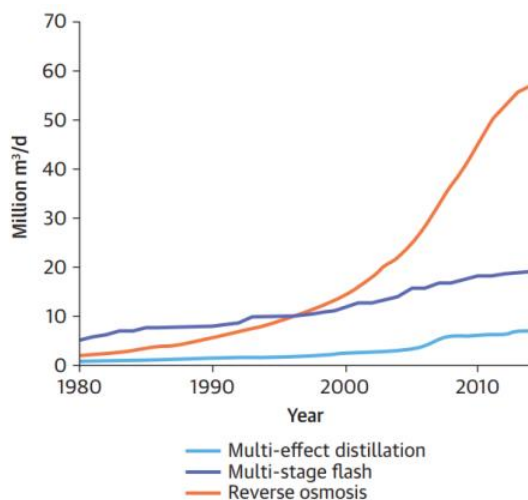


Рис. 5. Світові обсяги опріснення за технологіями [37]

Fig. 5. World volumes of desalination by technologies [37]

Багатостадійне швидке випаровування (MSF) було світовим лідером з опріснення морської води до того, як технологія зворотного осмосу з'явилася на ринку. Технологія MSF функціонує з використанням викопного палива, переважно природного газу та вугілля. Здебільшого утилізується теплова складова енергії на електростанціях. Коефіцієнт відновлення води становить 10–20 %. Обсяги опріснення шляхом застосування багаторазової дистиляції (MED) поступаються технології MSF, але невпинно зростають. Коефіцієнт відновлення води процесу MED сягає 20–30 %. Обидві технології використовують процес випаровування. Солона вода проходить поступово через низку камер з дедалі нижчим тиском. Електроенергія використовується для транспортування води, пари та розсолу. Тривалий час технологія MSF була більш конкурентно спроможною в порівнянні з МЕД для великих проєктів, що зумовило досягнення більших обсягів виробництва опрісненої води (рис. 5). Проте на сьогодні MED стає дедалі конкурентоспроможною в сім масштабах виробництва. Обидві технології мало чутливі до якості живильної води (температура, біоброшення, каламутність, органічні домішки, цвітіння водоростей), але потребують застосування засобів проти накипу.

Для технології RO якість живильної води має значний вплив на вартість виробленої води, продуктивність і довговічність мембран. Заводи SWRO чутливі до солоності й температури морської води, вмісту бору та біоброшення мембран. Вища солоність, температура і рівень біоброшення збільшують капітальні вкладення та експлуатаційні витрати опріснювального заводу через необхідність значної попередньої обробки живильної води (рис. 3). Але значний прогрес в створенні та вдосконаленні мембран сприяв виведенню цієї технології на лідерські позиції з обсягів виробництва опрісненої води (рис. 5). Технологія зворотного осмосу, коефіцієнт відновлення води якої 30–50 % відсотків, завоювала панівне становище на ринку з 2000 року. Вона працює лише на електроенергії, яка також виробляється з використанням викопного палива. Проте енергоємність опрісненої води значно менша, якщо порівнювати застосування технології RO і технологій MSF та MED. Хотілося б сподіватися, що використання енергії відновлюваних джерел для зазначених вище технологічних процесів опріснення морської води дасть можливість отримувати «чисту» воду в промислових масштабах.

Після 2000 року промислове застосування знаходять гібридні конфігурації завдяки меншому питомому споживанню енергії. Впровадження комбінацій RO-MSF і RO-MED на опріснювальних заводах Рас Аль-Хайр в Саудівській Аравії, Фуджейра I і II в ОАЕ та інших показало здійсненість гібридних систем у великих масштабах.

Світова динаміка щорічного приросту та кумулятивна залежність обсягів опріснення показана на рис. 6. Бум приросту спостерігався в 2004–2014 роки. Зокрема, в Європі на сьогодні продукується понад 9,2 млн кубометрів опрісненої води щодня, що становить близько 10 % загальної світової потужності. Розподіл сучасного світового ринку обсягів опріснення за технологіями наведено на рис. 7.

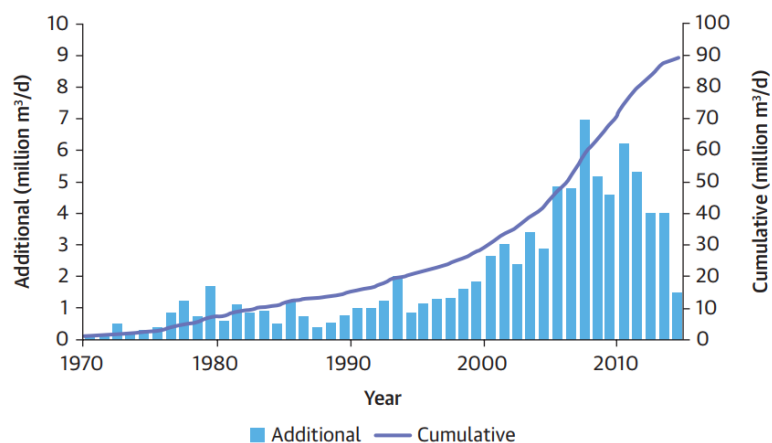


Рис. 6. Динаміка світового обсягу опріснення та його щорічного приросту [37]

Fig. 6. Dynamics of the global volume of desalination and its annual growth [37]

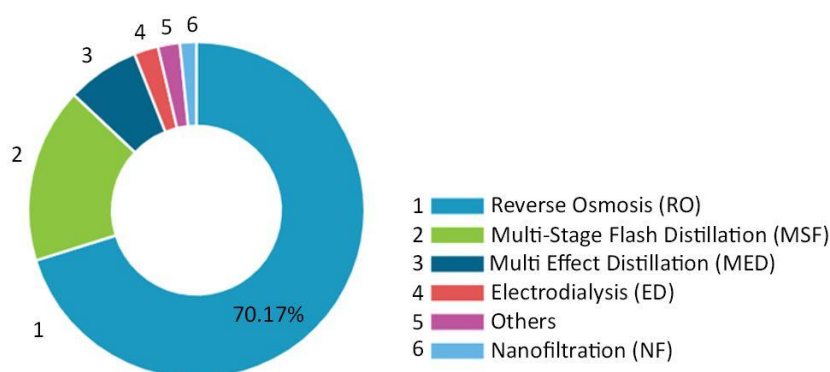


Рис. 7. Сучасний світовий ринок обсягів опріснення за технологіями, 2023 [38]

Fig. 7. Modern world market of desalination volumes by technology, 2023 [38]

Згідно з дослідженнями Fortune Business Insights, у 2023 році розмір ринку опріснення становив 23,77 млрд доларів США. Очікується, що ринок зростатиме на 8,63 % щорічно і до 2032 року досягне 49,80 млрд доларів. До основних учасників ринку обладнання можна віднести такі фірми та корпорації: Acciona, Ampac, Aquatech International LLC, Biwater Holdings Limited., BWT Holding GmbH, Cadagua, Degremont, Doosan Heavy Industries & Construction Co., Ltd, DuPont, General Electric Company, Genesis Water Technologies, Guangzhou KangYang Seawater Desalination Equipment Co., Ltd. (KYSEARO), IDE Technologies, Koch Separation Solutions (KSS), Lenntech, SUEZ, Veolia, Xylem [39, 40].

Аналіз питомих витрат коштів на виробництво опрісненої води залежно від технології та місця розташування заводу наведено в звіті Міжнародного банку реконструкції та розвитку [37] і висвітлено в табл. 1. Отримані результати ґрунтуються на дослідженні показників понад 50 опріснювальних проєктів в усьому світі, реалізованих протягом останніх двох десятиліть до 2016 року.

У переважній більшості випадків технологія MSF використовується як складова об'єднаного проєкту водопостачання та електроенергії, коли утилізується теплова енергія електростанції. Питома вартість опрісненої води значною мірою визначається масштабом виробництва і становить 1,02–1,74 долара США за кубічний метр. Якщо

потужність заводу менша, опріснена вода коштує дорожче. Тому потужні заводи MSF виявилися конкурентоспроможними поряд з MED, а в окремих випадках з SWRO. Цінові межі вартості виробництва опрісненої води з застосуванням інших технологій наведено в табл. 1. Як зазначено вище в цій статті, після 2020 року побудовано новітні опріснювальні заводи значної потужності, на яких досягнуто рекордних значень продуктивності промислових технологій: MSF – 1 938 000 м³ на добу, MED – 800 000 м³ на добу, RO – 909 201 м³ на добу за ціною прісної води 0,49 долара США за 1 м³. Тренд зміни вартості опрісненої води в процесі реалізацій промислових технологій наведено на рис. 8.

Капіталоємність проєкту опріснення, експлуатація і технічне обслуговування (O&M) та загальні витрати на виробництво води залежать також від виду джерела енергії та ціни на енергоносії. Заводи MSF більш капіталомісткі, ніж заводи SWRO, для яких витрати на відновлення капіталу за 25-річний термін експлуатації з п'ятивідсотковою ставкою можуть становити майже половину собівартості виробництва води (табл. 2). Проте поточні витрати для заводів SWRO на одиницю продукції вдвічі більші, ніж на заводах MSF і майже втричі більші, ніж у MED. Значну складову вартості опрісненої води становлять також витрати на енергію (табл. 2).

Таблиця 1. Узагальнені питомі витрати на опріснення води [37]

Table 1. Generalized specific costs of water desalination [37]

Desalination method	Capital costs (million US\$/MLD)		O&M costs (US\$/m ³)		Cost of water production (US\$/m ³)	
	Range	Average	Range	Average	Range	Average
MSF	1.7-3.1	2.1	0.22-0.30	0.26	1.02-1.74	1.44
MED-TVC	1.2-2.3	1.4	0.11-0.25	0.14	1.12-1.50	1.39
SWRO Mediterranean Sea	0.8-2.2	1.2	0.25-0.74	0.35	0.64-1.62	0.98
SWRO Arabian Gulf	1.2-1.8	1.5	0.36-1.01	0.64	0.96-1.92	1.35
SWRO Red Sea	1.2-2.3	1.5	0.41-0.96	0.51	1.14-1.70	1.38
SWRO Atlantic and Pacific oceans	1.3-7.6	4.1	0.17-0.41	0.21	0.88-2.86	1.82
Hybrid	MSF/MED	1.5-2.2	0.14-0.25	0.23	0.95-1.37	1.15
	SWRO	1.2-2.4	0.29-0.44	0.35	0.85-1.12	1.03

Note: Costs are at 2016 values. MED-TVC = multiple effect distillation with thermal vapor compression; MLD = million liters per day; MSF = multistage flash distillation; O&M = operation and maintenance; SWRO = seawater reverse osmosis.

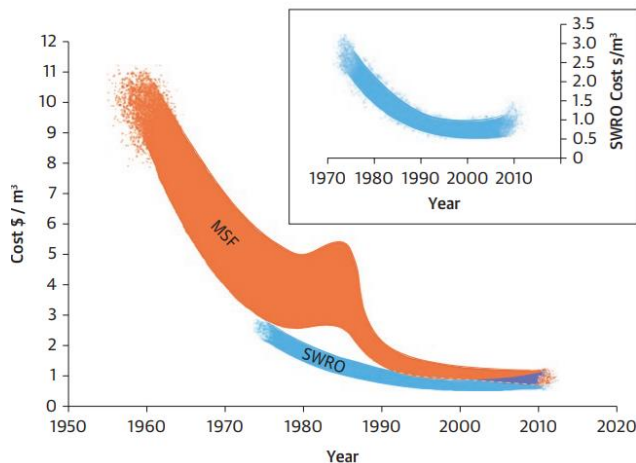


Рис. 8. Тренд зміни вартості опрісненої води [37]

Fig. 8. The trend of changes in the cost of desalinated water [37]

Споживання викопного палива для опріснення води супроводжується значними викидами парникових газів, що з погляду положень Паризької кліматичної угоди [41] спонукає до використання енергії відновлюваних джерел [17, 42–44]. Проте через мінливість потужності вітро- та фотоустановок на короткотривалих інтервалах часу та існує більша потреба в застосуванні систем накопичення енергії для реалізації функціонування опріснювальних заводів з номінальною потужністю в режимі utility-scale [37]. Наявність систем накопичення в технологічній схемі енергоживлення збільшує вартість опрісненої води, що обмежує на сьогодні сферу використання відновлюваних джерел лише малими установками для опріснення, розташованими у віддалених від потужних енергомереж місцях. Збільшення ціни на викопні енергоресурси та вартості заходів боротьби з викидами є підставою для реалізації конкурентоспроможної інтеграції енергії відновлюваних джерел у технологічні схеми опріснення води в промислових масштабах.

Таблиця 2. Узагальнені питомі витрати технології SWRO [37]

Table 2. Generalized specific costs of technology SWRO [37]

Cost item	US\$/m ³	Percentage of total
→ Variable costs	0.30	42
Energy	0.22	30
Chemicals	0.02	3
Replacement of RO membranes and cartridge filters	0.04	6
Waste stream disposal	0.02	3
→ Fixed costs	0.42	58
Capital recovery costs	0.32	44
Labor	0.02	3
Maintenance	0.03	4
Environmental and performance monitoring	0.01	1
Other O&M costs	0.04	6
→ Total costs	0.72	100

Участь України в реалізації європейської програми «2×40 GW Green Hydrogen Initiative» передбачає енергоживлення 10 ГВт потужностей електролізерів для виробництва зеленого водню від офшорних вітроелектростанцій (ВЕС) та прибережних фотоелектростанцій (ФЕС) із загальною встановленою потужністю на рівні 40 ГВт [45, 46]. Один з альтернативних варіантів постачання прісної води для функціонування електролізерів у цьому проєкті полягає у використанні опрісненої морської води, отриманої також з використанням енергії ВЕС та ФЕС. Проте зазначена потужність відновлюваних джерел енергії надто велика для сумісної паралельної роботи з електросистемою країни, що спонукає до визначення шляхів безпосередньої інтеграції стохастичного надходження електроенер-

гії ВЕС та ФЕС в технологічні схеми виробництва водню та опріснення морської води. Потрібен пошук та реалізація ефективного компромісу між випадковим характером генерування потужності відновлюваними джерелами та стабільною потребою в енергії компонентів опріснювальної схеми.

В Інституті відновлюваної енергетики НАН України проводяться дослідження стохастичної структури зміни швидкості вітру та динаміки процесів генерування потужності ВЕС [47–49], визначаються ймовірнісні характеристики ВЕС та ФЕС як джерел енергії в Азово-Чорноморському регіоні України [50, 51], пропонуються схемотехнічні рішення гідроакумулювальних станцій морського базування [52] з метою інтеграції відновлюваної енергії в технологічні схеми опріснення морської води. Передбачається, що розроблення проектних рішень з використанням ВЕС та ФЕС як джерела енергії для опріснення води в промислових масштабах потребуватиме детальної техніко-економічної оптимізації всього технологічного комплексу, включно з акумулюванням енергії та води, системами керування режимами роботи.

Висновки

1. Світові обсяги виробництва опрісненої води, станом на кінець 2023 року, сягають 99 млн кубічних метрів прісної води щодоби. В Європі продукується понад 9,2 млн кубічних метрів опрісненої води щодоби, тобто близько 10 % загальної світової потужності. Після 2020 року побудовано новітні опріснювальні заводи значної потужності, на яких досягнуто рекордних значень продуктивності промислових технологій: MSF – 1 938 000 м³ за добу, MED – 800 000 м³ за добу, RO – 909 201 м³ за добу.

2. Розподіл світових обсягів виробництва опрісненої води за технологіями, станом на кінець 2023 року, такий: зворотний осмос (RO) – 70 %, багатостадійне випаровування (MSF) – 15 %, багаторазова дистиляція (MED) – 7 %, електродіаліз (ED) – 3 %, нанофільтрація (NF) – 2 %, інші – 3 %.

3. Основними чинниками витрат на опріснення води є взаємопов'язані фактори вибору технології, розміру заводу та місця його розташування, потреби у воді та електроенергії, режими екологічного регулювання стосовно викидів, утилізація розсолу, доцільне проектне рішення. Питома вартість промислового виробництва опрісненої води становить 1,02–1,74 долара США за кубічний метр. Для найвдалішого проекту досягнуто значення 0,5 долара США за кубічний метр.

4. Ринок опріснення у 2023 році становив 23,77 млрд доларів США. За прогнозами провідних дослідницьких, консалтингових та фінансових організацій очікується, що до 2032 року ринок зростатиме на 8,63 % щорічно і досягне 49,80 млрд доларів США.

5. До основних учасників ринку обладнання можна віднести такі фірми та корпорації: Acciona, Ampac, Aquatech

International LLC, Biwater Holdings Limited, BWT Holding GmbH, Cadagua, Degremont, Doosan Heavy Industries & Construction Co., Ltd, DuPont, General Electric Company, Genesis Water Technologies, Guangzhou KangYang Seawater Desalination Equipment Co., Ltd (KYSEARO), IDE Technologies, Koch Separation Solutions (KSS), Lenntech, SUEZ, Veolia, Xylem.

6. Споживання викопного палива для опріснення води супроводжується значними викидами парникових газів, що з погляду положень Паризької кліматичної угоди спонукає до використання енергії відновлюваних джерел. Проте через мінливість потужності вітро- та фотоустановок на короткотривалих інтервалах часу та існує більша потреба в застосуванні систем накопичення енергії у складі опріснювальних заводів, що збільшує вартість опрісненої води і обмежує на сьогодні сферу використання відновлюваних джерел лише малими установками для опріснення, розташованими у віддалених від потужних енергомереж місцях. Збільшення ціни на викопні енергоресурси та вартості заходів боротьби з викидами є підставою для створення конкурентоспроможної інтеграції енергії відновлюваних джерел в технологічні схеми опріснення води в промислових масштабах.

7. Актуальність задачі опріснення води в промислових масштабах в Україні зумовлена насамперед необхідністю підготовки прісної води для електролізного виробництва зеленого водню відповідно до участі країни в реалізації європейської програми «2x40 GW Green Hydrogen Initiative», якою передбачається спорудження на території України 10 ГВт потужностей електролізерів для виробництва зеленого водню в обсязі 1,65 млн т на рік, що потребуватиме споживання підготовленої прісної води не менше 24 млн м³/рік. Один з альтернативних варіантів постачання прісної води для функціонування електролізерів у цьому проєкті полягає у використанні опрісненої морської води, отриманої з використанням енергії вітро- та фотоелектричних станцій, що потребуватиме пошуку та реалізації ефективного компромісу між випадковим характером генерування потужності відновлюваними джерелами та стабільною потребою в енергії компонентів опріснювальної схеми. Реалізація успішної інтеграції електроенергії вітро- та фотоелектричних станцій в технологічні схеми опріснення води потребуватиме проведення детальної техніко-економічної оптимізації всього технологічного комплексу з урахуванням акумулювання енергії та води, системи керування режимами роботи.

ПОСИЛАННЯ

- https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Tezy_2024_Publication.pdf
- Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2022 р. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. Київ. 2023. 397 с. [Дата звернення – 04.07.2024].

3. Ad van Wijk, Jorgo Chatzimarkakis. Green Hydrogen for a European Green Deal A 2x40 GW Initiative. Brussels: Hydrogen Europe. 40p. https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2021/11/Hydrogen-Europe_2x40-GW-Green-H2-Initiative-Paper.pdf
4. Memorandum of understanding between the European Union and Ukraine on a Strategic Partnership on Biomethane, Hydrogen and other Synthetic Gases. 02.02.2023. P. 8. https://energy.ec.europa.eu/memorandum-understanding-between-european-union-and-ukraine-strategic-partnership-biomethane_en [Дата звернення – 04.07.2024].
5. Philip Woods, Heriberto Bustamante, Kondo-Francois Aguey-Zinsou. The hydrogen economy – Where is the water? Energy Nexus. Vol. 7. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100123>
6. Хорольський А. О., Лапко В. В., Саллі В. С., Мамайкін О. Р. Вибір технології демінералізації стічних вод, як складової технологічних потоків вугільних шахт. Збірник наукових праць НГУ. 2020. № 3. С. 61–73. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/63.061>
7. Салєєв І.А. Опріснення шахтних вод при закритті шахти ім. М.І. Сташкова ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля». Збірник наукових праць НГУ. 2021. № 66. С. 81–93. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/66.081>
8. Єлатонцев Д. О., Мухачев А. П. Перспективи отримання опрісненої води з вод вугільних шахт із одночасною утилізацією шахтного метану / Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти» (25-26 листопада 2021 р., м. Київ, Україна). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2021. С. 124–126. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/46891/1/Pure_water_2021-124-126.pdf
9. Kulikova D. V. Development of a resource-saving technology for integrated processing of highly mineralized mine water in the enterprises of the Kryvyi Rih iron ore basin. Екологічні науки. 2022. № 5(44). С. 158–162. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.23>
10. Hisham T. El-Dessouky, Hisham M. Ettouney. Fundamentals of Salt Water Desalination, Elsevier. 2002. P. 670/
11. Wetterau G., Moch I., Frenkel V., Huehmer R., Hunt H., Kiefer K., Pankratz T., Sethi S., Silverman G., Trussel S. et al. Desalination of Seawater. AWWA M61-2011. 1st ed.; American Water Works Association: Denver, CO, USA. 2011. 104 p. <https://webstore.ansi.org/Standards/AWWA/AWWAM612011?source=preview>
12. Lior N. Advances in Water Desalination / N. Lior, Ed. John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA 2012. 712 p. ISBN 9781118347737.
13. Voutchkov N. Desalination Engineering: Planning and Design. 2019. Taylor & Francis Group, LLC. 249 p.
14. Louis Theodore R. Ryan Dupont. Introduction to Desalination: Principles, Processes, and Calculations. 2022. John Wiley & Sons. 512 p. ISBN: 978-1-119-69175-4.
15. Curto D., Franzitta V., Guercio A. A Review of the Water Desalination Technologies. Appl. Sci. 2021, 11, 670. <https://doi.org/10.3390/app11020670>
16. Kucera J. Reverse Osmosis. 3rd Edition. Scrivener Publishing LLC, John Wiley & Sons. 2023. 671 p.
17. Рибальченко В. А. Вітроенергетика та опріснення води. Відновлювана енергетика. 2024. 3. С. 92–109. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3\(78\)92-109](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78)92-109)
18. Sajjad Al-Amshawee, Mohd Yusri Bin Mohd Yunus, Abdul Aziz Mohd Azoddein, David Geraint Hassell, Ihsan Habib Dakhil, Hassimi Abu Hasan. Electrodialysis desalination for water and wastewater: A review. Elsevier. Chemical Engineering Journal. 2020. Vol. 380. 122231
19. Lienhard John H., Thiel Gregory P., Warsinger David M., Banchik Leonardo D. Low Carbon Desalination: Status and Research, Development, and Demonstration Needs. Report of a workshop conducted at the Massachusetts Institute of Technology in association with the Global Clean Water Desalination Alliance. Mit Abdul Latif Jameel World Water and Food Security Lab. Cambridge. Massachusetts. November 2016. 138 p.
20. Marc-Antoine Eyl-Mazzega and Élise Cassignol, “The Geopolitics of Seawater Desalination”, Études de l’Ifri, Ifri, September 2022. 30 p.
21. Distribution of desalination capacity worldwide in 2022, by region. <https://www.statista.com/statistics/1379757/global-water-desalination-capacity-share-by-region/> [Дата звернення – 14.08.2024].
22. <https://letsdowater.com/jebel-ali-the-worlds-largest-desalination-plant/> [Дата звернення – 14.08.2024].
23. <https://www.dewa.gov.ae/en/about-us/media-publications/latest-news/2021/07/jebel-ali-power-and-desalination-complex> [Дата звернення – 14.08.2024].
24. <https://letsdowater.com/the-largest-desalination-plant-in-saudi-arabia-9-key-facts/> [Дата звернення – 14.08.2024].
25. <https://acwapower.com/en/projects/al-taweelah-iwp/energy-utilities.com/saudi-arabia-extends-deadline-for-ras-alkhair-news113175.html> power-technology.com/marketdata/ras-al-khair-iwpp-saudi-arabia/ [Дата звернення – 14.08.2024].
26. <https://acwapower.com/en/projects/al-taweelah-iwp/> [Дата звернення – 14.08.2024].
27. <https://www.nsenergybusiness.com/news/acwa-power-swpc-swec-shuaibah-3-iwpp/> [Дата звернення – 14.08.2024].
28. <https://idadesal.org/acwa-power-and-saudi-water-partnership-company-to-reconfigure-shuaibah-3-from-an-energy-intensive-water-and-power-facility-to-a-greenfield-reverse-osmosis-plant/> [Дата звернення – 14.08.2024].
29. <https://acwapower.com/en/projects/marafiq-iwpp/> [Дата звернення – 14.08.2024].
30. <https://acwapower.com/en/projects/umm-al-quwain-iwp/> [Дата звернення – 14.08.2024].
31. <https://letsdowater.com/sorek-desalination-plant-7-impressive-facts/> [Дата звернення – 14.08.2024].
32. <https://acwapower.com/en/projects/jubail-3a-iwp/> [Дата звернення – 14.08.2024].
33. <https://acwapower.com/en/projects/rabigh-3-iwp/> [Дата звернення – 14.08.2024].
34. <https://www.veolia.com/middleeast/our-services/our-vision/our-references/fujairah-2-reverse-osmosis->

- desalination-plant-united-arab [Дата звернення – 14.08.2024].
35. Published on October 5, 2022 at 11:41 am by INSIDER MONKEY TEAM in Hedge Funds, Lists, News. <https://www.insidermonkey.com/blog/10-largest-desalination-plants-in-the-us-1072221/> [Дата звернення – 14.08.2024].
 36. <https://www.apmresearchlab.org/> [Дата звернення – 14.08.2024].
 37. The Role of Desalination in an Increasingly Water-Scarce World. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank. MARCH 2019. 97 P. <https://documents1.worldbank.org/curated/zh/476041552622967264/pdf/135312-WP-PUBLIC-14-3-2019-12-3-35-W.pdf>
 38. Desalination Technologies Market Size, Share & Industry Analysis, By Technology Type (Multi Stage Flash Distillation (MSF), Multi-Effect Distillation (MED), Reverse Osmosis (RO), Electrodialysis (ED), Nanofiltration, and Others), By Source (Sea Water, Brackish Water, River Water, and Others), By End-User (Municipal, Industrial, and Power Generation), and Regional Forecast, 2024-2032. September 02, 2024. Report ID: FBI10980. <https://www.fortunebusinessinsights.com/desalination-technologies-market-109806> [Дата звернення – 21.09.2024].
 39. Desalination Technologies Market Share, Size, Trends, Industry Analysis Report, By Technology (Reverse Osmosis, Multi-Stage Flash, Multi-Effect Distillation); By Application; By Region; Segment Forecast, 2024–2032. Jan-2024. Report ID: PM3930. <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/desalination-technologies-market/request-for-sample> [Дата звернення – 21.09.2024].
 40. Water Desalination Equipment Market Share, Size, Trends, Industry Analysis Report, By Technology; By Application (Municipal, Industrial, Others) By Source. (Sea Water, Brackish Water, River Water, Others); By Region; Segment Forecast, 2022-2030. Jun-2022. Report ID: PM1986. [Дата звернення – 21.09.2024]. <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/water-desalination-equipment-market/toc>
 41. Conference of the Parties Twenty-first session Paris, 30 November to 11 December 2015. <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf> [Дата звернення – 21.09.2024].
 42. Francesca Greco, Sebastiaan G. J. Heijman, Antonio Jarquin-Laguna. Integration of Wind Energy and Desalination Systems: A Review Study. Processes 2021. 9(12). 2181. <https://doi.org/10.3390/pr9122181>
 43. Khalid Abdulaziz. M. AL-Shail. Analysis of solar energy in desalination plants in saudi arabia. Doctor of Universidad de Granada. Universidad de Granada. May 2020. 166 p.
 44. Goosen, M., Mahmoudi, H., Alyousef, Y., & Ghaffour, N. (2023). Solar desalination: A review of recent developments in environmental, regulatory and economic issues. Solar Compass. 5. 100034. <https://doi.org/10.1016/j.solcom.2023.100034>
 45. Книш К., Кудря С., Галабала М. Біла Книга 2021. Офшорна вітроенергетика та “зелений” водень: відкриття нових меж енергетичної потужності України. 14 с. https://www.asterslaw.com/ua/press_center/publications/white_paper_2021_offshore_wind_energy [Дата звернення – 04.07.2024]
 46. Підкоморна Ю. Міненерго завершило обговорення Водневої стратегії. 27 вересня 2022. – <https://mev.gov.ua/novyna/minenerho-zavershylo-obhovorennya-vodnevoyi-stratehiyi-yuliya-pidkomorna> [Дата звернення – 04.07.2024]
 47. Васько П.Ф., Вербовий А. П., Пазич С. Т. Реалізація стохастичної моделі поздовжньої складової швидкості вітру для задач вітроенергетики. Відновлювана енергетика. 2017. № 3. С. 54–61.
 48. Васько П. Ф., Васько В. П. Динамика нагрузочных режимов работы ветроэлектрической установки, обусловленная порывами скорости ветра. Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. Будівельні конструкції, будівлі та споруди. 2001. 1(4). С. 140–144.
 49. Васько П. Ф., Васько В. П., Даниленко О. І., Должук В. В. Експериментальні дослідження режимів генерування та споживання реактивної потужності серійною вітроелектричною установкою з асинхронним генератором. Відновлювана енергетика. 2008. № 1. С. 34–38.
 50. Васько П. Ф., Мазуренко І. Л. Аналіз імовірнісних характеристик вітроелектричних станцій як джерела енергії для опріснення морської води в Азово-Чорноморському регіоні України. Енерготехнології та ресурсозбереження (Energy Technologies & Resource Saving, ISSN 2413-7723, eISSN 2664-3561). 2023. № 4. С. 42–56. DOI: 10.33070/etars.4.2023.04
 51. Vasko P., Mazurenko I., Sysak R. Statistical evaluation of performance indicators of photovoltaic plants as a source of energy for water desalination in the Azov-Black sea region of Ukraine. Відновлювана енергетика. 2024. № 2. С. 105–116. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2\(77\)105-116](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2(77)105-116)
 52. Concept of Accumulation of Energy from Photovoltaic and Wind Power Plants by Means of Seawater Pumped Hydroelectric Energy Storage / P. Vasko, A. Verbovii, A. Moroz, S. Pazych, M. Ibragimova, L. Sahno. 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (2019 IEEE ESS). P. 188–191. DOI: 10.1109/ESS.2019.8764167

REFERENCES

1. https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Tezy_2024_Publication.pdf
2. Natsionalna dopovid pro yakist pytnoi vody ta stan pytnoho vodopostachannia ta vodovidvedennia v Ukraini u 2022 r. Ministerstvo rozvytku hromad, terytorii ta infrastruktury Ukrainy. Kyiv. 2023. 397 s. [National Report on the Quality of Drinking Water and the State of Drinking Water Supply and Wastewater Disposal in Ukraine in 2022]. (Ukr.). [Accessed – July.04.2024]
3. Ad van Wijk, Jorgo Chatzimarkakis. Green Hydrogen for a European Green Deal A 2x40 GW Initiative. Brussels: Hydrogen Europe, 40p. https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2021/11/Hydrogen-Europe_2x40-GW-Green-H2-Initiative-Paper.pdf
4. Memorandum of understanding between the European Union and Ukraine on a Strategic Partnership on

- Biomethane, Hydrogen and other Synthetic Gases. 02.02.2023. P. 8. https://energy.ec.europa.eu/memo-randum-understanding-between-european-union-and-ukraine-strategic-partnership-biomethane_en [Accessed – July.04.2024].
5. Philip Woods, Heriberto Bustamante, Kondo-Francois Aguey-Zinsou. The hydrogen economy – Where is the water?. *Energy Nexus*. Vol. 7. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100123>
 6. Khorolskyi A. O., Lapko V. V., Salli V. S., Mamaikin O. R. Vybir tekhnolohii demineralizatsii stichnykh vod, yak skladovoi tekhnolohichnykh potokiv vuhilnykh shakht. *Zbirnyk naukovykh prats NHU*. 2020. № 63. S. 61–73. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/63.061>. [The choice of wastewater demineralization technology as a component of the technological flows of coal mines]. (Ukr.).
 7. Salieiev I. A. Oprisnennia shakhtnykh vod pry zakrytti shakhty im. M.I. Stashkova PrAT «DTEK Pavlohradvuhilia». *Zbirnyk naukovykh prats NHU*. 2021. № 66. C. 81–93. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/66.081>. [Desalination of mine waters during the closure of the mine named after E. Stashkova PJSC "DTEK Pavlogradvuhillia"]. (Ukr.).
 8. Yelatontsev D. O., Mukhachev A. P. Perspektyvy otrymannia oprisnenoï vody z vod vuhilnykh shakht iz odnochasnoiu utylizatsiieiu shakhtnoho metanu / Materialy VII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Chysta voda. Fundamentalni, prykladni ta promyslovi aspekty» (25-26 lystopada 2021 r., m. Kyiv, Ukraina). Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. 2021. S. 124–126. https://ela.kpi.ua/bit-stream/123456789/46891/1/Pure_water_2021-124-126.pdf. [Prospects for obtaining desalinated water from coal mine waters with the simultaneous utilization of mine methane]. (Ukr.).
 9. Kulikova D. V. Development of a resource-saving technology for integrated processing of highly mineralized mine water in the enterprises of the Kryvyi Rih iron ore basin. *Екологічні науки*. 2022. № 5(44). C. 158–162. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.23>
 10. Hisham T. El-Dessouky, Hisham M. Ettouney. *Fundamentals of Salt Water Desalination*, Elsevier. 2002. P. 670.
 11. Wetterau G., Moch I., Frenkel V., Huehmer R., Hunt H., Kiefer K., Pankratz T., Sethi S., Silverman G., Trussel S. et al. *Desalination of Seawater*. AWWA M61-2011. 1st ed.; American Water Works Association: Denver, CO, USA. 2011. 104 p. <https://webstore.ansi.org/Standards/AWWA/AW-WAM612011?source=preview>
 12. Lior N. *Advances in Water Desalination* / N. Lior, Ed. John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA. 2012. 712 p. ISBN 9781118347737.
 13. Voutchkov N. *Desalination Engineering: Planning and Design*. 2019. Taylor & Francis Group, LLC. 249 p.
 14. Louis Theodore R. Ryan Dupont. *Introduction to Desalination: Principles, Processes, and Calculations*. 2022. John Wiley & Sons. 512 p. ISBN: 978-1-119-69175-4.
 15. Curto D., Franzitta V., Guercio A. A Review of the Water Desalination Technologies. *Appl. Sci*. 2021, 11, 670. <https://doi.org/10.3390/app11020670>
 16. Kucera J. *Reverse Osmosis*. 3rd Edition. Scrivener Publishing LLC, John Wiley & Sons. 2023. 671 p.
 17. Rybalchenko V. A. Vitroenerhetyka ta oprisnennia vody. *Vidnovlyvana energetika*. 2024. 3. C. 92–109. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3\(78\)92-109](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78)92-109). [Wind energy and water desalination] (Ukr.).
 18. Sajjad Al-Amshawee, Mohd Yusri Bin Mohd Yunus, Abdul Aziz Mohd Azoddein, David Geraint Hassell, Ihsan Habib Dakhil, Hassimi Abu Hasan. *Electrodialysis desalination for water and wastewater: A review*. Elsevier. *Chemical Engineering Journal*. 2020. Vol. 380. 122231
 19. Lienhard John H., Thiel Gregory P., Warsinger David M., Banchik Leonardo D. *Low Carbon Desalination: Status and Research, Development, and Demonstration Needs*. Report of a workshop conducted at the Massachusetts Institute of Technology in association with the Global Clean Water Desalination Alliance. Mit Abdul Latif Jameel World Water and Food Security Lab. Cambridge. Massachusetts. November 2016. 138 p.
 20. Marc-Antoine Eyl-Mazzega and Élise Cassignol, "The Geopolitics of Seawater Desalination", *Études de l'Ifri*, Ifri, September 2022. 30 p.
 21. Distribution of desalination capacity worldwide in 2022, by region. <https://www.statista.com/statistics/1379757/global-water-desalination-capacity-share-by-region/> [Accessed – August.14.2024].
 22. <https://letsdowater.com/jebel-ali-the-worlds-largest-desalination-plant/> [Accessed – August.14.2024].
 23. <https://www.dewa.gov.ae/en/about-us/media-publications/latest-news/2021/07/jebel-ali-power-and-desalination-complex> [Accessed – August.14.2024].
 24. <https://letsdowater.com/the-largest-desalination-plant-in-saudi-arabia-9-key-facts/> [Accessed – August.14.2024].
 25. <https://acwapower.com/en/projects/al-taweelah-iwp/energy-utilities.com/saudi-arabia-extends-deadline-for-ras-alkhair-news113175.html> power-technology.com/marketdata/ras-al-khair-iwpp-saudi-arabia/ [Accessed – August.14.2024].
 26. <https://acwapower.com/en/projects/al-taweelah-iwp/> [Accessed – August.14.2024].
 27. <https://www.nsenergybusiness.com/news/acwapower-swpc-swec-shuaibah-3-iwpp/> [Accessed – August.14.2024].
 28. <https://idadesal.org/acwa-power-and-saudi-water-partnership-company-to-reconfigure-shuaibah-3-from-an-energy-intensive-water-and-power-facility-to-a-greenfield-reverse-osmosis-plant/> [Accessed – August.14.2024].
 29. <https://acwapower.com/en/projects/marafiq-iwpp/> [Accessed – August.14.2024].
 30. <https://acwapower.com/en/projects/umm-al-quwain-iwp/> [Accessed – August.14.2024].
 31. <https://letsdowater.com/sorek-desalination-plant-7-impressive-facts/> [Accessed – August.14.2024].
 32. <https://acwapower.com/en/projects/jubail-3a-iwp/> [Accessed – August.14.2024].
 33. <https://acwapower.com/en/projects/rabigh-3-iwp/> [Accessed – August.14.2024].
 34. <https://www.veolia.com/middleeast/our-services/our-vision/our-references/fujairah-2-reverse-osmosis-desalination-plant-united-arab> [Accessed – August.14.2024].

35. Published on October 5, 2022 at 11:41 am by INSIDER MONKEY TEAM in Hedge Funds, Lists, News. <https://www.insidermonkey.com/blog/10-largest-desalination-plants-in-the-us-1072221/> [Accessed – August.14.2024].
36. <https://www.apmresearchlab.org/> [Accessed – August.14.2024].
37. The Role of Desalination in an Increasingly Water-Scarce World. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank. MARCH 2019. 97 P. <https://documents1.worldbank.org/curated/zh/476041552622967264/pdf/135312-WP-PUBLIC-14-3-2019-12-3-35-W.pdf>
38. Desalination Technologies Market Size, Share & Industry Analysis, By Technology Type (Multi Stage Flash Distillation (MSF), Multi-Effect Distillation (MED), Reverse Osmosis (RO), Electrodialysis (ED), Nanofiltration, and Others), By Source (Sea Water, Brackish Water, River Water, and Others), By End-User (Municipal, Industrial, and Power Generation), and Regional Forecast, 2024-2032. September 02, 2024. Report ID: FBI10980. <https://www.fortunebusinessinsights.com/desalination-technologies-market-109806> [Accessed – September.21.2024].
39. Desalination Technologies Market Share, Size, Trends, Industry Analysis Report, By Technology (Reverse Osmosis, Multi-Stage Flash, Multi-Effect Distillation); By Application; By Region; Segment Forecast, 2024–2032. Jan-2024. Report ID: PM3930. <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/desalination-technologies-market/request-for-sample> [Accessed – September.21.2024].
40. Water Desalination Equipment Market Share, Size, Trends, Industry Analysis Report, By Technology; By Application (Municipal, Industrial, Others) By Source. (Sea Water, Brackish Water, River Water, Others); By Region; Segment Forecast, 2022-2030. Jun-2022. Report ID: PM1986. <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/water-desalination-equipment-market/toc> [Accessed – September.21.2024].
41. Conference of the Parties Twenty-first session Paris, 30 November to 11 December 2015. <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf> [Accessed – September.21.2024].
42. Francesca Greco, Sebastiaan G. J. Heijman, Antonio Jarquin-Laguna. Integration of Wind Energy and Desalination Systems: A Review Study. Processes 2021. 9(12). 2181. <https://doi.org/10.3390/pr9122181>
43. Khalid Abdulaziz. M. AL-Shail. Analysis of solar energy in desalination plants in saudi arabia. Doctor of Universidad de Granada. Universidad de Granada. May 2020. 166 p.
44. Goosen M., Mahmoudi, H., Alyousef Y., & Ghaffour N. (2023). Solar desalination: A review of recent developments in environmental, regulatory and economic issues. Solar Compass. 5. 100034. <https://doi.org/10.1016/j.solcom.2023.100034>
45. Knysh K., Kudria S., Halabala M. Bila Knyha 2021. Off-shore vitroenerhetyka ta "zelenyj" voden': vidkryttia novykh mezh enerhetychnoi potuzhnosti Ukrainy. 14 s. https://www.asterslaw.com/ua/press_center/publications/white_paper_2021_offshore_wind_energy [Off-shore wind energy and 'green' hydrogen: opening new frontiers of Ukraines energy capacity]. (Ukr.). [Accessed – July.04.2024].
46. Pidkomorna Yu. Minenerho zavershylo obhovorennia Vodnevoi stratehii. 27 veresnia 2022. <https://mev.gov.ua/novyna/minenerho-zavershyloobhovorennia-vodnevoyi-stratehiyi-yuliya-pidkomorna>. [Ministry of Energy completed the discussion of the Hydrogen Strategy]. (Ukr.) [Accessed – July.04.2024].
47. Vasko P. F., Verbovyj A. P., Pazych S. T. Realizatsiia stokhastychnoi modeli pozdovzhnoi skladovoi shvydkosti vitru dlia zadach vitroenerhetyky. Vidnovluvana energetika. 2017. № 3. S. 54–61. [Implementation of a stochastic model of the longitudinal component of wind speed for wind energy tasks]. (Ukr.).
48. Vasko P. F., Vasko V. P. Dynamyka nahruzochnykh rezhymov raboty vetroelektrycheskoj ustanovky, obuslovlennaia porivamy skorosty vetra. Visnyk Donbaskoi derzhavnoi akademii budivnytstva i arkhitektury. Budivelni konstruksii, budivli ta sporudy. 2001. 1(4). S. 140–144 [Dynamics of load regimes of wind power plants caused by wind speed gusts]. (Rus.).
49. Vasko P. F., Vasko V. P., Danylenko O. I., Doliuk V. V. Eksperymentalni doslidzhennia rezhymiv heneruvannia ta spozhyvannia reaktyvnoi potuzhnosti serijnoiu vitroelektrychnoiu ustanovkoiu z asynkhronnym heneratorom. Vidnovluvana energetika. 2008. № 1. S. 34–38. [Experimental studies of the generation and consumption modes of reactive power by a series wind turbine with an asynchronous generator]. (Ukr.).
50. Vasko P. F., Mazurenko I. L. Analiz imovirnisnykh kharakterystyk vitroelektrychnykh stantsij iak dzherela enerhii dlia oprisnennia mors'koi vody v Azovo-Chornomors'komu rehioni Ukrainy. Enerhotekhnolohii ta resursozberezhennia (Energy Technologies & Resource Saving, ISSN 2413-7723, eISSN 2664-3561). 2023. № 4. S. 42–56. DOI: 10.33070/etars.4.2023.04 [Express analysis of the probabilistic characteristics of wind power plants as a source of energy for seawater desalination in the Azov-Black Sea region of Ukraine]. (Ukr.).
51. Vasko P., Mazurenko I., Sysak R. Statistical evaluation of performance indicators of photovoltaic plants as a source of energy for water desalination in the Azov-Black sea region of Ukraine. Відновлювана енергетика. 2024. №2. С. 105–116. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2\(77\)105-116](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2(77)105-116)
52. Concept of Accumulation of Energy from Photovoltaic and Wind Power Plants by Means of Seawater Pumped Hydroelectric Energy Storage / P. Vasko, A. Verbovyj, A. Moroz, S. Pazych, M. Ibragimova, L. Sahno. 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (2019 IEEE ESS). P. 188–191. DOI: 10.1109/ESS.2019.8764167