

Столяренко Г.С.

Черкаський державний технологічний університет

Коваль М.Г.

Черкаський державний технологічний університет

Солодовнік Т.В.

Черкаський державний технологічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ЗАХИСТУ МЕМБРАН ПРИ ОБЕЗСОЛЮВАННІ ВИСОКОМІНЕРАЛІЗОВАНИХ ВОД

Технологія зворотноосмотичної демінералізації морських вод супроводжується утворенням біологічних відкладень на мембранах. Тому, обробка високомінералізованих вод перед їх застосуванням в мембранних установках є актуальним питанням сьогодення. В статті запропоновано застосовувати попередню обробку води, використовуючи електроактивацію в якості ефективного комплексного процесу демінералізації, яка додатково супроводжується очищенням води від органічних речовин та перешкоджає утворенню біологічних відкладень на мембранах. За експериментальними даними було визначено вплив електрохімічної дії на склад високомінералізованих вод та запропонована схема стендової лабораторної установки для очищення води методом електроактивації. В якості основної ємкості в даній схемі використовували розроблену конструкцію демінералізатору, яка є проточною та безперервної дії з електродами особливої конструкції, що дозволяє очищувати 3 м³/годину морської мінералізованої води. Попереднє опріснення морської води перед її застосуванням в установках зворотного осмосу проводили при наступних технологічних параметрах: густина струму 1,0–1,5 А/дм², кількість електрики змінювали від 2,5 до 5,1 кВт·год/м³. Встановлено, що застосування методу електроактивації для морської води, яка була відібрана з Чорного моря в районі Тилігульського лиману, дає можливість для досягнення високого ступеня (в межах від 45 до 70% (вміст іонів та загальний солевміст) її очищення при первинній демінералізації. У статті проведено дослідження способу досягнення мінімізації енергетичних витрат в технології демінералізації морських вод. На стадії попереднього опріснення води та перед її надходженням до мембранної системи було досягнуто зниження витрат електроенергії в межах 35–40%. Доведено, що солевміст у вихідній морській воді суттєво знижується і процес попередньої підготовки води методом електроактивації є таким, який можна рекомендувати для використання в промислових масштабах.

Ключові слова: високомінералізовані води, електроактивація, відкладення у мембранах, демінералізація, опріснювачі, зворотний осмос, ступінь очищення.

Постановка проблеми. Для демінералізації води близько 90% сумарної продуктивності опріснювачів у світі забезпечується дистиляційними одно-, багатоступінчастими та термокомпресійними установками. Дистиляційний метод є енергоємним, тому застосування дистиляційних установок доцільно в тих регіонах, які мають для цього достатні енергоресурси. Також для демінералізації води використовується заморожування та зворотний осмос. Ці методи ефективні для води з солевмістом більше 10000 мг/дм³, а при меншому

солевмісті (2000–3000 мг/дм³) до використання рекомендується іонообмінний метод. Метод електродіалізу є ефективним в діапазоні концентрацій солей від 2500 до 10000 мг/дм³. Найбільш складним вузлом в технологічних процесах вилучення солей є зниження вмісту таких іонів як CO₃²⁻, SO₄²⁻ та Cl⁻ з концентрацією 21000–25000 мг/дм³ до концентрації 2500 мг/дм³. Ці процеси є надзвичайно енергоємними та доволі коштовними. Морські води, загальний солевміст яких коливається в межах 8000–18000 мг/дм³, потребують

знесолення перед використанням в технологічних процесах. За останнє століття були розроблені численні методи опріснення морської та солонуватої води, найбільш ефективними серед них є мембранні технології. Однак, на даний час, технологія зворотного осмосу стикається з такими проблемами, як забруднення (колоїдне, органічне та біобруднення) та утворення накипу, які виникають внаслідок високої концентрації солей та забруднюючих речовин у воді. Накип на поверхнях мембран скорочує термін їх служби, зменшує потік води та збільшує споживання енергії, що вимагає частого очищення та призводить до скорочення терміну служби мембран [1]. Тому, актуальним питанням сьогодення є розробка ефективних методів попередньої демінералізації морської води для подальшого її опріснення в мембранних установках з метою зменшення негативного впливу на мембранні модулі. Одним з таких методів є проведення попередньої обробки морської води з використанням електроактивації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науковій літературі приділяється багато уваги питанню дослідження мембран після їх використання для опріснення вод широкого кола мінералізації. Проведене авторами [1] дослідження допомагає в з'ясуванні складу обростання мембран за низьких температур та надає орієнтир для розробки методів попередньої обробки мінералізованої води. В роботі [2] досліджувався вплив робочих умов на продуктивність процесу зворотного осмосу при різних рівнях забруднення. Авторами доведено, що забруднення мають значний вплив на швидкість потоку пермеату, солоність та питоме споживання електроенергії та при високому рівні забруднення продуктивність зворотного осмосу можна збільшити до цільового значення, регулюючи тиск та температуру сировини. Авторами [3] розроблено математичну модель для оптимізації продуктивності опріснення при застосуванні зворотного осмосу для солонуватої води із середньою та високою концентраціями солі з використанням методології поверхні відгуку та штучної нейронної мережі, яка була розроблена спеціально для ефективної роботи систем опріснення. У статті [4] пропонується використання періодичного процесу зворотного осмосу з використанням осмотичного зворотного промивання, реверсу потоку подачі та циклічного змінення солоності. Авторами статті надані рекомендації щодо напрямків дослідницької діяльності для подальшого вдосконалення технології періодичного процесу зворотного осмосу. Науковці [5] пояснюють яким чином

відбувається забруднення мембран та вказують на те, що забруднення можна розділити на внутрішні або зовнішні залежно від місця їх розташування. У статті [6] доведено, що забруднення мембран призводить до кількох негативних наслідків для систем зворотного осмосу, включаючи зниження продуктивності, погіршення якості води, збільшення експлуатаційних витрат, вимоги до вищого тиску, збільшення часу очищення мембран та скорочення терміну служби.

Аналізуючи наукові роботи дослідників різних країн, встановлена така закономірність, що основна проблема, яка виникає при застосуванні зворотного осмосу для опріснення вод різного ступеню мінералізації – це проблема забруднення мембран сполуками неорганічного походження та їх обростання різного типу органічними речовинами [7, 8].

У багатьох оглядових статтях, які стосуються технологій опріснення води, приділяється увага дослідженню стану опріснення води у світі, тобто аналізу кількості існуючих опріснювальних установок, технологій, що використовуються на цих установках. Автори зосереджують особливу увагу на технологічних аспектах, включаючи, серед іншого, потреби в енергії, типовий розмір та вартість найпопулярніших технологій опріснення [9, 10, 11]. У статтях [12, 13] проведено детальний огляд принципів роботи та параметрів продуктивності кількох технологій опріснення, але не вказано про найбільш ефективні технології попередньої обробки високомінералізованої та солонуватої води перед її очищенням в системах зворотного осмосу. У роботі [14] проведено оптимізаційний аналіз основних експлуатаційних витрат на процеси демінералізації води Чорного моря. Показано, що двоступеневий зворотний осмос з використанням мембран середньої та низької щільності, може бути успішно використаний для демінералізації, що дозволяє знизити основні експлуатаційні витрати на 15–28%.

Авторами [15] пропонується проведення попереднього макро- та мікрмасштабного моделювання процесу зворотного осмосу. Наголошується на важливості використання обчислювальної гідродинаміки як перспективного інструменту моделювання, що може повністю охопити всі явища, пов'язані зі забрудненням мембран. В роботі [16] авторами пропонується безпосереднє нанесення мікробульбашок на поверхню мембрани як перспективний підхід до управління міжфазним забрудненням шляхом безперервної фізичної взаємодії. Автори доводять, що процес регенерації на основі мікробульбашок є стабільним та повторю-

ваним впродовж 10 циклів, а також високоефективним для проблемної води. В роботі [17] автори рекомендують проводити попереднє очищення води шляхом додавання до мембранного реактора підсилювачів зменшення забруднення, таких як адсорбенти та флокулянти, що може ефективно зменшити забруднення мембран. У статтях [18, 19] автори наголошують на тому, що ефективна система попереднього очищення є основою будь-якої технології опріснення. А вибір етапів попередньої обробки визначається такими критеріями, як тип матеріалу мембрани, якість води, частота очищення мембрани та коефіцієнт відновлення.

Отже, при огляді та аналізі наукових статей багатьох вчених щодо практичного використання електроактивації води у рослинництві, біотехнології, харчовій промисловості [20, 21, 22], в сільському господарстві [23, 24], питання попереднього очищення високомінералізованих та солонуватих вод є актуальним. Науковці робочої групи кафедри хімічних технологій та водоочищення Черкаського державного технологічного університету проводили дослідження щодо використання електроактивації високомінералізованих вод перед їх використанням в зворотноосматичних системах очищення води.

Постановка завдання. Метою статті є вивчення процесів попередньої електрохімічної активаційної обробки морської води для зниження солевмісту на одній сходинці в межах від 45 до 50% та для запобігання утворення відкладень на мембранах при фінішній стадії демінералізації, розробка лабораторного демінералізатору та схеми технологічного процесу комплексного очищення високомінералізованих вод.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження була вода, відібрана з Чорного моря в районі Тилігульського лиману (Одеська область, Україна), склад якої представлено в таблиці 1. Аналіз вихідної води на вміст іонів проводили відповідно стандартних методів [25], а саме: іони Ca^{2+} та Mg^{2+} визначали комплексонометричним методом; хлориди визначали аргенометричним титруванням; іони Na^+ та K^+ визначали потенціометричним методом з використанням іон-селективних електродів (іонімір І-160 МІ); сульфати визначали гравіметричним осадженням іонів у вигляді осаду BaSO_4 ; для визначення іонів

HCO_3^- використовували кислотно-основне титрування. Як відомо, вода характеризується двома важливими фізичними показниками: рН (водневим показником) і окисно-відновним потенціалом ОВП (або редокс-потенціалом Red-Ox) [26]. Визначення рН проводили потенціометричним методом при використанні іоніміру І-160 МІ (для вихідної досліджуваної води рН=7,5). Визначення ОВП визначали за допомогою кондуктометру лабораторного МР 521 з використанням пластикового комбінованого електроду 201Т-М рН/АТС (для вихідної досліджуваної води ОВП=230 мВ).

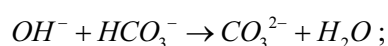
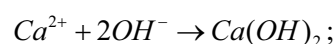
Наближений розрахунок загальної мінералізації вихідної води знаходили за формулою: $S = \sum C = 9430 \text{ мг/дм}^3$. Більш точно загальну мінералізацію води (TDS) знаходили при використанні кондуктометру лабораторного МР 521 з використанням пластикового комбінованого електроду 201Т-М рН/АТС (для вихідної досліджуваної води TDS = 9507 мг/дм³).

Ступінь очищення води (X, %) розраховували за формулою:

$$X = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \cdot 100\%$$

де C_0 і C_1 – вихідна і кінцева концентрації, відповідно, мг/дм³.

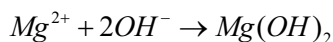
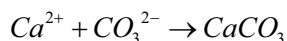
Електрохімічна активація – це фізико-хімічний процес, сукупність здійснених в умовах мінімального виділення тепла електрохімічного та електрофізичного впливів на воду (з іонами, що знаходилися в ній, і молекулами розчинених речовин) в зоні просторового заряду на поверхні електродів. При цьому досягається нерівноважний стан у системі за рахунок переносу заряду через межу «електрод-мембрана-електроліт». Однією з переваг методу є спрямований рух гідроксид-іонів в електроактиваторі. При використанні проникних мембран гідроксид-іони, що утворилися, не асоціюються з катіонами Гідрогену, а підвищують рН катодного розчину до 10–12. При цьому досягається 70–80% виходу за струмом із зниженням жорсткості води. Під впливом вільних гідроксид-іонів можливе протікання декількох конкуруючих реакцій в катодній області:



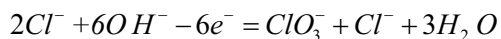
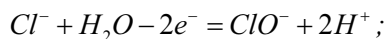
Таблиця 1

Концентрація іонів у воді, відібраної з Чорного моря в районі Тилігульського лиману

Іони	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
C, мг/дм ³	370	915	4389	430	1568	1502	256



Присутність іону Cl^- приводить до утворення ряду окисеновмісних іонів за відомим механізмом електродних реакцій біля аноду:



В анодному просторі електроактиватора рН знижується та середовище стає кислим. Величина рН та значення ОВП впливають на фізико-хімічні та біохімічні процеси, які відбуваються при видаленні з води забруднювачів. Так в процесі окиснення, відновлення, дисоціації або комплексоутворення та регулюванням рН, можна змінити ОВП, напрямом та швидкість хімічних реакцій, окисно-відновну активність речовин в розчині, стійкість комплексних сполук, а при біохімічному очищенні води – гальмувати життєдіяльність бактерій та змінювати каталітичну активність ферментів. Електрохімічна активація також призводить до знезаражування води, так як у розчині натрій хлориду утворюється аніон гіпохлориду, що сприяє процесу очищення. Зниження вмісту органічних сполук можна пояснити їх співосадженням на колоїдних частинках у катодній області та з частковим окисненням розчинених органічних речовин на аноді. Таким чином, електрохімічний метод очищення є універсальним методом попередження коагуляції

сульфатних відкладень в технологічному обладнанні а також перешкоджає біообростанню технологічних елементів, що, в свою чергу, може бути ефективним при подальшому знесоленні води з використанням зворотноосмотичних мембран. До переваг методу можна віднести: можливість його використання в присутності органічних сполук; заміна напівпроникних перегородок на проникні; простота конструкції та можливість її удосконалення; мінімізація витрат та можливість видалення солей у вигляді осаду [27].

Для дослідження ефективності використання хімічної електроактивації з метою попередньої демінералізації морської води, загальна мінералізації якої складає 9430 мг/дм^3 , розроблено та використано для дослідження стендову експериментальну лабораторну установку електроактивації, яка зображена на рисунку 1. В якості основної ємкості, використовували лабораторний демінералізатор (2), спроектований в науковій лабораторії кафедри хімічних технологій та водоочищення Черкаського державного технологічного університету. Фото лабораторного демінералізатора представлено на рисунку 2.

Лабораторний демінералізатор безперервної дії є проточним, має електроди особливої конструкції, що дозволяє очищувати $3 \text{ м}^3/\text{годину}$ морської мінералізованої води. З метою видалення грубодисперсних речовин, досліджувану воду попередньо фільтрували крізь паперовий складчастий фільтр.

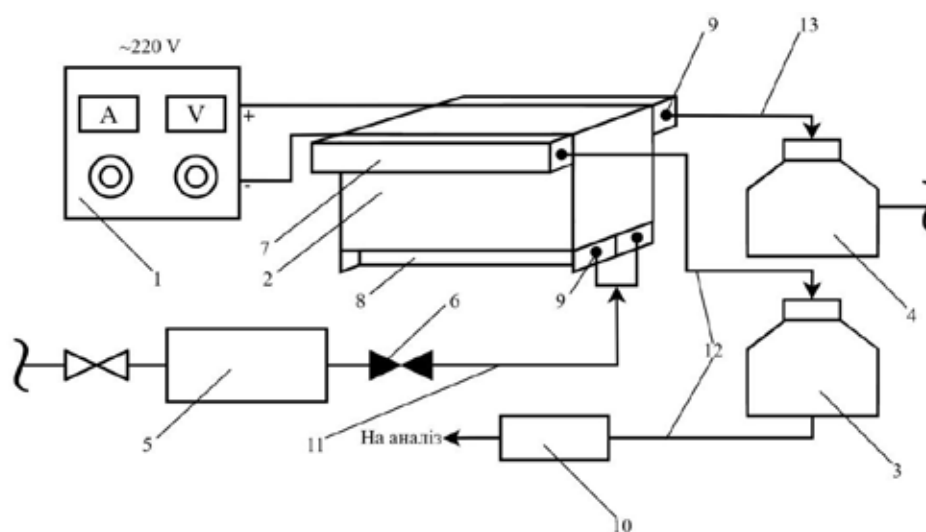


Рис. 1. Схема стендової лабораторної установки для очищення води методом електроактивації:
1 – блок живлення; 2 – основна ємкість – демінералізатор; 3 – ємкість для католіту;
4 – ємкість для аноліту; 5 – ємкість з досліджуваною водою; 6 – кран; 7 – камера для відводу води;
8 – камера для підводу води; 9 – штупер; 10 – відстійник води для аналізу



а)



б)

Рис. 2. Фото лабораторного демінералізатора:
а – загальний вигляд; б – вид з боку відведення рідких продуктів електроактивації

Попереднє опріснення морської води, склад якої представлено в таблиці 1, проводили при наступних технологічних параметрах: густина струму 1,0–1,5 А/дм², кількість електрики відповідно дослідів (в кВт·год/м³): № 1 – 2,5; № 2 – 3,8; № 3 – 5,1.

Отримані результати, представлені в таблиці 2, свідчать, що застосування методу електроактивації води сприяє досягненню високого ступеня очищення при первинній демінералізації. Експериментально встановлено, що солеміст у вихідній морській воді суттєво знижується і процес попередньої підготовки води методом електроактивації є таким, який можна рекомендувати для використання в промислових масштабах. За результатами серії проведених дослідів (табл. 2) встановлено, що оптимальними умовами для ефективного опріснення вихідної морської води є: густина струму 1,0–1,5 А/дм²; кількість електрики 5,1 кВт·год/м³.

Спостерігаються зміни у значеннях рН та ОВП, а саме: після проведення електроактивації морської води рН=8,0 а ОВП = -202 мВ. Отримані

дані доводять, що солеміст у вихідній морській воді суттєво знижується і процес попередньої підготовки води методом електроактивації є таким, який можна рекомендувати для використання в промислових масштабах. Отримані результати попереднього очищення води наведені в таблиці 3.

Висновки. Запропоновано застосовувати попередню обробку морської води, використовуючи електроактивацію в якості ефективного комплексного процесу демінералізації. Встановлено, що електроактивація сприяє очищенню води від органічних речовин та перешкоджає утворенню біологічних відкладень на мембранах. Вперше створена схема стендової лабораторної установки для ефективного очищення води методом електроактивації. Розроблена конструкція проточного демінералізатору безперервної дії з електродами особливої конструкції. Експериментально встановлено, що застосування розробленого демінералізатору дозволяє очищувати 3 м³/годину морської мінералізованої води. Встановлені ефективні технологічні параметри для попереднього опріснення морської води перед її застосуванням в установках

Таблиця 2

Результати ступеня очищення морської води

Показники, які вимірювались	Ступінь очищення води X, %		
	Дослід 1	Дослід 2	Дослід 3
TDS, мг/дм ³	45,3	50,64	68,22
С, (Na ⁺), мг/дм ³	48,05	67,21	74,15
С, (K ⁺), мг/дм ³	76,06	78,40	80,10
С, (SO ₄ ²⁻), мг/дм ³	40,4	54,89	56,22
С, (Cl ⁻), мг/дм ³	49,28	58,61	58,99
С, (HCO ₃ ⁻), мг/дм ³	80,40	81,60	87,00
С, (Ca ²⁺), мг/дм ³	69,70	69,50	70,45
С, (Mg ²⁺), мг/дм ³	56,30	58,12	60,11

Результати попереднього очищення води методом електроактивації*

Показники, які вимірювались	Вихідна морська вода	Вода після очищення методом електроактивації	Ступінь очищення води X, %
TDS, мг/дм ³	9430	2997,08	68,22
C, (Na ⁺), мг/дм ³	4389	1097	74,15
C, (K ⁺), мг/дм ³	430	86	80,10
C, (SO ₄ ²⁻), мг/дм ³	1502	660,9	56,22
C, (Cl ⁻), мг/дм ³	1568	642,9	58,99
C, (HCO ₃ ⁻), мг/дм ³	256	33,28	87,00
C, (Ca ²⁺), мг/дм ³	370	111	70,45
C, (Mg ²⁺), мг/дм ³	915	366	60,11

*Електроактивацію води проводили впродовж 60 хвилин

зворотного осмосу. Експериментально доведено, що солеміст у вихідній морській воді суттєво знижується і процес попередньої підготовки води

методом електроактивації є таким, який можна рекомендувати для використання в промислових масштабах.

Список літератури:

1. Li Z.H, Ni G.W., Wang J.L., Zhou L., Yang Q., Li P.Z., Gao A.L., Yu T., Cheng L.H., Bi X.J. Fouling characteristic of reverse osmosis membrane for reclaimed water treatment operating under cold winter condition. *Desalination*. 2023. Volume 549. 116309. DOI: 10.1016/j.desal.2022.116309.
2. Shouman L.A., Afify R.M., Fadel D.A., Esawy M.H. Fouling effect on Reverse Osmosis (RO) membranes performance in desalination plant. *Desalination and Water Treatment*. 2024. Volume 319. 100502. DOI: 10.1016/j.dwt.2024.100502.
3. Wang P., Sun X., Wu X., Gao Y., Yang F. Yu., Optimizing reverse osmosis desalination from brackish waters: Predictive approach employing response surface methodology and artificial neural network models. *Journal of Membrane Science*. 2024. Volume 704. 122883. DOI: 10.1016/j.memsci.2024.122883.
4. Burlace L., Davies P.A., Fouling and fouling mitigation in batch reverse osmosis: review and outlook. *Desalination and Water Treatment*. 2022. Volume 249. P. 1-22. DOI: 10.5004/dwt.2022.28103.
5. Kuberkar V.T, Davis R.H. Modeling of fouling reduction by secondary membranes. *Journal of Membrane Science*. 2000. Volume 68. P. 243-258. DOI: 10.1016/S0376-7388(99)00324-5.
6. Ahmed M.A., Amin S., Ashraf A.M. Fouling in reverse osmosis membranes: monitoring, characterization, mitigation strategies and future directions. *Heliyon*. 2023. Volume 9. Issue 4, e14908. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14908.
7. Matin A., Laoui T., Falath W., Farooque M. Fouling control in reverse osmosis for water desalination & reuse: Current practices & emerging environment-friendly technologies. *Science of The Total Environment*. 2021. Volume 765. 142721. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142721.
8. Nthunya L.N., Bopape M.F., Mahlangu O.T., Mamba B.B., Van der Bruggen B., Quist-Jensen C.A, Richards H., Fouling, performance and cost analysis of membrane-based water desalination technologies: A critical review. *Journal of Environmental Management*. 2022. Volume 301. 113922. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113922.
9. Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M.T.H., Smakhtin, V., Kang, S.M. The state of desalination and brine production: A global outlook. *Sci. Total Environ*. 2019, Volume 657. P. 1343-1356. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.076.
10. Mika, Łukasz, Karol Sztékler, Tomasz Bujok, Piotr Boruta, and Ewelina Radomska. Seawater Treatment Technologies for Hydrogen Production by Electrolysis. A Review. *Energies*. 2024. Volume 17(24):6255. DOI: 10.3390/en17246255.
11. Shahzad, M.W., Burhan, M., Ang, L., Ng, K.C. Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability. *Desalination*. 2017. Volume 413. P. 52-64. DOI: 10.1016/j.desal.2017.03.009.
12. Curto D., Franzitta V., Guercio A. A review of the water desalination technologies. *Appl. Sci*. 2021. Volume 11. Issue 2. 670. DOI: 10.3390/app11020670.
13. Panagopoulos, A. Water-energy nexus: desalination technologies and renewable energy sources. *Environ Sci Pollut Res*. 2021. Volume 28., P. 21009-21022. DOI: 10.1007/s11356-021-13332-8.
14. Fendri F., Mitchenko T., Maletskyi Z. Optimization of the reverse osmosis seawater demineralization technologies for a power producing industry. *Desalination and Water Treatment*. 2011. Volume 25. Issue 1-3. P. 84-90. DOI: 10.5004/dwt.2011.1832.

15. Najid N., Hakizimana J.N., Kouzbour S., Gourich B., Ruiz-García A., Vial C., Stiriba Y., Semiat R. Fouling control and modeling in reverse osmosis for seawater desalination: A review. *Computers & Chemical Engineering*. 2022. Volume 162. 107794. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2022.107794.
16. Yun E.T., Lee J., Lee S.S., Hong S., Fortner J.D. Harnessing the potential of in-situ, electrically generated microbubbles via nickel foam for enhanced, low energy membrane fouling control. *Water Research*. 2024. Volume 249. 120886. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120886.
17. Sohn W., Guo W., Ngo H.H., Deng L., Cheng D., Zhang X. A review on membrane fouling control in anaerobic membrane bioreactors by adding performance enhancers. *Journal of Water Process Engineering*. 2021. Volume 40. 101867. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101867.
18. ai Y., Wu J., Shi S. Q., Li J., Kim K.H. Advances in desalination technology and its environmental and economic assessment. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Volume 397. 136498. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136498.
19. Seongpil Jeong, Yonghea Park, Seockheon Lee, Janghong Kim, Kwanhyung Lee, Jeawoo Lee, Hyo-Taek Chon. Pre-treatment of SWRO pilot plant for desalination using submerged MF membrane process: Trouble shooting and optimization. *Desalination*. 2011. Volume 279. Issues 1-3. P. 86-95. DOI: 10.1016/j.desal.2011.05.064
20. H. Chahinez, O. Incerti, G. Celano, M. Desopo, A. Ippolito, and S. Marianna Sanzani. Electrolyzed salt solutions used against major postharvest diseases of fresh fruit and vegetables. *Foods*. 2024. Volume 13. Issues 16: 2503. DOI: 10.3390/foods13162503.
21. Aider M., Gnatko E., Benali M., Plutakhin G., Kastyuchik A., Electro-activated aqueous solutions: Theory and application in the food industry and biotechnology. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2012. Volume 15. P. 38-49. DOI: 10.1016/j.ifset.2012.02.002.
22. Adal S., Kıyak B.D., Koç G.Ç., Süfer Ö., Karabacak A.Ö., Çinkır N.İ., Çelebi Y., Jeevarathinam G., Rustagi S., Pandiselvam R. Applications of electrolyzed water in the food industry: A comprehensive review of its effects on food texture. *Future Foods*. 2024. Volume 9. 100369. DOI: 10.1016/j.fufo.2024.100369.
23. Fabrizio K.A., Sharma R.R., Demirci A., Cutter C.N. Comparison of electrolyzed oxidizing water with various antimicrobial interventions to reduce Salmonella species on poultry. *Poultry Science*. 2002. Volume 81. Issue 10. P. 1598-1605. DOI: 10.1093/ps/81.10.1598.
24. Ромашенко М., Конаков Б., Поліщук В., Усатий, С. Електрохімічно активована вода (ЕХАВ): Історія відкриття, специфіка процесу, сучасний стан та перспективи її застосування в умовах зрощення. *Меліорація земель та водне господарство*. 2021. № 2. С. 177-189. DOI: 10.31073/mivg202102-291.
25. Солодовнік Т.В. Аналітична хімія: практикум. Черкаси, 2020. 308 с.
26. Маринін А., Шпак В, Пасічний В., Шубіна Є., Святненко Р. Вплив електрохімічно активованої води на функціонально-технологічні властивості та реологічні показники м'ясних паштетів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. 2023. № 2. Том 16. С. 79-85. DOI: 10.20998/2413-4295.2023.02.11.
27. Tayeh Y.A. A comprehensive review of reverse osmosis desalination: Technology, water sources, membrane processes, fouling, and cleaning. *Desalination and Water Treatment*. 2024. Volume 320. 100882. DOI: 10.1016/j.dwt.2024.100882.

Stolyarenko H.S., Koval M.G., Solodovnik T.V. RESEARCH ON THE EFFICIENCY OF ELECTROCHEMICAL PROTECTION OF MEMBRANES IN THE DESALIZATION OF HIGHLY MINERALIZED WATERS

The technology of reverse osmosis demineralization of seawater is accompanied by the formation of biological deposits on membranes. Therefore, the treatment of highly mineralized waters before their use in membrane plants is a pressing issue today. The article proposes to apply preliminary water treatment using electroactivation as an effective complex demineralization process, which is additionally accompanied by water purification from organic substances and prevents the formation of biological deposits on membranes. According to experimental data, the influence of electrochemical action on the composition of highly mineralized waters was determined and a scheme of a bench laboratory installation for water purification by electroactivation was proposed. As the main tank in this scheme, the developed design of the demineralizer was used, which is a flow-through and continuous operation with electrodes of a special design, which allows purifying 3 m³/hour of seawater mineralized water. The preliminary desalination of seawater before its use in reverse osmosis plants was carried out at the following technological parameters: current density 1.0–1.5 A/dm², the amount of electricity varied from 2.5 to 5.1 kW·h/m³. It was established that the use of the electroactivation method for seawater, which was taken from the Black Sea in the area of the Tiligul estuary, makes it possible to achieve a high degree (in the range from 45 to 70% (ion content and total salt content) of its purification during

primary demineralization. The article studies a method for achieving minimization of energy costs in the technology of demineralization of seawater. At the stage of preliminary desalination of water and before its entry into the membrane system, a reduction in electricity costs of 35-40% was achieved. It is proven that the salt content in the initial seawater is significantly reduced and the process of preliminary water preparation by the electroactivation method is one that can be recommended for use on an industrial scale.

Key words: *highlymineralized waters, electroactivation, membrane deposits, demineralization, desalination plants, reverse osmosis, degree of purification.*

Дата надходження статті: 28.07.2025

Дата прийняття статті: 09.08.2025

Опубліковано: 27.10.2025