

ЕКОЛОГІЯ ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 628.164; 504.062; 628.165

ГОМЕЛЯ М. Д., КРИЖАНОВСЬКА Я. П. *, МАКАРЕНКО І. М., ШАБЛІЙ Т. О., КИРИЛЮК О. С.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕРОБКИ РОЗЧИНІВ ХЛОРИДУ НАТРІЮ ЕЛЕКТРОДІАЛІЗОМ В ТРИКАМЕРНОМУ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРІ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВИСОКООСНОВНОГО АНІОНІТУ

Досліджено процеси переробки розчинів хлориду натрію, близьких за складом до концентратів зворотньоосмотичного знесолення води електродіалізом у трикамерному електролізері при використанні катіонної мембрани МА-40 та аніонної мембрани МА-41. Катодна камера заповнена розчином лугу концентрацією 50 мг-екв/дм³, анодна камера заповнена розчином хлориду натрію та високоосновним аніонітом АВ-17-8, робоча – розчином хлориду натрію. Показано, що ефективність окислення хлоридів зростає при підвищенні їх концентрації, збільшенні часу електролізу. Процес електролізу проходить з утворенням активного хлору та гіпохлориту. Крім даних речовин можливе утворення хлориту, хлорату та діоксиду хлору. Дегазація активного хлору та діоксиду хлору призводить до значних втрат окислених сполук хлору та до зниження виходу за струмом даних продуктів. Процес супроводжується суттєвим підкисленням аноліту, що сприяє прискоренню дегазації активного хлору, зниженню його виходу за струмом, зниженню інтенсивності дифузії хлоридів з робочої камери в анодну зону. Зменшенню втрат окислених сполук хлору сприяє використання високоосновного аніоніту який сорбує гіпохлорит-аніони, а також, в разі утворення, хлорит- та хлорат-аніони.

Ключові слова: зворотній осмос, концентрат, електродіаліз, знесолення, анодна щільність струму, вихід за струмом

DOI: 10.20535/2617-9741.2.2025.333975

* Corresponding author: yanamart93@ukr.net

Received 28 February 2025; Accepted 20 March 2025

Постановка проблеми. Процес знесолення високомінералізованих вод є досить багатофакторним процесом, який залежить від низки технічних, економічних та екологічних аспектів. Це важливий етап для отримання прісної води для її подальшого використання у різних сферах: від питного водопостачання до промисловості.

Щорічно проблема ефективного використання водних ресурсів та мінімізації негативного впливу виробничих процесів на довкілля набуває все більшої актуальності. Зростання чисельності населення, урбанізація та промислова діяльність призводять до збільшення використання водних ресурсів, що супроводжується підвищенням рівня їхнього забруднення.

Головними джерелами забруднення водного середовища є недостатньо очищені промислові та комунальні стічні води, відходи видобування корисних копалин, стоки сільськогосподарських підприємств, а також скиди шахтних вод у водойми. Водночас багато країн стикаються з дефіцитом прісної води, що змушує використовувати технології опріснення та знесолення мінералізованих вод.

Сучасні технології водоочищення мають важливе значення для забезпечення сталого розвитку. Одним із поширених методів знесолення мінералізованих вод є застосування методу зворотного осмосу. Ця технологія дозволяє ефективно знижувати солеміст, проте супроводжується утворенням концентратів, які містять значну кількість розчинених солей. Такі рідкі відходи потребують подальшої переробки чи утилізації для мінімізації їх негативного впливу на довкілля, оскільки неконтрольований скид таких концентратів у навколишнє середовище призводить до повторного забруднення водних об'єктів.

Переробка концентратів зворотньоосмотичного знесолення води є актуальним напрямком досліджень не лише в розрізі утилізації відходів, але й розвитку маловідходних ресурсоефективних виробництв, що вимагають впровадження інноваційних рішень та отримання вторинних корисних продуктів. Одним із перспективних підходів щодо реалізації процесів переробки розчинів хлориду натрію є застосування електрохімічних методів окислення хлоридів з отриманням гіпохлориту натрію та інших продуктів окисленого хлору - ефективних реагентів для знезараження води, відбілювання волокнистих матеріалів, дезінфекції різних середовищ.

Аналіз попередніх досліджень

Переробка засолених стічних вод чи концентратів що утворюються в процесах знесолення води є складною проблемою. Хлориди та сульфати – найбільш поширені аніони у мінералізованих природних та стічних водах. Якщо сьогодні відомі ефективні реагентні методи вилучення сульфатів із води, то економічно доцільні методи вилучення хлоридів невідомі. Основними джерелами забруднення води хлоридами є стічні води металургії, машинобудівної, хімічної, нафтохімічної та інших галузей промисловості. Особливо високі їх концентрації в шахтних водах. Часто зустрічаються природні солонуваті та солоні води з високим вмістом хлоридів.

Оскільки хлориди дуже добре розчиняються у воді та не піддаються біологічному розкладанню їх видалення із води – складним процесом. Найбільш ефективними методами для видалення хлоридів з води на сьогодні є мембранні методи [1, 2], іонний обмін [3, 4], сорбція [5].

Одним із простих методів вилучення розчинених речовин із води є сорбція, яка передбачає використання сорбентів, які поглинають або хімічно зв'язують іони поліюанта [6]. Цей метод застосовується і для видалення хлоридів із води. Для видалення хлоридів використовують різного роду сорбенти, які можуть бути природного або синтетичного походження. Це можуть бути цеоліти [5, 7], активоване вугілля, що виготовлене з антрациту, кокосової шкарлупи, волокон кокосу, або рисового лущиння [6], вуглецеві наноматеріали [8].

Часто на практиці застосовується та є досить поширеним (особливо при підготовці води для циркуляційних систем) метод іонного обміну [9, 10]. Його суть полягає у використанні іонообмінних смол – катіонітів чи аніонітів. Це штучні полімери, які мають велику кількість функціональних груп, здатних до іонного обміну. Процес знесолення починається з використання катіонітів у кислій формі для видалення катіонів, після чого на аніонітах у OH^- -формі нейтралізується залишкова кислотність і видаляються аніони. Іонний обмін може використовуватись для одночасного видалення і сульфатів і хлоридів які в подальшому підлягають вилученню з регенераційних розчинів. Для видалення аніонів на практиці найчастіше використовують високоосновний аніоніт АВ-17-8 [10] в основній або карбонатній формі, який забезпечує ефективність очищення води від хлоридів на рівні до 90 %. Одночасно із знесоленням при використанні такого типу іоніту відбувається і пом'якшення води за рахунок підлужнення.

Високим ступенем демінералізації вирізняються мембранні методи [11]. Їх суть полягає в використанні напівпроникних мембран для розділення розчинів. Основною рушійною силою в цих методах є різниця тисків, концентрацій або електричних потенціалів по обидва боки мембрани.

Зворотний осмос є одним із найбільш ефективних методів мембранної демінералізації води, що дозволяє ефективно видаляти розчинені солі, завислі речовини, органічні речовини, бактерії і віруси. Цей метод широко застосовується для водопідготовки як в побутовому так і промисловому секторі. Його використовують для отримання ультра чистої води для напівпровідників. Досить часто мембранний метод знесолення води використовують і для видалення хлоридів [12]. Метод мембранної дистиляції ґрунтується на випаровуванні води через незмочувану гідрофобну мембрану, яка не пропускає рідину, але дозволяє пароподібній фазі проходити крізь неї. Цей процес ефективний для концентрування розчинів [13]. Все більшого поширення набуває і метод електродіалізу, рушійною силою якого є різниця потенціалів [14]. Принцип роботи такого методу полягає в використанні електролізера з іонообмінними мембранами, що розділяють воду на очищену та концентровану фракції. Серед інших методів, що ґрунтуються на використанні електричного поля також використовується електросорбція та електрокоагуляція. Практично для всіх процесів опріснення води критичною лімітуючою проблемою є утворення відходів – концентрованих сольових розчинів. Переробка цих концентратів є серйозною проблемою через обмеженість варіантів їхньої безпечної утилізації. Випаровування та сушіння є надто енергозатратними процесами [15], що породжують іще складнішу проблему – захоронення відходів. Методи виморожування розчинів недостатньо ефективні і потребують використання складного технологічного обладнання.

У зв'язку з цим серед вище перелічених методів демінералізації найбільш перспективним можна вважати електродіаліз. Він може бути досить ефективним у видаленні солей з води навіть у важких умовах і у

випадках низької концентрації солей. Разом з тим метод електродіалізу використовується і для отримання хлору, каустичної соди, сульфатної кислоти, що дозволяє в перспективі в якості вихідної сировини використовувати рідкі відходи розчинів солей з отриманням вторинних продуктів.

Метою статті є дослідження процесів електрохімічної переробки розчинів хлориду натрію – відходів процесів знесолення вод, що містять хлориди в трикамерних електролізерах з отриманням окислених сполук хлору і розчинів луку, визначення ефективності уловлювання активного хлору в анодній камері з допомогою високоосновного аніоніту.

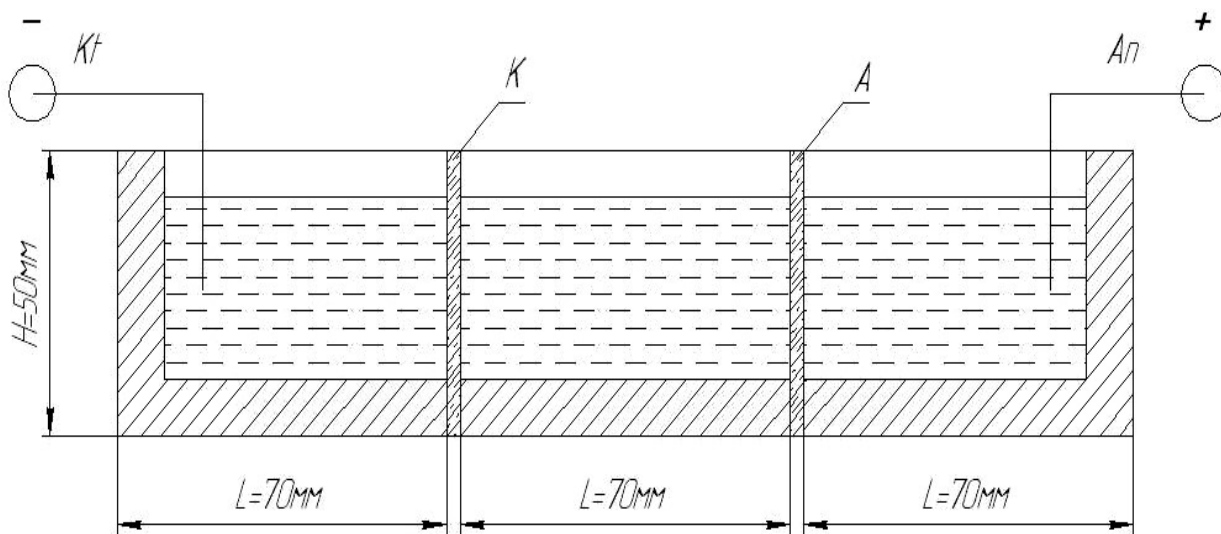
Для досягнення поставленої мети вирішували наступні завдання:

- 1) Визначали параметри процесу ефективного очищення розчинів від хлориду натрію в робочій камері трикамерного електролізера в залежності від концентрації хлориду натрію та анодної щільності струму.
- 2) Досліджували ефективність уловлювання активного хлору в анодній області високоосновним аніонітом в залежності від параметрів процесу електролізу.

Методика роботи. В процесі використовували двокамерний та трикамерний електролізери, які зображені на рис. 1. В якості катоду використовувалась пластина з легованої сталі 12X18H10T. В якості аноду використовували пластину з титану, яка вкрита оксидом рутенію. Площа електродів $S_K = S_A = 0,12 \text{ дм}^2$. Електроліз проводили при силі струму 0,5 А.

При використанні трикамерного електролізера в катодній області був розміщений 0,05 Н розчин NaOH, в робочій камері – розчини хлориду натрію концентрацією 420 та 1090 мг-екв/дм³, а в анодній камері – аніоніт АВ-17-8 об'ємом 140 см³ та розчини хлориду натрію з $C_{Cl-}=54,67 \text{ мг-екв/дм}^3$ та $C_{Cl-}=164 \text{ мг-екв/дм}^3$ об'ємом 50 см³.

При проведенні електролізу через однакові проміжки часу в катодній області визначали лужність; в робочій камері – концентрацію хлоридів [16] та лужність або кислотність; в анодній камері визначали концентрацію хлоридів, активного хлору та кислотність [17].



K_t – катод із легованої сталі 12X18H10T; A_n – анод із алюмінію чи титану з покриттям оксидом рутенію, A – аніонообмінна мембрана МА-41, K – катіонообмінна мембрана МК-40, $S_a = S_k = 0,12 \text{ дм}^2$, $J = 4,17 \text{ А/дм}^2$.

Рис. 1 – Трикамерний електролізер

Також в процесі електролізу визначали обмінну ємність аніоніту по активному хлору. Для цього певний об'єм іоніту поміщали в колбу та заливали розчином сульфату натрію певної концентрації. Колбу герметично закривали та залишали на добу. На наступну добу визначали залишкову кількість активного хлору в розчині йодометричним методом [17].

Обмінну ємність іоніту розраховували за формулою:

$$OE = \frac{(C_0 - C_k) \cdot V_p}{V_i} \quad (1)$$

де C_0 – початкова концентрація розчину сульфіту натрію, мг-екв/дм³;

C_k – кінцева концентрація розчину сульфіту натрію, мг-екв/дм³;

V_p – об'єм розчину, дм³;

V_i – об'єм іоніту, дм³.

Вихід за струмом (В, %) розраховували як відношення реальної кількості речовини, перенесеної при електролізі, до теоретичної кількості речовини, розрахованої за законом Фарадея:

$$B = q_p / q_T \cdot 100 = m_{\phi} / m_T \cdot 100 \quad (2)$$

де q_p – кількість електрики, яка реально витрачена на перенесення грам-еквіваленту речовини;

q_T – теоретично розрахована кількість електрики, яка необхідна для перенесення грам-еквіваленту речовини;

m_{ϕ} – кількість фактично перенесеної речовини, г-екв;

m_T – теоретично визначена кількість перенесеної речовини, г-екв.

Кількість фактично перенесеної речовини розраховували, виходячи з різниці концентрацій і об'єму розчину. Теоретичну кількість перенесеної речовини (г-екв) визначали за формулою:

$$m_i = K_e \cdot I \cdot t \quad (3)$$

де K_e – електрохімічний еквівалент (0,03731 г-екв/(А·год));

I – сила струму, А;

t – час, год.

Ефективність очищення води від хлоридів (Е, %) розраховували за формулою:

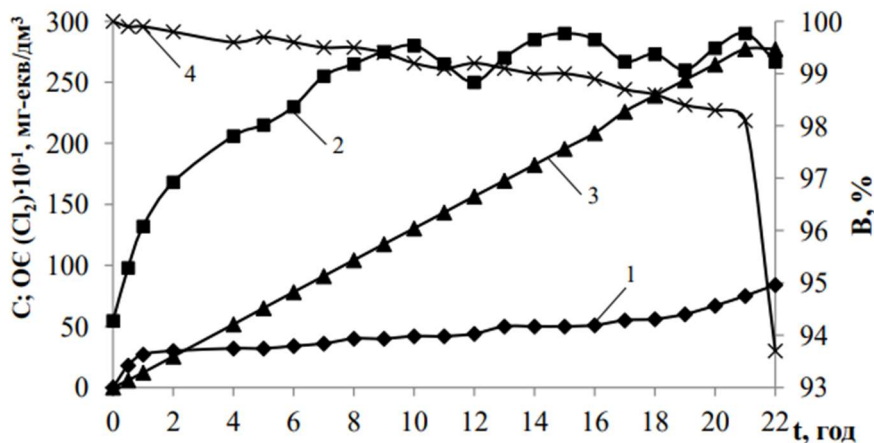
$$E = \left(\frac{C_0 - C}{C_0} \right) \cdot 100, \% \quad (4)$$

де C_0 – початкова концентрація розчину,

C – концентрація розчину в період часу (t , год).

Виклад основного матеріалу. Для переробки розчинів хлориду натрію використовували трикамерні електролізери, анодна камера в яких була заповнена аніонітом. Катодна камера в даному випадку була заповнена слабким розчином лугу і призначалась для отримання більш концентрованих розчинів лугу. Від робочої камери вона відділена катіонною мембраною. В робочій (середній) камері розміщували розчини, що містять хлорид натрію. В анодній камері крім розчину хлориду натрію розміщали аніоніт АВ-17-8 в хлоридній формі. Концентрація хлориду натрію в робочій камері сягала 420 мг-екв/дм³ (рис. 2, 3), в анодній камері 54,7 мг-екв/дм³ (рис. 2) та 164 мг-екв/дм³ (рис. 3). В обох випадках початкова лужність у катодній камері сягала ~ 50 мг-екв/дм³. Електроліз проводили, періодично змінюючи розчин у робочій камері. При цьому контролювали лужність (кислотність) в усіх трьох камерах, концентрацію хлоридів в робочій та анодній камері, концентрацію активного хлору в анодній камері та ємність іоніту по активному хлору. Як видно з рис. 2 та 3 концентрація активного хлору в анодній камері зростала повільно.

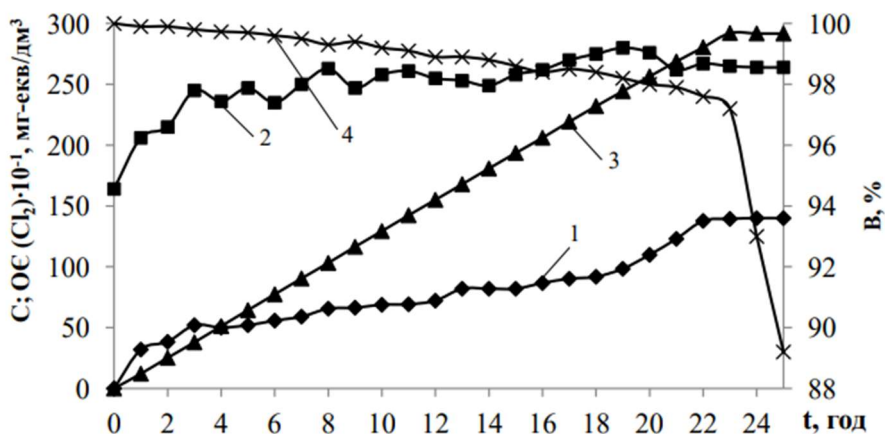
Більший приріст концентрації активного хлору в аніоніті спостерігався в разі вищої початкової концентрації хлоридів в анодній камері. В обох випадках по мірі проходження електролізу ємність аніоніту по окислених сполуках хлору зростала і сягала 2800–2900 мг-екв/дм³ за активним хлором.



Характеристика процесу: $C_{Cl_2 \text{ ан. кам.}}$ (1), $C_{Cl^- \text{ роб. кам.}}$ (2), $OЕ_{Cl_2}$ (3), B (4)

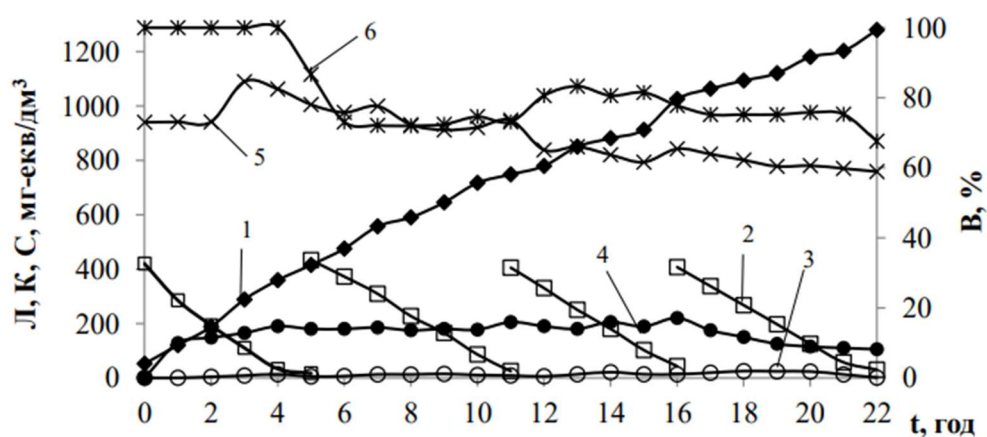
Рис. 2 – Залежність концентрації активного хлору (1) та хлоридів (2) в анодній камері, обмінної ємності аніоніту АВ-17-8 по активному хлору (3) та вихід за струмом активного хлору (4) в анодній камері трикамерного електролізера від часу електролізу при концентрації хлоридів = 54,7 мг-екв/дм³ та об'ємі іоніту 140 см³ в анодній камері, при концентрації хлоридів = 420 мг-екв/дм³ в робочій камері і при лужності 52 мг-екв/дм³ в катодній камері ($I = 0,5$ А, $f_a = f_k = 12$ см², $j = 4,17$ А/дм²)

Вихід за струмом по окислених сполуках хлору поступово знижувався. В процесі електролізу спостерігалось постійне підвищення лужності католіту (рис. 4). При цьому після 5–6 годин електролізу, коли концентрація хлоридів в робочій камері знижувалась до 17–43 мг-екв/дм³, розчин у робочій камері замінювали на вихідний.



Характеристика процесу: $C_{Cl_2 \text{ ан. кам.}}$ (1), $C_{Cl^- \text{ роб. кам.}}$ (2), $OЕ_{Cl_2}$ (3), B (4)

Рис. 3 – Залежність концентрації активного хлору (1) та хлоридів (2) в анодній камері, обмінної ємності аніоніту АВ-17-8 по активному хлору (3) та вихід за струмом активного хлору (4) в анодній камері трикамерного електролізера від часу електролізу при концентрації хлоридів = 164 мг-екв/дм³ та об'ємі іоніту 140 см³ в анодній камері, при концентрації хлоридів = 420 мг-екв/дм³ в робочій камері і при лужності 49 мг-екв/дм³ в катодній камері ($I = 0,5$ А, $f_a = f_k = 12$ см², $j = 4,17$ А/дм²)

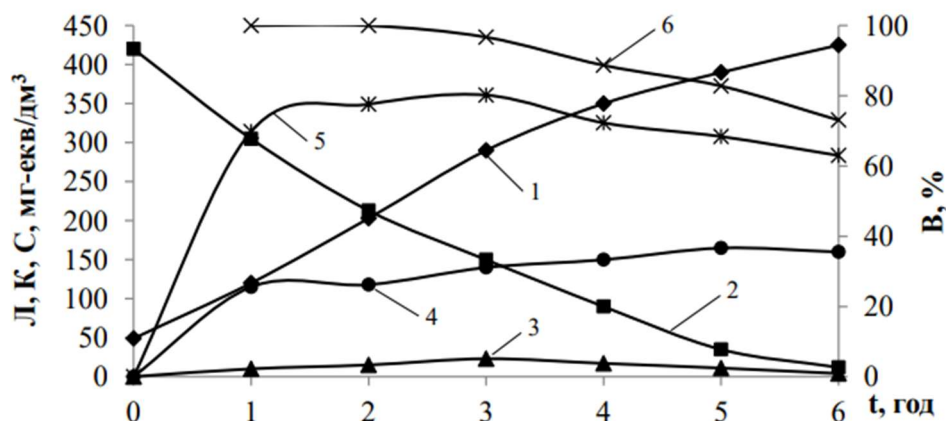


Характеристика процесу: $L_{кат}$ (1), $C_{Cl-роб. кам.}$ (2), $K_{роб. кам.}$ (3), $K_{ан. кам.}$ (4), $ВОН-кат. кам.$ (5), $В_{Cl-роб. кам.}$ (6)

Рис. 4 – Зміна лужності в катодній камері (1), концентрації хлоридів в робочій камері (2), кислотності в робочій (3) та анодній (4) камерах, виходу лугу за струмом в катодній камері (5) та дифузії хлоридів (6) з робочої камер в анодну камеру трикамерного електролізера з часом електролізу при початковій концентрації хлоридів в анодній камері 54,7 мг-екв/дм³, в робочій камері 420 мг-екв/дм³, об'ємі аніоніту в анодній камері 140 см³ при початковій лужності в катодній камері 52 мг-екв/дм³ ($I = 0,5$ А, $f_a = f_k = 12$ см², $j = 4,17$ А/дм²)

Слід відмітити, що в процесі електролізу відбувалось часткове підкислення робочого розчину та значне підкислення аноліту. Обумовлено це дифузійними та електродними процесами.

На катоді постійно відбувається утворення водню та гідроксид-аніонів. Вихід за струмом лугу, як видно з рис. 4 та 5 був на рівні 60–75 %. Обумовлено це тим, що при підкисленні робочого розчину в катоді дифундують не лише катіони натрію з утворенням лугу, але і протони, які нейтралізують гідроксид-аніони, які утворились на катоді і спричиняють, в результаті, зниження лужності католіту.



Характеристика процесу: $L_{кат}$ (1), $C_{Cl-роб. кам.}$ (2), $K_{роб. кам.}$ (3), $K_{ан. кам.}$ (4), $ВОН-кат. кам.$ (5), $В_{Cl-роб. кам.}$ (6)

Рис. 5 – Зміна лужності в катодній камері (1), концентрації хлоридів в робочій камері (2), кислотності в робочій (3) та анодній (4) камерах, виходу лугу за струмом (5) в катодній камері та дифузії хлоридів (6) з робочої камери в анодну камеру трикамерного електролізера з часом електролізу при початковій концентрації хлоридів в анодній камері 164 мг-екв/дм³, в робочій камері 420 мг-екв/дм³, об'ємі аніоніту в анодній камері 140 см³ при початковій лужності в катодній камері 49 мг-екв/дм³ ($I = 0,5$ А, $f_a = f_k = 12$ см², $j = 4,17$ А/дм²)

Підкислення аноліту обумовлено анодними процесами, які протікають як з участю хлоридів (реакції 5 та 6) так і при окисленні води (реакція 7). Очевидно, що гіпохлорит-аніони сорбуються на аніоніті і це забезпечує зниження втрат окислених сполук хлору у вигляді Cl_2 та ClO_2 .



Підвищення кислотності в аноліті, яка інколи перевищує 200 мг-екв/дм³, призводить до погіршення дифузії хлоридів з робочої камери в анодну область. Це пов'язано з тим, що при значній кислотності в анодній області посилюється дифузія гідроксид-аніонів з робочої області в анодну. В даному випадку, не дивлячись на низьку концентрацію гідроксид-аніонів в робочій камері, через значну кислотність в анодній камері різниця концентрацій гідроксид-аніонів в цих камерах стає достатньою, щоб вони створили конкуренцію по дифузії в анодну камеру хлоридам. Це спричиняє значне зниження виходу за струмом по дифузії хлоридів. Очевидно, що підвищення швидкості дифузії гідроксид-аніонів з робочої в анодну камеру спричиняє певне підкислення робочого розчину. Це, в свою чергу, призводить до міграції протонів з робочої в катодну камеру та до зниження виходу за струмом лугу в католіті.

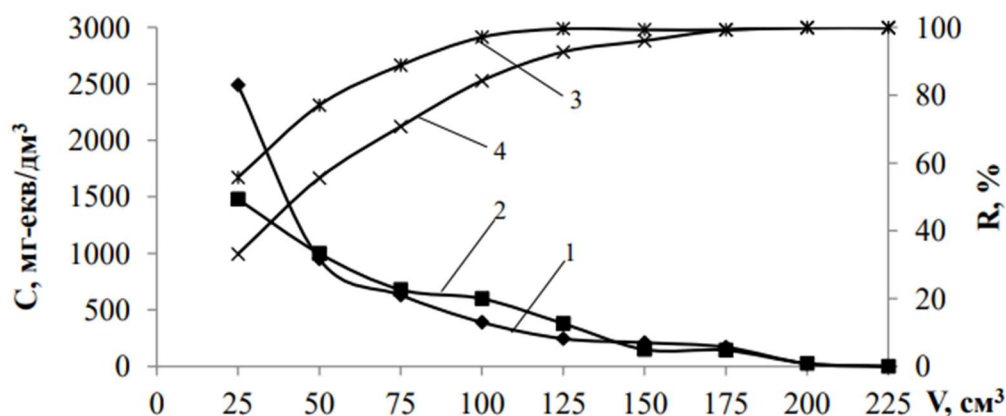
Усе це добре підтверджують дані приведені на рис. 4 та 5. Так за 22 години електролізу вихід за струмом по дифузії хлоридів з робочої камери в анодну знизився із 100 % до 67,6 %, а за 6 годин із 100 % до 73,1 %. Вихід лугу в католіті склав відповідно 73,1–58,9 % та 70,0–63,0 %. При цьому кислотність в аноліті виросла за 4 години до 180–190 мг-екв/дм³ і протягом 10–15 годин залишалась на рівні 160–220 мг-екв/дм³.

При цьому підкислення аноліту призводить до сповільнення реакції виділення з води кисню, що сприяє проходженню конкуруючої реакції окислення хлоридів до активного хлору. З іншої сторони підкислення аноліту не бажане, тому що спричиняє розкладання гіпохлорит- та хлорит-аніонів з утворенням Cl_2 та ClO_2 , що виділяються з розчину у вигляді газів. Застосування аніоніту в значній мірі дозволяє підвищити ефективність уловлювання активного хлору за рахунок зв'язування гіпохлорит- та хлорит-аніонів.

Значною перевагою даного методу є переведення аніоніту з сольової хлоридної форми в гіпохлоритну. Звичайно, даний аніоніт можна використовувати для знезараження води, так як з нього десорбуються окислені сполуки хлору при фільтруванні через нього води, включаючи звичайні поверхневі води із жорсткістю і лужністю до 4–5 мг-екв/дм³ та із вмістом хлоридів і сульфатів до 100–150 мг/дм³. Але головною перешкодою в даному процесі є ускладнення технологій використання аніоніту в хлоритній або гіпохлоритній формі через необхідність транспортування іоніту до місця використання та при поверненні відпрацьованого іоніту в сульфатній або хлоридній формі. Це необхідно тому, що вартість аніоніту є високою і його доцільно використовувати багаторазово. Тому нами були вивчені процеси десорбції сполук окисленого хлору з аніоніту при обробці його розчинами лугу та соди. Результати приведені на рис. 6. Як видно з рисунку 6 аніони ClO^- та ClO_2^- добре десорбуються з аніоніту як розчином лугу так і розчином соди. При використанні 5 об'ємів розчину на 1 об'єм іоніту при використанні розчину лугу ступінь регенерації іоніту сягає 97 %, а при використанні розчину соди ступінь десорбції окислених сполук хлору сягає 84 %. При цьому загальна концентрація по активному хлору при використанні лугу сягала 4 %, а при використанні соди – 3,3 %.

В разі, коли регенерацію аніоніту проводили при витраті 2,5-х об'ємів розчину на 1 об'єм іоніту концентрація активного хлору в розчині лугу сягає 6,1 %, в розчині соди 4,4 %. Такі розчини доцільно використовувати для знезараження води. Тому варто проводити дробну регенерацію із використанням першої частини розчину як реагенту для знезараження води, а другу частину для регенерації іоніту на наступному етапі. Далі для повної регенерації іоніту доцільно використовувати чисті розчини лугу та соди з подальшим їх застосуванням на попередніх стадіях регенерації. Відрегенований іоніт доцільно використовувати для вилучення хлоридів з води або відпрацьованих елюатів. Після переведення іоніту в хлоридну форму замість лужної регенерації доцільно проводити його обробку в анодній камері електролізера з переведенням в гіпохлоритну або хлоритну форму. Після цього аніоніт доцільно регенерувати лугом чи розчином соди.

Таким чином в якості відходів будуть утворюватись розчини, придатні для знезараження води, очищення її від сполук марганцю та заліза.



Параметри процесу: C_{Cl_2} (1; 2), R (3; 4)
 Регенераційні розчини: NaOH 5 % (1; 3), Na₂CO₃ 15 % (2; 4)

Рис. 6 – Залежність концентрації активного хлору (1, 2) та ступеню десорбції (R) гіпохлоритів та хлоритів (3, 4) від пропущених об'ємів 5 %-го розчину лугу (1, 3) та 15 %-го розчину соди (2, 4) через аніоніт АВ-17-8 в хлоритно-гіпохлоритній формі

Висновки

1. Проведені дослідження показали, що при використанні трикамерного електролізера досягнуто значного очищення робочих розчинів від хлориду натрію (до 98-99 %) за рахунок дифузії іонів натрію в катодну зону з утворенням луку та хлоридів в анодну зону з утворенням активного хлору;

2. Встановлено, що анодні процеси проходять з підкисленням аноліту за рахунок утворення активного хлору та його взаємодії з водою та електрохімічного окислення води на аноді з утворенням кисню та протонів. Це знижує ефективність дифузії хлоридів з робочої камери в анодну область та спричиняє інтенсифікацію дегазації активного хлору.

3. Суттєве зменшення втрат активного хлору забезпечує аніоніт АВ-17-8, який сорбує > 90 % активного хлору у вигляді гіпохлориту. Показано, що гіпохлорит-аніони легко десорбуються з аніоніту розчином луку та соди.

Перспективи подальших досліджень. Враховуючи значну дегазацію активного хлору з анодної камери доцільно продукти електролізу уловлювати в абсорбери з розчином луку. Це можливо при використанні герметичного електролізера.

Список використаної літератури

1. Malaeb, L., Ayoub, G. M., Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review, *Desalination*, 2011, Vol. 267, No. 1, P. 1-8; <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.09.001>
2. Subramani, A., Jacangelo, J. G., Treatment technologies for reverse osmosis concentrate volume minimization: A review, *Separation and Purification Technology*, 2014, Vol. 122, P. 472-489; <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.12.004>
3. Gomelya M., Hrabitchenko V., Trohimennko A., Shabljiy T., Research into ion exchange softening of highly mineralized waters, *СхідноЄвропейський журнал передових технологій*, 2016, № 4/10 (82), С. 4-9; <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75338>
4. Кучерик Г.В., Омельчук Ю.А., Гомеля М.Д., Дослідження процесів пом'якшення при демінералізації шахтних вод на аніоніт АВ-17-8, *Східноєвропейський журнал передових технологій*, 2013, № 2/11 (62), С. 35-38.
5. Shokrian F., Solaimani K., Nematzadeh G. H., Biparva P., Removal of NaCl from aqueous solutions by using clinoptilolite, *F. Shokrian, Intl J Farm & Alli Sci*, 2015, V. 4(1), P. 50 – 54;
6. Mohan D., Kunwar P. S., Vinod K. S., Wastewater treatment using low cost activated carbons derived from agricultural byproducts – *Hazardous Mater*, 2008, V. 152, № 3, P. 1045-1053; <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.079>
7. Polcaro, M., Vacca, A., Mascia, M., Ferrara, F., Product and byproduct formation in electrolysis of dilute chloride solutions. – *Journal of Applied Electrochemistry*, 2008, Vol. 38, P. 979-984; <http://dx.doi.org/10.1007/s10800-008-9509-3>

8. Tofighy A. M., Mohammadi T., Salty water desalination using carbon nanotube sheets – Desalination, 2010, V. 258, № 3, P. 182–186.; <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2010.03.017>
9. Смирнов О. О., Тульський Г. Г., Удосконалення електрохімічного способу одержання водних розчинів NaClO, Вісник НТУ «ХПІ», 2008, № 10, С. 163–167.
10. Wenna W., Hai J., Wenzhi Z., Bang L., Dawei J., Pollutant mass distribution in the organic pollution RO system – Industrial water treatment, 2015, V 35, №5, P. 34–38;
11. Xiao-an C. Підготовка води з підвищеним вмістом солі з використанням мембранної технології, С. Xiao-an, W. Xin-hua, Yingyong huagong, 2009, V. 25, №16, P. 41–43.
12. Naidu L. D., Saravanan S., Chidambaram M., Goel M., Das A., Sarat J., Babu C., Nanofiltration in Transforming Surface Water into Healthy Water: Comparison with Reverse Osmosis, Journal of Chemistry, 2015, V. 2015, P. 1–6; <https://doi.org/10.1155/2015/326869>
13. Бурбан А., Мембранна дистиляція в процесах водопідготовки, знесолення та очищення стічних вод, Накові записки. Том 137, Хімічні науки та технології, 2014, С. 15–23.
14. Шаблій Т. О., Електрохімічна переробка відпрацьованих розчинів, що утворюються при регенерації катіонітів, Т.О. Шаблій, М.Д. Гомеля, Є.М. Панов, «Екологія и промышленность», 2010, № 2, с. 33–38.
15. Pérez-González, A., et al., State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates, Water Research, 2012, Vol. 46, No. 2, P. 267–283; <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.10.046>
16. Набиванець Б. Й., Аналітична хімія природного середовища, Б. Й. Набиванець, В. В. Сухан, Л. В. Калабіна, К.: Либідь, 1996, 201 с.
17. Калашнік І. М., Стельмах С. П. Контроль якості води, видавництво: ХНУМГ, 2020.

Mykola Gomelya, Yana Kryzhanovska, Iryna Makarenko, Tetyana Shablii, Oleksandr Kyrylyuk

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE PROCESSING OF SODIUM CHLORIDE SOLUTIONS BY ELECTRODIALYSIS IN A THREE-CHAMBER ELECTROLYZER USING A HIGH-BASIC ANIONITE

The desalination process of highly mineralized waters is a rather multifactorial process that depends on a number of technical, economic and environmental aspects. This is an important stage for obtaining fresh water for its further use in various areas: from drinking water supply to industry. Processing of reverse osmosis water desalination concentrates is a relevant area of research not only in terms of waste disposal, but also in the development of low-waste resource-efficient production, which requires the implementation of innovative solutions and obtaining secondary useful products. One of the promising approaches to the implementation of processes for processing sodium chloride solutions is the use of electrochemical methods of chloride oxidation to obtain sodium hypochlorite and other products of oxidized chlorine - effective reagents for water disinfection, bleaching of fibrous materials, disinfection of various environments. The aim of the article is to study the processes of electrochemical processing of sodium chloride solutions - waste from the processes of desalination of water containing chlorides in three-chamber electrolyzers with the production of oxidized chlorine compounds and alkali solutions, determining the efficiency of capturing active chlorine in the anode chamber using a highly basic anion exchanger. To achieve the set goal, the following tasks were solved: - The parameters of the process of effective purification of solutions from sodium chloride in the working chamber of a three-chamber electrolyzer were determined depending on the concentration of sodium chloride and the anode density of the steam. - The efficiency of capturing active chlorine in the anode region by a highly basic anion exchanger was studied depending on the parameters of the electrolysis process. The processes of processing sodium chloride solutions, close in composition to the concentrates of reverse osmosis water desalination by electrodialysis in a three-chamber electrolyzer using a cationic membrane MA-40 and anionic membrane MA-41, were studied. The cathode chamber is filled with an alkali solution with a concentration of 50 mg-eq/dm³, the anode chamber is filled with a sodium chloride solution and highly basic anion exchanger AB-17-8, the working chamber is filled with a sodium chloride solution. During electrolysis, alkalinity was determined at equal intervals in the cathode region; in the working chamber, the concentration of chlorides and alkalinity or acidity; in the anode chamber, the concentration of chlorides, active chlorine, and acidity were determined. Also, during the electrolysis process, the exchange capacity of the anion exchanger for active chlorine was determined. For this, a certain volume of the anion exchanger was placed in a flask and filled with a sodium sulfite solution of a certain concentration. The flask was hermetically sealed and left for a day. The next day, the residual amount of active in the solution was determined by the iodometric method. It has been shown that the efficiency of chloride oxidation increases with

increasing their concentration and increasing the electrolysis time. The electrolysis process proceeds with the formation of active chlorine and hypochlorite. In addition to these substances, the formation of chlorite, chlorate and chlorine dioxide is possible. Degassing of active chlorine and chlorine dioxide leads to significant losses of oxidized chlorine compounds and to a decrease in the current yield of these products. The process is accompanied by significant acidification of the anolyte, which contributes to the acceleration of degassing of active chlorine, a decrease in its current yield, and a decrease in the intensity of chloride diffusion from the working chamber to the anode zone. The use of a highly basic anion exchanger that adsorbs hypochlorite anions, as well as, in the case of formation, chlorite and chlorate anions, contributes to the reduction of losses of oxidized chlorine compounds.

Keywords: reverse osmosis, concentrate, electrodialysis, desalination, anodic current density, current output

References

1. Malaeb, L. & Ayoub, G.M., (2011). Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review. *Desalination*, 267(1), pp.1–8. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.09.001>
2. Subramani, A. & Jacangelo, J.G., (2014). Treatment technologies for reverse osmosis concentrate volume minimization: A review. *Separation and Purification Technology*, 122, pp.472–489. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.12.004>
3. Gomelya, M., Hrabitchenko, V., Trohimennko, A. & Shabl'ij, T., (2016). Research into ion exchange softening of highly mineralized waters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(10(82)), pp.4–9. Available at: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75338>
4. Kucheryk, H.V., Omelchuk, Yu.A. & Homelia, M.D., (2013). Doslidzhennia protsesiv pomiakshennia pry demineralizatsii shakhtnykh vod na anionit AV-17-8. *Skhidnoievropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, 2(11(62)), pp.35–38.
5. Shokrian, F. et al., (2015). Removal of NaCl from aqueous solutions by using clinoptilolite. *International Journal of Farm & Allied Sciences*, 4(1), pp.50–54.
6. Mohan, D., Kunwar, P.S. & Vinod, K.S., (2008). Wastewater treatment using low cost activated carbons derived from agricultural byproducts. *Journal of Hazardous Materials*, 152(3), pp.1045–1053. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.079>
7. Polcaro, M. et al., (2008). Product and byproduct formation in electrolysis of dilute chloride solutions. *Journal of Applied Electrochemistry*, 38, pp.979–984. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s10800-008-9509-3>
8. Tofighy, A.M. & Mohammadi, T., (2010). Salty water desalination using carbon nanotube sheets. *Desalination*, 258(3), pp.182–186. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2010.03.017>
9. Smyrnov, O.O. & Tuls'kyi, H.H., (2008). Udoskonalennia elektrokhimichnoho sposobu oderzhannia vodnykh rozchyniv NaClO. *Visnyk NTU «KhPI»*, 10, pp.163–167.
10. Wenna, W. et al., (2015). Pollutant mass distribution in the organic pollution RO system. *Industrial Water Treatment*, 35(5), pp.34–38.
11. Xiao-an, C., Xin-hua, W. & Yingyong, H., (2009). Pidhotovka vody z pidvyshchenym vmistom soli z vykorystanniam membrannoi tekhnolohii. *Yingyong Huagong*, 25(16), pp.41–43.
12. Naidu, L.D. et al., (2015). Nanofiltration in transforming surface water into healthy water: Comparison with reverse osmosis. *Journal of Chemistry*, pp.1–6. <https://doi.org/10.1155/2015/326869>
13. Burban, A., (2014). Membranna dystyliatsiia v protsesakh vodopidhotovky, znesolennia ta ochyshchennia stichnykh vod. *Naukovi zapysky. Tom 137, Khimichni nauky ta tekhnolohii*, pp.15–23.
14. Shabl'ii, T.O., Homelia, M.D. & Panov, Ye.M., (2010). Elektrokhimichna pererobka vidpratsovanykh rozchyniv, shcho utvoriuiutsia pry reheneratsii kationitiv. *Ekologichna promyslovist*, 2, pp.33–38.
15. Pérez-González, A. et al., (2012). State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates. *Water Research*, 46(2), pp.267–283. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.10.046>
16. Nabyvanets, B.Y., Sukhan, V.V. & Kalabina, L.V., (1996). *Analychna khimiia pryrodnoho seredovyshcha*. Kyiv: Lybid.
17. Kalashnik I. M., Stelmakh S. P. Kontrol yakosti vody, vydavnytstvo: KhNUMG, 2020.