

УДК 628.15

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.16

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕРОБКИ КОНЦЕНТРОВАНИХ РОЗЧИНІВ ХЛОРИДУ НАТРІЮ З ОТРИМАННЯМ АЛЮМІНІЄВОГО КОАГУЛЯНТУ

Я. П. КРИЖАНОВСЬКА, М. Д. ГОМЕЛЯ, Т. О. ШАБЛІЙ*, А. К. ВАКУЛЕНКО

кафедра екології та технології рослинних полімерів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського, Київ, УКРАЇНА

*e-mail:dsts1@ukr.net

АНОТАЦІЯ У роботі досліджені процеси електрохімічної переробки розчинів хлориду натрію з отриманням хлориду алюмінію і луку в трикамерному електролізері з аніонообмінною мембраною МА-41 і катіонообмінною мембраною МК-40 та в двокамерному електролізері з катіонообмінною мембраною МК-40. Представлений спосіб переробки сольових концентратів із застосуванням розчинного алюмінієвого аноду є економічно доцільним, так як у результаті електролізу одночасно відбувається демінералізація рідких відходів до рівня нормативних вимог та виробництво з вихідних концентратів товарної продукції. Недоліком представленого способу отримання коагулянту є взаємодія алюмінію із водою. Проте, доведено, що із підвищенням анодної щільності струму під час електролізу вихід хлориду алюмінію практично повністю обумовлений електрохімічним розчиненням аноду, а хімічне розчинення алюмінію майже відсутнє. Стабільність отриманих розчинів коагулянтів протягом тривалого часу підтримується низькими значеннями реакції середовища ($pH \leq 3$). Так, при силі струму 1 А (щільність струму $8,34 \text{ А/дм}^2$) та вихідній концентрації хлориду натрію 1900 мг-екв/дм^3 сумарна концентрація іонів алюмінію в отриманому розчині досягає 3884 мг-екв/дм^3 . На хімічно розчинений алюміній припадає не більше 12 %. За даних вихідних параметрів вихід іонів алюмінію з урахуванням хімічного розчинення аноду складає 100–108 %. Одночасно в катодній камері відбувається концентрування луку до рівня приблизно 1500 мг-екв/дм^3 . Його вихід за струмом при цьому сягає 92 %. Ступінь дифузії хлорид-іонів через аніонообмінну мембрану з робочої камери в анодну область становить 99 %. Показано, що процес електролізу розчину хлориду натрію в двокамерному електролізері з катіонообмінною мембраною проходить не так ефективно, як у випадку із застосуванням трикамерного електролізера. На початковій стадії процесу вихід за струмом становить по хлориду алюмінію 61 %, а по луку 64 %. У подальшому через отруєння катіонообмінної мембрани катіонами алюмінію, що блокують всі аніонні функціональні групи даної мембрани, процес припиняється.

Ключові слова: електродіаліз; коагулянт; хлорид алюмінію; катод; анод; знесолення води; гідроксохлориди алюмінію

EVALUATING OF EFFICIENCY OF CONCENTRATED SODIUM CHLORIDE SOLUTIONS CONVERSION PROCESSES FOR OBTAINING ALUMINUM COAGULANT

Y. KRYZHANOVSKA, M. GOMELYA, T. SHABLIY, A. VAKULENKO

Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT In this work, the processes of sodium chloride solutions electrochemical processing in order to obtain aluminum chloride and alkali in a three-chamber electrolyzer with anion exchange membrane MA-41 and a cation exchange membrane MC-40 and in a two-chamber electrolyzer with a cation exchange membrane MC-40 were investigated. The presented method of processing salt concentrates using a soluble aluminum anode is economically feasible, as the electrolysis simultaneously demineralizes liquid waste to the level of regulatory requirements and production from source concentrates of marketable products. The disadvantage of this method of obtaining a coagulant is the interaction of aluminum with water. However, it is proved that with increasing anodic current density during electrolysis, the yield of aluminum chloride is almost entirely due to the electrochemical dissolution of the anode, and the chemical dissolution of aluminum is almost absent. The stability of the obtained solutions of coagulants for a long time is maintained by low values of the reaction medium ($pH \leq 3$). Thus, at a current of 1 A (current density 8.34 A/dm^2) and an initial concentration of sodium chloride of 1900 mg-eq/dm^3 , the total concentration of aluminum ions in the resulting solution reaches 3884 mg-eq/dm^3 . Chemically dissolved aluminum is not more than 12 %. According to the initial parameters, the yield of aluminum ions, taking into account the chemical dissolution of the anode is 100–108 %. At the same time in the cathode chamber is the concentration of alkali to a level of approximately 1500 mg-eq/dm^3 . Its current output reaches 92 %. The degree of diffusion of chloride ions through the anion exchange membrane from the working chamber into the anode region is 99 %. It is shown that the process of sodium chloride solution electrolysis in a two-chamber electrolyzer with a cation exchange membrane is not as efficient as when using a three-chamber electrolyzer. At the initial stage of the process, the current yield is 61 % for aluminum chloride and 64 % for alkali. Subsequently, due to the poisoning of the cation exchange membrane by aluminum cations, which block all the anionic functional groups of this membrane, the process stops.

Keywords: electrodialysis; coagulant; aluminum chloride; cathode; anode; water desalination; aluminum hydroxychlorides

Вступ

Вирішення проблеми знесолення природних, шахтних та інших вод з високою мінералізацією є досить складним. Проблема загострюється у зв'язку з

тим, що всі відомі методи знесолення води, такі як: іонний обмін [1], мембранні методи [2–4], електродіаліз [5], супроводжуються утворенням

концентрованих розчинів, переробка яких є досить складною та економічно затратною.

При досягненні концентрацій сольових розчинів вище 50 г/дм³ іонний обмін, електродіаліз та мембранні методи взагалі непридатні для використання.

Аналіз попередніх досліджень. З опублікованих наукових праць за напрямком досліджень зі знесолення природних і стічних вод виходить, що будь-які з відомих підходів до опріснення води доцільно використовувати при концентрації мінеральних солей у воді менше 3,0 %. Ця концентрація є граничною як для іонного обміну, так і для мембранних методів. Використання випарних установок [6,7] та сушарок [8,9] є затратним та економічно недоцільним шляхом, якщо не виробляється цінна продукція. У випадку, коли вилучені мінеральні речовини необхідно скидати на звалище, проблема лише ускладнюється, тому що розчинні мінеральні солі розміщувати на звичайних звалищах заборонено, а створення спеціальних герметичних звалищ для захоронення таких відходів є надто дорогим.

Можливий один варіант для вирішення проблеми переробки сольових концентратів – виробництво з них реагентів або матеріалів, придатних для використання. Розчини, що містять сульфат-іони, іони кальцію та магнію, легко переробляти з отриманням в'язучих речовин, будівельних матеріалів. Проте переробка розчинів хлориду натрію є значно складнішою проблемою. Найбільш економічно доцільним способом їхньої переробки є отримання хлориду заліза [10,11]. Публікації щодо отримання хлориду алюмінію з концентратів практично відсутні. У роботі [12] описані основні аспекти отримання солей алюмінію електродіалізом, проте ряд проблем залишились не вирішеними.

Мета роботи

Метою роботи є визначення параметрів процесу синтезу хлориду алюмінію при переробці відходів, що містять розчини хлориду натрію.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові завдання:

1. Визначити параметри процесу знесолення розчинів хлориду натрію при використанні трикамерного електролізера та алюмінієвого аноду, мембран МК-40 та МА-41 в залежності від анодної щільності струму, концентрації лугу в катодній області з урахуванням рН аноліту;

2. Оцінити вплив анодної щільності струму на вихід хлориду та гідроксохлориду алюмінію;

3. Встановити граничні параметри процесу отримання хлориду алюмінію при переробці розчинів хлористого натрію у двокамерному електролізері з катіонообмінною мембраною та алюмінієвим анодом.

Виклад основного матеріалу

У роботі використовували дво- та трикамерні електролізери з об'ємом камер 75–175 см³ кожна. В двокамерному електролізері використовували катіонообмінну мембрану МК-40, катод із легованої сталі 12Х18Н10Т, алюмінієвий анод (АД-0). У трикамерному електролізері додатково використовували аніонообмінну мембрану МА-41. В катодній камері застосовували слаболужні розчини лугу ($\text{Л}=50\text{--}70$ мг-екв/дм³), в анодній камері – слабокислі розчини соляної кислоти ($\text{К}=0,5\text{--}50$ мг-екв/дм³). Робочими розчинами були розчини хлориду натрію з концентрацією 1700–1900 мг-екв/дм³. Площа електродів становила 0,12 дм². Сила струму коливалася у межах 0,25–1,00 А.

При зниженні концентрації розчину NaCl в робочій камері нижче 50–100 мг-екв/дм³ розчин замінювали на вихідний. При досягненні лужності в катодній камері 1400–1700 мг-екв/дм³ його також замінювали на вихідний з лужністю 50–70 мг-екв/дм³.

Вихід речовини за струмом (B , %) розраховували за формулою:

$$B = \frac{m_p}{m_t} \cdot 100, \% \quad (1)$$

де m_p – реальна маса речовини, розчиненої/перенесеної в іншу камеру в процесі електролізу, г;

m_t – теоретично розрахована маса речовини, отриманої/розчиненої/перенесеної в іншу камеру електролізеру, г:

$$m_t = K_F \cdot I \cdot t \quad (2)$$

де $K_F=0,0371$ моль/(А·год); I – сила струму, А; t – час, год.

$$m_p = V_s \cdot (C_0 - C), \quad (3)$$

де V_s – об'єм обробленого розчину, дм³; C_0 – початкова концентрація компоненту в розчині, моль/дм³; C – кінцева концентрація компоненту в розчині після обробки, моль/дм³.

Ступінь вилучення хлоридів (хлориду натрію) з робочої камери (Z , %) розраховували за формулою:

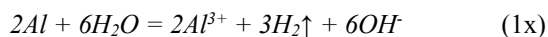
$$Z = \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) \cdot 100, \% \quad (4)$$

де C – кінцева концентрація компоненту в розчині після обробки, моль/дм³; C_0 – початкова концентрація компоненту в розчині, моль/дм³.

Отримання хлоридів та гідроксохлоридів алюмінію є досить перспективним напрямком переробки відходів, а саме розчинів хлориду натрію різних концентрацій. Процес розчинення алюмінію проходить ефективно незалежно від концентрації хлористого натрію у робочій камері. При цьому

використання анодів із металевого алюмінію суттєво спрощує процес. За умови розділення катодів і анодів робочою зоною в якості алюмінієвих анодів можна використовувати як металеві пластини, так і металеву стружку. Це суттєво здешевлює виробництво алюмінієвих коагулянтів.

З іншої сторони процес отримання хлориду алюмінію ускладнюється взаємодією активованого алюмінію із водою поряд із анодним електрохімічним його розщепленням.



Крім того, за умови підвищення рН середовища в анодній області можливе утворення кисню або активного хлору на аноді, що в подальшому можуть окиснювати алюміній.

Обговорення результатів

Очевидно, що вихід по основному процесу – синтез хлориду алюмінію, може залежати від анодної щільності струму. Тому на першому етапі ми визначали вихід іонів алюмінію Al^{3+} та вихід по дифузії хлоридів залежно від анодної щільності струму.

На першому етапі було досліджено процес знесолення розчину хлориду натрію концентрацією 1700 мг-екв/дм^3 з отриманням хлориду алюмінію при силі струму $0,25 \text{ А}$, при анодній щільності струму $2,08 \text{ А/дм}^2$ (рис. 1).

Як видно з рисунку 1, досить ефективно відбувається дифузія хлоридів із робочої камери в анодну камеру. При цьому концентрація алюмінію в анодній камері зростає швидше за концентрацію хлоридів. З цього виходить, що в даному випадку алюміній частково взаємодіє з водою (рис. 2). Це видно і за підвищенням рН середовища в анодній камері.

Даний процес призводить до зменшення дифузії хлоридів в анодну область. Крім того, це впливає на дифузію натрію в катодну область. Вочевидь часткова дифузія протонів в катодну область спричиняє підвищення лужності в робочій камері, що знову ж знижує ефективність дифузії хлоридів в анодну область. Через 50 годин електролізу різниця у концентраціях алюмінію та хлоридів в анодній області сягає 890 мг-екв . Рівень рН сягає $4,36$. Це спричиняє частковий гідроліз алюмінію з висадженням $Al(OH)_3$. Концентрація алюмінію при цьому на $50\text{--}52$ годинах електролізу падає з 3230 мг-екв/дм^3 до 1850 мг-екв/дм^3 . Концентрація хлоридів зростає до 2392 мг-екв/дм^3 , а рН падає до $1,55$.

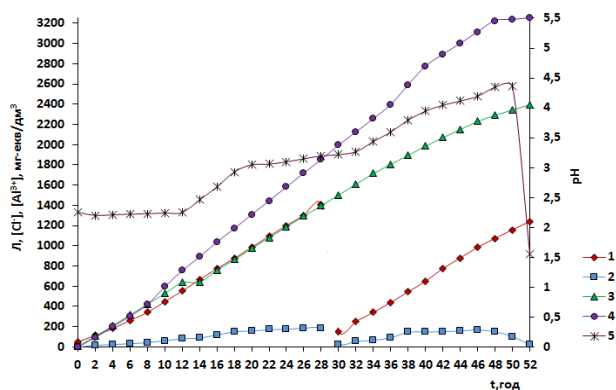


Рис. 1 – Зміна лужності в катодній камері (1) та робочій камері (2) трикамерного електролізера, концентрації хлоридів (3) та іонів алюмінію (4), рН середовища (5) в анодній камері електролізера з алюмінієвим анодом з часом електролізу ($I=0,25 \text{ А}$, $S_a=S_k=0,12 \text{ дм}^2$, $V_{к.к.}=V_{р.к.}=175 \text{ см}^3$, $j=2,08 \text{ А/дм}^2$) розчину хлориду натрію концентрацією 1700 мг-екв/дм^3

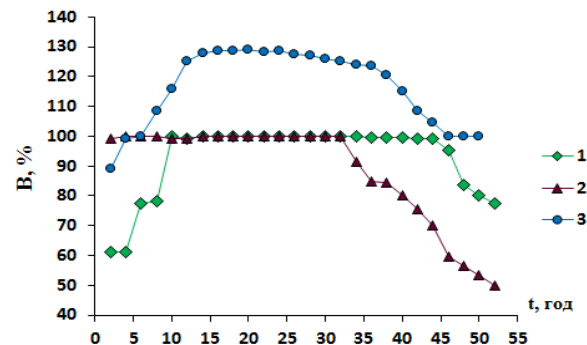


Рис. 2 – Зміна виходу за струмом лугу в катодній області (1), дифузії хлоридів із робочої камери в анодну область (2) та розчинення алюмінієвого аноду (3) із часом електролізу розчину хлориду натрію (1700 мг-екв/дм^3 , робоча камера) в трикамерному електролізері при початковій концентрації лугу в катодній області 50 мг-екв/дм^3 , початковій кислотності в анодній камері $8,5 \text{ мг-екв/дм}^3$ ($I=0,25 \text{ А}$; $j=2,08 \text{ А/дм}^2$)

Як видно з рис. 2, вихід за струмом іонів Al^{3+} починаючи з 8-ої години електролізу перевищує 100% , що обумовлено розчиненням алюмінію при взаємодії з водою. Дифузія хлоридів відбувається досить ефективно. Вихід за струмом сягає приблизно 100% . Менш ефективно відбувається дифузія іонів натрію. Хоча в окремих періодах вихід за струмом в даних процесах сягає $95\text{--}100 \%$.

При підвищенні сили струму до $0,5 \text{ А}$, анодної щільності струму до $4,17 \text{ А/дм}^2$, інтенсивність процесу зростає (табл. 1). І хоча при цьому вихід за струмом у процесі дифузії хлоридів зменшується до $90\text{--}96 \%$ (крім останніх 4-ох годин електролізу), а вихід за струмом лугу в катодній області знижується до $80\text{--}90 \%$, розчинення алюмінію при взаємодії з водою при рН – $2,21\text{--}3,20$ є менш значним у порівнянні з попереднім дослідом.

Таблиця 1 – Залежність параметрів процесу електролізу розчину хлориду натрію (1900 мг-екв/дм³) в трикамерному електролізері (мембрани МК-40, МА-41) від часу електролізу при використанні алюмінієвого аноду (I=0,5 А, Sa=Sk=0,12 дм², V_{к.к.}=V_{а.к.}=V_{р.к.}=100 см³, j=4,17 А/дм²)

t, год	Л, мг-екв/дм ³		[Cl ⁻], мг-екв/дм ³		[Al ³⁺], мг-екв/дм ³	В, %			рН, АК	I, А	U, В
	КК	РК	РК	АК		Л, КК	Al ³⁺ , АК	Cl ⁻ , АК, РК			
0	50,0	0	1900	35	---	---	---	---	2,20	0,5	3
1	193,0	15,6	1725	210	180,0	76,9	96,8	94,0	2,21	0,5	3
2	351,8	37,0	1551	384	367,4	85,4	100,2	93,5	2,21	0,5	3
3	514,6	59,3	1375	560	563,4	87,5	105,4	94,6	2,22	0,5	3
4	681,6	79,8	1197	738	768,7	88,7	110,4	95,7	2,24	0,5	3
5	848,6	94,7	1020	915	968,1	89,8	111,5	95,2	2,25	0,5	3
6	1016,6	105,8	840	1095	1157,8	90,3	110,2	96,8	2,35	0,5	3
7	1184,7	118,8	665	1270	1366,7	90,4	112,3	94,1	2,46	0,5	3
8	1300,3 (50)	138,5	497	1438	1579,5	81,2	114,4	90,9	2,68	0,5	5
9	189,5	106,1	347	1588	1784,8	75,4	109,2	80,6	2,93	0,5	7
10	323,7	98,7	212	1723	1963,4	72,1	96,0	72,5	3,05	0,5	10
11	453,6	75,3	92	1843	2127,6	70,4	88,3	64,5	3,15	0,5	30
12	580,1	45,4	10	1925	2255,0	68,5	68,5	44,1	3,20	0,5	50

Внесок даного процесу у вихід катіонів Al³⁺ не перевищує 24,4 %, а на певних етапах процесу його внесок менше ніж 1 %. У результаті електролізу отримано розчин лугу концентрацією 1300 мг-екв/дм³, а концентрація хлориду натрію в робочій камері знижується до 10 мг-екв/дм³.

При підвищенні сили струму до 1 А при анодній щільності струму 8,34 А/дм² швидкість процесу зростає ще в більшій мірі. Якщо при силі струму 0,25 А концентрація хлоридів в анодній області зростає до 2345 мг-екв/дм³ за 50 год, то при силі струму 1 А концентрація хлоридів в аноліті на рівні 2691 мг-екв/дм³ досягається за 7 годин електролізу (рис. 3). При цьому еквівалентна концентрація іонів алюмінію в аноліті не перевищує 2697 мг-екв/дм³. Це говорить про те, що розчинення алюмінію відбувається за рахунок електролізу (реакція 2), і внесок хімічного розчинення алюмінію практично відсутній. При цьому за 10 годин електролізу отримано розчин хлориду алюмінію концентрацією 3470 мг-екв/дм³.

Концентрація іонів алюмінію сумарно сягає 3884 мг-екв/дм³. Це значить, що внесок хімічного процесу розчинення алюмінію не перевищує 12 %. При цьому рН середовища не перевищує 3,0. Це вказує на те, що отриманий розчин досить стабільний і може тривалий час використовуватись в якості коагулянту.

Вихід за струмом лугу сягає 92 %, а дифузії хлоридів із робочої камери в анодну область – 99 %. Вихід іонів алюмінію з урахуванням хімічного розчинення аноду сягає 100,1–108,5 % (рис. 4).

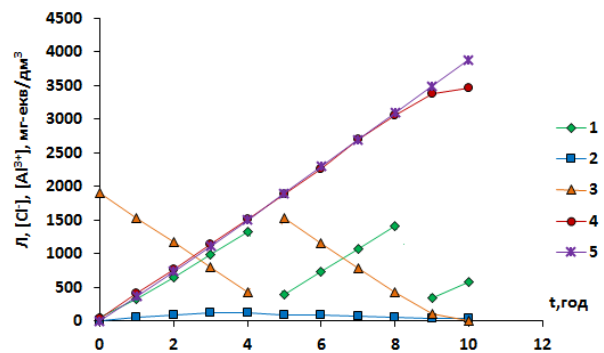


Рис. 3 – Залежність лужності в катодній (1) та робочій (2) камерах, концентрації хлоридів в робочій (3) та анодній (4) камерах, концентрації алюмінію (5) від часу електролізу розчину хлориду натрію (1900 мг-екв/дм³) в трикамерному електролізері при силі струму 1А (j=8,34 А/дм²)

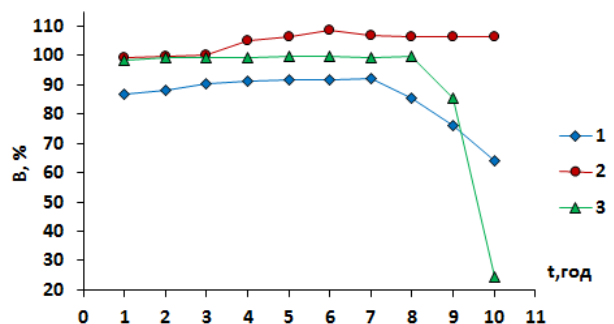


Рис. 4 – Залежність виходу за струмом лугу в катодній камері (1), розчиненого алюмінію в анодній камері (2) та дифузії хлоридів із робочої в анодну камеру (3) від часу електролізу розчину хлориду натрію (1900 мг-екв/дм³) в трикамерному електролізері при силі струму 1А (j=8,34 А/дм²)

Досить цікавим було вивчення процесу отримання алюмінієвого коагулянту в двокамерному електролізері. У даному випадку розчин хлориду натрію розміщували в анодній камері, а в катодній камері відбувалося концентрування лугу. Враховуючи те, що електропровідність катіонообмінної мембрани по іонах натрію значно вища за електропровідність по іонах алюмінію, можна було сподіватись, що в анодній камері буде концентруватись хлорид алюмінію, а в катодній камері – луг. І дійсно, на початок процесу при силі струму 1 А відбувається розчинення алюмінієвого аноду (рис. 5) при зростанні концентрації алюмінію до 524 мг-екв/дм³. Вихід за струмом становить по хлориду алюмінію 60,9 %, а по лугу 63,5 %. Проте надалі процес суттєво сповільнюється, а вихід за струмом по хлориду алюмінію падає до 11,7 %, а по лугу до 1 %. Пов'язане це з тим, що лугозарядні катіони алюмінію, при збільшенні їхньої концентрації в розчині все більше сорбуються на катіонообмінній мембрані, витісняючи лугозарядні катіони натрію (можливо і протони). З часом практично всі аніонні функціональні групи катіонообмінної мембрани опиняються блокованими катіонами алюмінію, дифузія яких відбувається вкрай повільно через значне електростатичне притягування позитивно заряджених функціональних груп мембран. Електричний опір мембрани зростає у десятки разів. Мембрана практично втрачає здатність до електропровідності. Ефект посилюється по мірі отруєння мембрани іонами алюмінію. Врешті решт, процес електролізу зупиняється. Це видно з рисунку 6, в якому на початок процесу при напрузі 5 В сила струму сягає 1 А, а через 7 годин вже при напрузі 50 В вона ледве сягає 0,2 А.

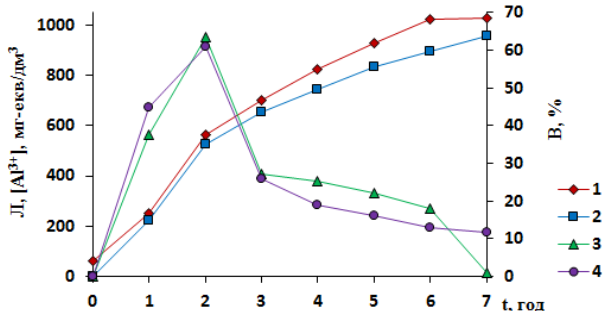


Рис. 5 – Залежність лужності в катодній області (1), концентрації алюмінію в анодній області (2), виходу за струмом хлориду алюмінію (3), виходу за струмом лугу (4), від часу електролізу розчину хлориду натрію (1709 мг-екв/дм³) в двокамерному електролізері (мембрана МК-40, анод – алюміній АД-0), при силі струму 1А ($j=8,34 \text{ A/dm}^2$, $V_{к.к.}=V_{а.к.}=75 \text{ см}^3$, рН 2,50–3,17)

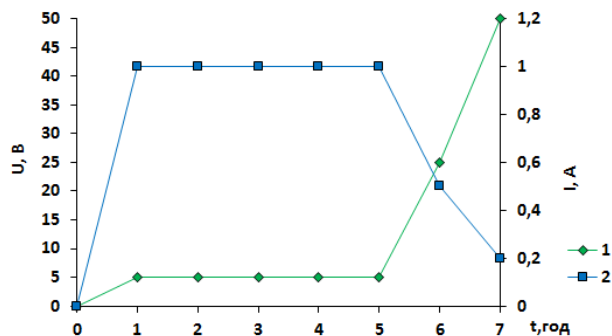


Рис. 6 – Зміна напруги (1) та сили струму (2) з часом електролізу розчину хлориду натрію (1709 мг-екв/дм³) в двокамерному електролізері (мембрана МК-40, $j=8,34 \text{ A/dm}^2$, $V_{к.к.}=V_{а.к.}=75 \text{ см}^3$, рН 2,50–3,17)

Вихід за струмом як хлориду алюмінію, так і лугу є настільки низьким, що продовження процесу є недоцільним.

Таким чином, із приведених результатів видно, що при використанні звичайних катіонообмінних мембран у двокамерних електролізерах отримати задовільні результати по синтезу хлориду алюмінію у разі переробки розчину хлориду натрію із застосуванням алюмінієвих анодів неможливо.

Висновки

За результатами досліджень можна зробити наступні висновки. При проведенні електролізу розчинів хлориду натрію в трикамерному електролізері можна ефективно їх знесолювати з отриманням розчинів хлориду алюмінію та лугу. Інтенсивність процесу зростає із підвищенням анодної щільності струму.

При підвищення анодної щільності струму зростає вихід хлориду алюмінію, отриманого за рахунок електрохімічного розчинення аноду, тоді як при зменшенні сили струму зростає вклад хімічного розчинення алюмінію в підкислених розчинах. При цьому зростає основність отриманого продукту, рН розчину, що знижує його стабільність, і може супроводжуватись за рН>5 випаданням в осад гідроксиду алюмінію.

Дослідження по переробці розчину хлориду натрію у двокамерному електролізері з катіонообмінною мембраною та алюмінієвим анодом показали, що дані установки низькоєфективні через отруєння катіонообмінної мембрани іонами алюмінію.

Щодо перспектив подальших досліджень. На певних етапах електролізу розчинів хлориду натрію в двокамерних електролізерах отримано позитивні результати. У випадку захисту катіонообмінної мембрани від отруєння її іонами алюмінію процес переробки розчинів хлориду натрію в двокамерному електролізері може бути перспективним. Доцільно провести дослідження при використанні біполярних мембран.

Список літератури

- Макаренко І. М., Глушко О. В., Рисухін В. В., Терещенко О. М. Застосування катіонітів для кондиціонування води в процесах її баромембранного знесолення. *Восточно-Европейський журнал передових технологій*. 2013. № 3/6 (63). С. 48–52.
- 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. № 1–2. P. 1–6. doi: 10.1155/2015/326869.
- Epszstein R., Nir O., Lahav O., Green M. Selective nitrate removal from groundwater using a hybrid nanofiltration-revers osmosis filtration scheme. *Chemical Engineering Journal*. 2015. № 279. P. 372–378. doi: 10.1016/j.cej.2015.05.010.
- Гончарук В. В., Осипенко В. О., Балакіна М. Н., Кучерук Д. Д. Очистка воды от нитратов методом обратного осмоса низкого давления. *Химия и технология воды*. 2013. № 35 (2). С. 71–75.
- Akhter M., Habib G., and Qamar S. Application of Electrodialysis in Waste Water Treatment and Impact of Fouling on Process Performance. *Journal of Membrane Science & Technology*. 2018. № 8(2). P. 1–8. doi: 10.4172/2155-9589.1000182.
- Lin Chen, Huiyao Wang, Sarada Kuravi, Krishna Kota, Young Ho Park, Pei Xu. Low-cost and reusable carbon black based solar evaporator for effective water desalination. *Desalination*. 2020. № 483. P. 114412. doi: 10.1016/j.desal.2020.114412.
- Ferry J., Widyolar B., Jiang L., Winston R. Solar thermal wastewater evaporation for brine management and low pressure steam using the XCPC. *Applied Energy*. 2020. № 256. P. 114746. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114746.
- Wenyi Deng, Yaxin Su, Weichao Yu. Theoretical Calculation of Heat Transfer Coefficient When Sludge Drying in a Nara-Type Paddle Dryer Using Different Heat Carriers. *Procedia Environmental Science*. 2013. № 18. P. 709–715. doi: 10.1016/j.proenv.2013.04.096.
- Bennamoun L., Arlabosse P., Leonard A. Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. № 28. P. 29–43. doi: 10.1016/j.rser.2013.07.043.
- Крижановська Я. П., Гомеля М. Д., Радовенчик Я. В. Безвідходна технологія очистки високомінералізованих вод з отриманням коагулянту. *Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. 2019. № 1. С. 67–72. doi: 10.20535/2617-9741.1.2019.171047.
- Крижановська Я. П., Макаренко І. М., Гомеля М. Д., Шаблій Т. О. Електрохімічна утилізація розчинів хлориду натрію з отриманням хлоридів заліза. *Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. 2020. № 1. С. 50–59. doi: 10.20535/2617-9741.1.2020.207815.
- Гомеля М. Д., Радовенчик Я. В., Мартинюк Я. П. Переробка розчинів хлористого натрію з отриманням хлоридів алюмінію. *Інтегровані технології промисловості та енергозбереження*. 2017. №4. С. 66–69.
- of subacid cationites for water conditioning in baromembrane demineralization]. *Easten-Europe journal of Enterprise Technologies*, 2013, no 3/6 (63), pp. 48–52.
- Naidu L.D., Saravanan S., Chidambaram M., Goel M., Das A., Sarat J., Babu C. 2015 Nanofiltration in Transforming Surface Water into Healthy Water: Comparison with Reverse Osmosis. *Journal of Chemistry*, 2015, no 1–2, pp. 1–6, doi: 10.1155/2015/326869.
- Epszstein R., Nir O., Lahav O., Green M. Selective nitrate removal from groundwater using a hybrid nanofiltration-revers osmosis filtration scheme. *Chemical Engineering Journal*, 2015, no 279, pp. 372–378, doi: 10.1016/j.cej.2015.05.010.
- Goncharuk V., Osipenko V., Balakina M., Kucheruk D. Ochystka vody ot nytratov metodom obratnoho osmosa nyzkoho davleniya [Water purification of nitrates by low-pressure reverse osmosis method]. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 2013, no. 35 (2), pp. 71–75.
- Akhter M., Habib G., and Qamar S. Application of Electrodialysis in Waste Water Treatment and Impact of Fouling on Process Performance. *Journal of Membrane Science & Technology*, 2018, no. 8(2), pp. 1–8, doi: 10.4172/2155-9589.1000182.
- Lin Chen, Huiyao Wang, Sarada Kuravi, Krishna Kota, Young Ho Park, Pei Xu. 2020. Low-cost and reusable carbon black based solar evaporator for effective water desalination. *Desalination*, 2020, no. 483, pp. 114412, doi: 10.1016/j.desal.2020.114412.
- Ferry J., Widyolar B., Jiang L., Winston R. Solar thermal wastewater evaporation for brine management and low pressure steam using the XCPC. *Applied Energy*, no 256, pp. 114746, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114746.
- Wenyi Deng, Yaxin Su, Weichao Yu. Theoretical Calculation of Heat Transfer Coefficient When Sludge Drying in a Nara-Type Paddle Dryer Using Different Heat Carriers. *Procedia Environmental Science*, 2013, no 18, pp. 709–715, doi: 10.1016/j.proenv.2013.04.096.
- Bennamoun L., Arlabosse P., Leonard A. Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, no 28, pp. 29–43, doi: 10.1016/j.rser.2013.07.043.
- Kryzhanovskaya Ya. P., Homelia M. D., Radovenchik Ya. V. Bezvidkhodna tekhnolohiia ochystky vysokominalizovanykh vod z otrymanniam koahuliantu [Insufficient cleaning technology high-milled with receiving koagulant]. *Bulletin of NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Series "Chemical engineering, ecology and resource saving"*, 2019, no 1, pp. 67–72, doi: 10.20535/2617-9741.1.2019.171047.
- Kryzhanovska Ya. P., Makarenko I. M., Gomelya M. D., Shabliy T. O. Elektrokhimichna utylizatsiia rozchyniv khlorydu natriiu z otrymanniam khlorydiv zaliza [Electrochemical utilization of sodium chloride solutions with obtaining iron chlorides]. *Bulletin of NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Series "Chemical engineering, ecology and resource saving"*, 2020, no 1, pp. 50–59, doi: 10.20535/2617-9741.1.2020.207815.
- Gomelya M. D., Radovenchik I. V., Martyniuk I. P. Pererobka rozchyniv khlorystoho natriiu z otrymanniam khlorydiv aliuminiuu [Treatment of solvents chloride sodium solvents with production of aluminum chloride]. *Integrated technologies and energy conservation*, 2017, no 4, pp. 66–69.

References (transliterated)

- Makarenko I., Hlushko O., Rychuhin V., Tereschenko O. Zastosuvannia kationitiv dlia kondytsiuvannia vody v protsesakh yii baromembrannoho znesolennia [Application

Відомості про авторів (About authors)

Крижановська Яна Петрівна – Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського», аспірант кафедри екології та технології рослинних полімерів, м. Київ, Україна; e-mail: yanamart93@ukr.net.

Yana Kryzhanovska – Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, PhD student of Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, Kyiv, Ukraine; e-mail: yanamart93@ukr.net.

Гомеля Микола Дмитрович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри екології та технології рослинних полімерів, м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0003-1165-7545; e-mail: m.gomelya@kpi.ua.

Mykola Gomelya – Doctor of Technical Sciences (Dr. Sc), Professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, head of Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1165-7545; e-mail: m.gomelya@kpi.ua.

Шаблій Тетяна Олександрівна – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри екології та технології рослинних полімерів, м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0002-6710-9874; e-mail: dsts1@ukr.net.

Tetyana Shabliy – Doctor of Technical Sciences (Dr. Sc), Professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, professor of Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6710-9874; e-mail: dsts1@ukr.net.

Вакуленко Анна Костянтинівна – Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського», аспірант кафедри екології та технології рослинних полімерів, м. Київ, Україна; e-mail: vakulanna@gmail.com.

Anna Vakulenko – Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, PhD student of Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, Kyiv, Ukraine; e-mail: vakulanna@gmail.com.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Крижановська Я. П., Гомеля М. Д., Шаблій Т. О., Вакуленко А. К. Оцінка ефективності процесів переробки концентрованих розчинів хлориду натрію з отриманням алюмінієвого коагулянту. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». № 4 (6). С. 107-113. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.16.

Please cite this article as:

Kryzhanovska Y., Gomelya M., Shabliy T., Vakulenko A. Evaluating of efficiency of concentrated sodium chloride solutions conversion processes for obtaining aluminum coagulant. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 107-113, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.16.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Крижановская Я. П., Гомеля Н. Д., Шаблій Т. А., Вакуленко А. К. Оценка эффективности процессов переработки концентрированных растворов хлорида натрия с получением алюминиевого коагулянта. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». № 4 (6). С. 107-113. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.16.

АННОТАЦІЯ В роботі були досліджені процеси електрохімічної переробки розчинів хлориду натрію з отриманням хлориду алюмінію та щелочи в трьохкамерному електролізері з аніонообмінною мембраною МА-41 і катионообмінною мембраною МК-40, а також в двохкамерному електролізері з катионообмінною мембраною МК-40. Представлений спосіб переробки солевих концентратів з використанням розчинного алюмінієвого анода є економічною цілорозумною, так як в результаті електролізу одночасно відбувається демінералізація промислових рідких відходів до рівня нормативних вимог і виробництво з вихідних концентратів товарної продукції. Недоліком запропонованого способу отримання коагулянта є взаємодія алюмінію з водою. Однак доведено, що з підвищенням анодної густоти струму при електролізі вихід хлориду алюмінію практично повністю обумовлено електрохімічним розчиненням анода, а хімічне розчинення алюмінію практично відсутнє. Стабільність отриманих розчинів коагулянтів в часі тривалого зберігання підтримується низкими значеннями реакції середовища ($\text{pH} \leq 3$). Так, при силі струму 1 А (густина струму 8,34 А/дм²) і вихідній концентрації хлориду натрію 1900 мг-екв/дм³ сумарна концентрація іонів алюмінію в отриманому розчині досягає 3884 мг-екв/дм³. На хімічно розчинений алюміній припадає не більше 12 %. При вказаних вихідних параметрах вихід іонів алюмінію з урахуванням хімічного розчинення анода становить 100–108 %. Одночасно в катодній камері відбувається концентрування щелочи приблизно до 1500 мг-екв/дм³. Її вихід по струму при цьому становить 92 %. Степень дифузії хлорид-іонів через аніонообмінну мембрану з робочої камери в анодну область становить 99 %. Показано, що процес електролізу розчину хлориду натрію в двохкамерному електролізері з катионообмінною мембраною проходить не так ефективно, як в разі використання трьохкамерного електролізера. На початковій стадії процесу вихід по струму становить по хлориду алюмінію 61 %, а по щелочи 64 %. В подальшому через отравлення катионообмінної мембрани катионами алюмінію, які блокують всі аніонні функціональні групи даної мембрани, процес припиняється.

Ключові слова: електроліз; коагулянт; катод; анод; обессолювання води; гідроксохлорид алюмінію

Надійшла (received) 16.11.2020