УДК 504; 628.3
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.6-69.3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО УТВОРЕННЯ АКТИВНОГО ХЛОРУ В ДІАФРАГМОВОМУ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРІ З ПРОТОЧНОЮ АНОДНОЮ КАМЕРОЮ

Курилюк О.М. (orcid.org/0009-0000-1385-7458)
Національний університет водного господарства та природокористування
вул. М. Веремчука, буд. 24, 33018, м. Рівне
o.m.kurylyuk@nuwm.edu.ua

Вивчено закономірності електрохімічного утворення активного хлору під час електролізу водних розчинів хлориду натрію в двокамерному діафрагмовому електролізері з проточною анодною камерою. Досліджено вплив концентрації NaCl, густини струму, тривалості електролізу та діафрагмового розділення електродних камер на перебіг процесу та ефективність утворення активного хлору в проточній анодній камері. За концентрацій NaCl 30-45 г/дм^3 вихід активного хлору за струмом становив 5665% при густині струму 4,17 А/дм^2, 43-46 % при 8,33 А/дм^2 та 32-40% при 12,5 А/дм^2. За концентрацій NaCl 120-200 г/дм^3 вихід за струмом досягав близько 73-74%. Експериментальне дослідження проводилось у двокамерному діафрагмовому електролізері з проточною анодною камерою. Як вихідний розчин використовували дистильовану воду з концентрацією NaCl 8,0 г/л. Напруга живлення електролізера становила 24В, витрата розчину через анодну камеру – 82 мл/хв, а відстань між електродами – 153 мм. В якості аноду використовували графіт, в якості катоду – нержавіючу сталь. Анодну та катодну камери розділяли інертною діафрагмою з белтингу. Протягом 6 год електролізу через установлені часові інтервали визначали pH та окисно-відновний потенціал Eh аноліту та католіту, а також фіксували силу струму. Встановлено, що вже на початковому етапі електролізу в анодній і катодній камерах формуються відмінні фізико-хімічні умови. Через 20 хв pH аноліту знизився з 7,62 до 5,97, а Eh підвищився з +231 мВ до +1137 мВ. У католіті за цей самий час pH зріс до 11,93, тоді як Eh знизився до -736 мВ. Максимальне значення Eh аноліту +1203 мВ зафіксовано через 40 хв електролізу. Упродовж досліду сила струму збільшилася з 1,39 до 2,17А. Отримані результати підтверджують роль діафрагмового розділення у формуванні різних кислотно-основних та окисновідновних умов в аноліті й католіті та характеризують перебіг електрохімічного утворення активного хлору в досліджуваній системі. Результати досліджень були використані для визначення режимів роботи діафрагмових електролізерів з проточною анодною камерою для одержання хлорвмісних окисників. *Ключові слова:* водокористування, активний хлор, електроліз, діафрагмовий електролізер, NaCl, аноліт, католіт, густина струму, вихід за струмом, pH, окисно-відновний потенціал, проточна анодна камера.

Investigation of the electrochemical generation of active chlorine in a diaphragm electrolyzer with a flow-through anode chamber. Kuryliuk O.

The study investigates the patterns of electrochemical active chlorine formation during the electrolysis of aqueous sodium chloride solutions in a two-chamber diaphragm electrolyzer. The effects of NaCl concentration, current density, electrolysis duration, and diaphragm separation of the electrode chambers on the process and the efficiency of active chlorine formation were analyzed. At NaCl concentrations of 30-45 g/dm^3, the current efficiency of active chlorine formation was 56-65% at a current density of 4.17 A/dm^2, 43-46% at 8.33 A/dm^2, and 32-40% at 12.5 A/dm^2. At NaCl concentrations of 120-200 g/dm^3, the current efficiency reached approximately 73-74%. The experimental study was conducted in a twochamber diaphragm electrolyzer with a flow-through anode chamber. Distilled water with an NaCl concentration of 8.0 g/L was used as the initial solution. The electrolyzer supply voltage was 24V, the solution flow rate through the anode chamber was 82 mL/min, and the distance between the electrodes was 153 mm. Graphite was used as the anode and stainless steel as the cathode. The anode and cathode chambers were separated by a belting diaphragm. During 6 h of electrolysis, the pH and oxidation-reduction potential of the anolyte and catholyte were determined at specified time intervals, and the current was recorded. It was established that distinct physicochemical conditions in the anode and cathode chambers were formed already at the initial stage of electrolysis. After 20 min, the pH of the anolyte decreased from 7.62 to 5.97, while the Eh increased from +231mV to +1137mV. During the same period, the pH of the catholyte increased to 11.93, whereas the Eh decreased to -736 mV. The maximum anolyte Eh value of +1203 mV was recorded after 40 min of electrolysis. During the experiment, the current increased from 1.39 to 2.17 A. The obtained results confirm the role of diaphragm separation in the formation of different acid-base and oxidation-reduction conditions in the anolyte and catholyte and characterize the course of electrochemical active chlorine formation in the studied system. The results can be used to determine operating conditions for diaphragm electrolyzers intended for the production of chlorine-containing oxidants. *Key words:* active chlorine, electrolysis, diaphragm electrolyzer, NaCl, anolyte, catholyte, current density, current efficiency, pH, oxidation-reduction potential, flow anode chamber.

© Курилюк О.М., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

1. Вступ

Електрохімічні методи дають можливість здійснювати окисно-відновні перетворення безпосередньо в реакційному середовищі під дією електричного струму. Інтенсивність процесу може регулюватися електричними та конструктивними параметрами електролізера, складом електроліту та умовами масоперенесення [1, 2].

Одним із практично важливих напрямів електрохімічного окиснення є утворення активного хлору з водних розчинів хлоридів. Під час електролізу розчину NaCl на аноді відбувається окиснення хлорид-іонів:

$$2Cl^- \rightarrow Cl_2 + 2e^-$$

У водному середовищі утворений хлор взаємодіє з водою:

$$Cl_2 + H_2O \leftrightarrows HClO + H^+ + Cl^-$$

Хлорнуватиста кислота дисоціює:

$$HClO \leftrightarrows H^+ + ClO^-$$

Співвідношення між хлорвмісними формами залежить, зокрема, від pH середовища [1, 5].

У діафрагмовому електролізері анодна та катодна камери розділені діафрагмою. На катоді відбувається відновлення води:

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$$

У результаті в катодній камері формується лужне середовище, тоді як анодна камера є зоною перебігу окисних процесів. Розділення камер обмежує безпосередню взаємодію продуктів електродних реакцій [2, 4].

2. Існуючий стан

Електрохімічне утворення активного хлору залежить від концентрації хлоридів, густини струму, тривалості електролізу, конструкції електролізера, властивостей діафрагми, матеріалу електродів, pH та умов переміщення електроліту [1, 4].

У роботі [4] досліджували двокамерний електролізер з дифузійною UMP20, аніонообмінною МА-41 та катіонообмінною МК-40 мембраною. Електроліз проводили за концентрацій NaCl 30–200 г/дм^3 та густини струму 4,17–12,5 А/дм^2.

Для концентрацій NaCl 30–45 г/дм^3 вихід за струмом становив 56–65 % при густині струму 4,17 А/дм^2, 43–46% при 8,33 А/дм^2 та 32–40% при 12,5 А/дм^2 [4]. За концентрації 120 г/дм^3 вихід становив близько 73%, а при 200 г/дм^3 та густині струму 12,5 А/дм^2 – 73–74% [4].

Наведені результати показують, що зміна густини струму впливає на ефективність утворення активного хлору не ізольовано, а у взаємозв'язку з концентрацією хлоридів. За високих густин струму можуть посилюватися побічні процеси, зокрема подальше окиснення гіпохлоритів [4].

Конструкція діафрагмового електролізера визначає умови розділення анодних і катодних продуктів. Діафрагма дає змогу формувати відмінні умови в аноліті та католіті та окремо характеризувати їх pH і окисно-відновні властивості [2, 4].

3. Механізм утворення активного хлору

Електрохімічне утворення активного хлору починається з анодного окиснення хлорид-іонів. Утворений молекулярний хлор у водному середовищі переходить у взаємопов'язані форми, серед яких HClO та ClO^-. Співвідношення цих форм визначається умовами середовища, насамперед pH [1, 5].

Паралельно в катодній камері відбувається відновлення води з утворенням OH^-. Тому в діафрагмовій схемі аноліт і католіт можуть набувати різних кислотно-основних та окисно-відновних характеристик. Це має значення для перебігу подальших перетворень хлорвмісних сполук.

Кількість речовини, що теоретично може утворитися під час електролізу, пов'язана з кількістю пропущеної електрики відповідно до закону Фарадея. Для оцінювання практичної ефективності процесу застосовують вихід за струмом:

$$\eta = \frac{m_ф}{mT} * 100\%$$

де η – вихід за струмом, %;
$m_ф$ – фактично отримана кількість активного хлору;
mT – теоретично можлива кількість, визначена за кількістю пропущеної електрики.

4. Вплив основних параметрів електролізу

4.1. Вплив концентрації NaCl

Концентрація хлоридів визначає кількість вихідної речовини для анодного утворення хлору. Наведені в [4] результати показують, що за концентрацій NaCl 30–45 г/дм^3 вихід за струмом був нижчим, ніж за концентрацій 120-200 г/дм^3. За достатньо концентрованих розчинів у наведених режимах він досягав приблизно 70–74% [4].

4.2. Вплив густини струму

Для NaCl концентрацією 30–45 г/дм^3 при збільшенні густини струму від 4,17 до 12,5 А/дм^2 вихід за струмом зменшувався з 56–65 до 32–40% [4].

Це показує, що збільшення густини струму саме по собі не гарантує підвищення ефективності утворення цільового продукту.

4.3. Вплив діафрагмового розділення

Розділення анодної та катодної камер дає можливість зменшити безпосереднє змішування продуктів електродних реакцій і формувати відмінні умови в аноліті та католіті [2, 4]. Для процесу утворення активного хлору це має значення через залежність форм хлору від характеристик середовища.

5. Мета та завдання роботи

Мета роботи – дослідження закономірностей електрохімічного утворення активного хлору в діафрагмовому електролізері з проточною анодною камерою та інертною мембраною і визначення зміни фізико-хімічних характеристик аноліту і католіту під час електролізу.

– розглянути механізм електрохімічного утворення активного хлору в проточній анодній камері;

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

– встановити характер впливу концентрації NaCl та густини струму на вихід активного хлору за струмом в проточній анодній камері;

– розглянути роль діафрагмового розділення електродних камер;

– визначити зміну pH, Eh та сили струму в аноліті й католіті;

– проаналізувати отримані результати електролізу.

6. Методика досліджень

Для характеристики процесу використано результати досліджень, у яких змінювали концентрацію NaCl, густину струму та конструктивні параметри електролізера [2, 4]. Експеримент проведено у двокамерному діафрагмовому електролізері з проточною анодною камерою.

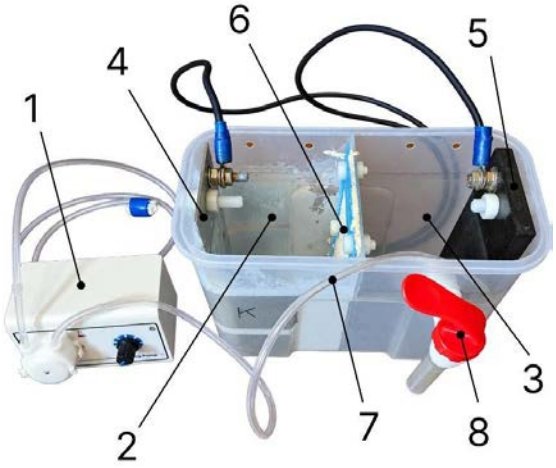

Фото 1. Лабораторна установка з двокамерним діафрагмовим електролізером із проточною анодною камерою, яка використовувалась для досліджень

1. Перистальтичний насос для подачі розчину в анодну камеру
2. Катодна камера електролізера
3. Анодна проточна камера електролізера
4. Катод із нержавіючої сталі
5. Анод із графіту
6. Діафрагма з белтингу
7. Патрубок подачі розчину в нижню частину анодної камери
8. Кран для відбору аноліту з проточної анодної камери

Вихідною водою була дистильована вода з додаванням NaCl до концентрації 8,0 г/л. Напруга живлення становила 24 В, витрата через проточну анодну камеру – 82 мл/хв, відстань між електродами – 153 мм. Анод – графітовий, катод із нержавіючої сталі, міжкамерне розділення виконане за допомогою бельтингу.

Подачу розчину здійснювали перистальтичним насосом. Протягом 6 год через встановлені часові проміжки визначали pH та окисно-відновний потенціал аноліту і католіту та фіксували силу струму.

7. Результати дослідження

7.1. Вихід активного хлору за струмом

Таблиця 1

Значення виходу активного хлору за струмом за різних режимів електролізу [4]

NaCl, г/дм³	j, А/дм²	η, %
30-45	4,17	56-65
30-45	8,33	43-46
30-45	12,5	32-40
120	-	≈73
200	12,5	73-74

Наведені дані свідчать про залежність виходу за струмом від концентрації NaCl та густини струму. При цьому найвищі наведені значення виходу за струмом спостерігалися за вищих концентрацій електроліту.

7.2. Результати експериментального дослідження

Початкові значення pH та Eh в обох камерах становили відповідно 7,62 та +231 мВ. Через 20 хв pH аноліту знизився до 5,97, а Eh підвищився до +1137 мВ. У католіті pH підвищився до 11,93, а Eh знизився до −736 мВ.

Таблиця 2

Основні результати експериментального дослідження

	Аноліт		Католіт		Струм, А
час	pH	Eh	pH	Eh	
0	7,62	231	7,62	231	1,39
20	5,97	1137	11,93	-736	1,42
40	5,81	1203	12,21	-795	1,55
60	6,78	1198	12,42	-834	1,66
80	6,74	1181	12,50	-848	1,78
100	6,80	1178	12,55	-865	1,84
120	6,89	1170	12,60	-881	1,93
140	6,95	1172	12,68	-823	1,94
160	7,03	1164	12,71	-814	1,95
180	7,04	1161	12,74	-806	1,98
200	7,07	1160	12,76	-792	2,02
220	7,16	1154	12,76	-785	2,06
240	7,20	1138	12,78	-780	2,10
260	7,27	1134	12,80	-767	2,10
280	7,28	1137	12,81	-766	2,10
300	7,29	1126	12,82	-758	2,10
320	7,38	1117	12,83	-760	2,10
340	7,51	1113	12,84	-776	2,14
360	7,57	1111	12,86	-780	2,17

7.3. Аналіз результатів

Результати експерименту засвідчують, що в досліджуваній діафрагмовій системі з проточною анодною камерою вже на початковому етапі електролізу формуються відмінні умовив в проточній анодній і катодній камерах. Через 20 хв різниця pH між камерами становила 5,96 одиниці, а різниця Eh – 1873 мВ.

В аноліті в проточній анодній камері одночасно спостерігали зниження pH та різке підвищення Eh, що характеризує формування окисного середовища.

У католіті відбувалося підвищення pH та формування від'ємного Eh. Такий характер змін відповідає розділеному перебігу анодних і катодних процесів у діафрагмовому електролізері [2, 4].

Отримані часові дані характеризують перебіг електрохімічного утворення активного хлору в досліджуваній системі. Водночас умови експерименту відрізняються від режимів, наведених у [4], зокрема концентрацією NaCl і конструкцією електролізера з проточною анодною камерою, тому наведені там значення виходу за струмом не можуть безпосередньо переноситися на досліджувану установку.

8. Висновки

Електрохімічне утворення активного хлору в розчинах NaCl пов'язане з анодним окисненням хлорид-іонів в проточній анодній камері та подальшими перетвореннями хлору у водному середовищі, співвідношення яких залежить, зокрема, від pH.

Зазначено, що концентрація NaCl, проточна анодна камера електролізера та густина струму істотно впливають на вихід активного хлору за струмом. Для NaCl 30-45 г/дм^3 при 4,17 А/дм^2 вихід становив 56–65%, при 8,33 А/дм^2 – 43-46 %, а при 12,5 А/дм^2 – 32–40 %. За концентрацій 120-200 г/дм^3 наведені значення досягали близько 73–74 % [4].

Діафрагмове розділення електродних камер та виконання конструкції електролізера з проточною анодною камерою забезпечує формування різних кислотно-основних та окисно-відновних умов в аноліті й католіті.

За NaCl 8,0 г/л, напруги 24 В і витрати 82 мл/хв через 20 хв pH аноліту становив 5,97, Eh +1137 мВ, а pH католіту – 11,93, Eh −736 мВ. Максимальне значення Eh аноліту +1203 мВ зафіксовано через 40 хв. За 6 год сила струму збільшилася з 1,39 до 2,17 А; pH аноліту після початкового зниження зріс до 7,57, а pH католіту – до 12,86.

Виконання конструкції діафрагмового електролізера з розділенням електродних камер електролізера на проточні анодні камери забезпечує практичне використання досліджених пристроїв- діафрагмових електролізерів для ефективного окислення забруднень в воді, особливо для окислення токсичних нітритів у малотоксичні нітрати, окислення багатокомпонентних залишок нафтопродуктів, СПАР, жирів і продуктів ГМО в системах із комплексами очищення води вищими водними рослинами, зокрема в комплексі з фільтраційно-регенераційними біоплато гідропонного типу (ФРБГТ) [6].

Література

1. Najafinejad M. S., Chianese S., Fenti A., Iovino P., Musmarra D. Application of Electrochemical Oxidation for Water and Wastewater Treatment: An Overview. Molecules. 2023. Vol. 28. 4208. DOI: 10.3390/molecules28104208.
2. Fylypchuk V., Fylypchuk L. Electrochemical water softening in a diaphragm electrolyzer. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 2(6). P. 44–51. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.96120.
3. Петрушина Г. О. Електрохімія : навч. посіб. Дніпро : Пороги, 2018. 84 с.
4. Гомеля М. Д., Крижановська Я. П., Пляцук Я. М. Отримання активного хлору та гіпохлориту натрію в закритому електролізері. Вісник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2024. № 4(23). С. 41–48. DOI: 10.20535/2617-9741.4.2024.319015.
5. White G. C. White's Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants. 5th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2010. 1062 p. DOI: 10.1002/9780470561331.
6. Bondar O.I., Kuryliuk O.M., Fylypchuk V.L. New "green" water purification technologies: combined filtration systems using higher aquatic plants with deep electrochemical purification and oxidation with chlorine dioxide. Екологічні науки. 2025. № 3(60). Забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl. ISSN: 2306-9716 (Print) 2664-6110 (Online). DOI: 10.32846

Дата першого надходження статті до видання: 06.10.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.11.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.11.2026