

DOI: 10.31319/2519-2884.47.2025.17

УДК 669.053.4

Сухий М.К., здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти,

ORCID: 0000-0002-4272-3704, e-mail: MKSukhyi@gmail.com

Нефедов В.Г., д.т.н., професор, ORCID: 0009-0001-5335-7738, e-mail: vnefedov@i.ua**Поліщук Ю.В.**, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-1552-4117, e-mail: yu.v.polishchuk@ust.edu.ua

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

Sukhyi Mykhailo, Postgraduate Student**Nefedov Volodymyr**, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the research laboratory of battery systems and energy**Polishchuk Yuliya**, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Inorganic Substances and Ecology

Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКТОРА ДЛЯ ОТРИМАННЯ ВОДНЮ ТА ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Розроблено новий екологічно чистий електрохімічний метод одержання водню з використанням розчинного алюмінієвого анода. На відміну від традиційного електролізу води, анодний процес виділення кисню замінено на розчинення алюмінію в лужному середовищі. У результаті, замість витрат енергії на електроліз (напруга розкладу води 1,23 В, напруга на електролізері понад 1,8 В), з'явилася можливість одночасно з одержанням водню генерувати електроенергію. Як анодний матеріал досліджували хімічно чистий алюміній та його сплав, що містить мідь, залізо та інші легувальні компоненти, а як додатковий катод використовували нікель. Оцінено вплив температури та концентрації електроліту на швидкість виділення водню на аноді та катоді, потенціали електродів, а також потужність, яку генерує реактор, який працює у режимі хімічного джерела струму.

Ключові слова: водень; електроліз; хімічне джерело струму; розчин гідроксиду натрію.

A new environmentally friendly electrochemical method for hydrogen production has been developed using a soluble aluminum anode. Unlike conventional water electrolysis, the anodic oxygen evolution process is replaced by aluminum dissolution in an alkaline medium. As a result, instead of consuming energy for electrolysis (the decomposition voltage of water is 1.23 V, and the voltage across an electrolyzer exceeds 1.8 V), it became possible to simultaneously produce hydrogen and generate electricity. Chemically pure aluminum and its alloy containing copper, iron, and other alloying elements were investigated as anode materials, while nickel was used as an additional cathode. The influence of temperature and electrolyte concentration on the rate of hydrogen evolution at both the anode and the cathode, the electrode potentials, as well as the power generated by the reactor operating in the mode of a chemical power source, was evaluated.

Keywords: hydrogen; electrolysis; chemical power source; sodium hydroxide solution.

Постановка проблеми

Електроліз води є одним з найбільш перспективних способів отримання чистого водню, який розглядається як альтернатива викопного палива в енергетиці майбутнього. Основною проблемою, що обмежує широке застосування електролітичного водню є високі енерговитрати на його отримання. Вони складаються з термодинамічних і кінетичних складових. Термодинамічні обумовлені великою енергією Гіббса ($\Delta G = -237 \text{ кДж/моль}$) на розкладання води, що відповідає напрузі розкладання 1,23В. У балансі напруги це майже 70 % від напруги на електролізері. Інші 30 % напруги припадають на кінетичні складові, а саме, на подолання поляризаційних та омичних опорів. Можливість зменшення енерговитрат полягає у заміні анодного процесу виділення кисню на інший, що протікає за менш позитивних потенціалів. Таким процесом мо-

же бути розчинення алюмінію. При цьому, якщо з'єднати анод із катодом з металу, який характеризується малим значенням перенапруги виділення водню, можна прискорити процес (підвищити щільність струму) і використовувати реактор не тільки для отримання водоводу, але і для генерації електроенергії. Отримані результати стануть основою для розробки нових технологій та конструкцій отримання водню зі зниженими енерговитратами.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сучасна промисловість та енергетика дедалі більше орієнтуються на використання екологічно чистих технологій. Це стосується, зокрема, зменшення споживання природних вуглеводнів і вугілля, які при згорянні утворюють оксиди вуглецю. Їхнє накопичення в атмосфері є однією з причин глобальних негативних кліматичних змін. Як енергоносії, який не спричиняє додаткової карбонізації атмосфери, розглядається водень [1].

Сьогодні значну частку водню отримують з природного газу та вугілля. Ці технології добре відпрацьовані, доступні й дешеві [2], але побічними продуктами, що утворюються разом з воднем, є ті самі оксиди вуглецю в кількості один моля на моль отриманого водню. Для уникнення утворення шкідливих побічних продуктів було запропоновано багато термохімічних методів, основним недоліком яких є використання високих температур від 700 до 1000 °С [3].

Приблизно 4% світового виробництва водню припадає на електроліз води. Такий водень має високу чистоту, а його виробництво є екологічно безпечним. Головним недоліком електролізного водню є високі енергозатрати, що й обумовлює його відносно невелику частку у промисловому виробництві [4]. На сьогодні термодинамічні й конструктивні аспекти балансу напруги при електролізі води добре вивчені й оптимізовані [5]. Напругу на елементарній комірці електролізера знижено до 1,8 В при густині струму до 3000 А/м² [6]. Це дозволяє вважати, що наразі досягнуто межі вдосконалення технології та апаратури електролітичного одержання водню, але вартість такого водню (100—200 \$ за 1000 нм³) все ще вища, ніж водню, одержаного шляхом конверсії метану (80 \$ за 1000 нм³) [7].

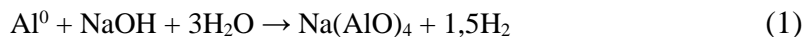
Основною причиною високих енергозатрат на одержання електролізного водню є значна напруга розкладання води (1,23 В), що відповідає енерговитратам на розрив хімічного зв'язку в молекулі води. З метою зниження енергозатрат запропоновано метод електролізу з розчинним анодом із брухту електронегативних металів, зокрема заліза або алюмінію [8, 9]. Вибір цих металів як анодного матеріалу зумовлений їх широким розповсюдженням у природі, техніці та побуті, а також доступністю й відносною дешевизною, особливо при використанні відходів промисловості. Продукти розчинення заліза та алюмінію легко гідролізуються й осаджуються з електроліту, що сприяє підтриманню чистоти й стабільного складу розчину. Утворені гідроксиди можуть бути використані як сировина для металургії або як коагулянти для очищення води.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження: оцінити електротехнічні характеристики (густина струму, різниця потенціалів, потужність) реактора для виділення водню та генерації електроенергії з розчинними анодами на основі алюмінію та його сплавів.

Виклад основного матеріалу

Останнім часом зростає інтерес до застосування алюмінію для промислового одержання водню [10, 11]. Як електроліт пропонують використовувати луги, оскільки інтенсивність взаємодії алюмінію з лужними розчинами значно вища, ніж з кислотами того ж ступеню дисоціації. У процесі утворюються алюмінати (1), а електродний потенціал алюмінію становить –2,32 В [12].



Розчинення алюмінію супроводжується виділенням водню. При цьому процеси розчинення алюмінію та виділення водню відбуваються на близько розташованих ділянках, де електричний опір найменший (рис. 1, а). Тобто, утворюється корозійний елемент з водневою деполіризацією із катодними і анодними ділянками. Процес проходить самовільно з виділенням теплової енергії, яку, в даному випадку, практично неможливо утилізувати. Перенапруга виділення водню на алюмінії, особливо високої чистоти, є досить значною, що суттєво обмежує швидкість процесу.

Якщо алюміній з'єднати з металом із низькою перенапругою виділення водню, частина електронів буде переноситися на цей метал. Таким чином він виступає як додатковий катод, просторово віддалений від анода (рис. 1, б). Це призводить до збільшення швидкості розчинення алюмінію (анодної густини струму). Загальний об'єм водню зростає, а густина катодного струму на поверхні алюмінію може зменшуватися завдяки переносу частини реакції на додатковий катод.

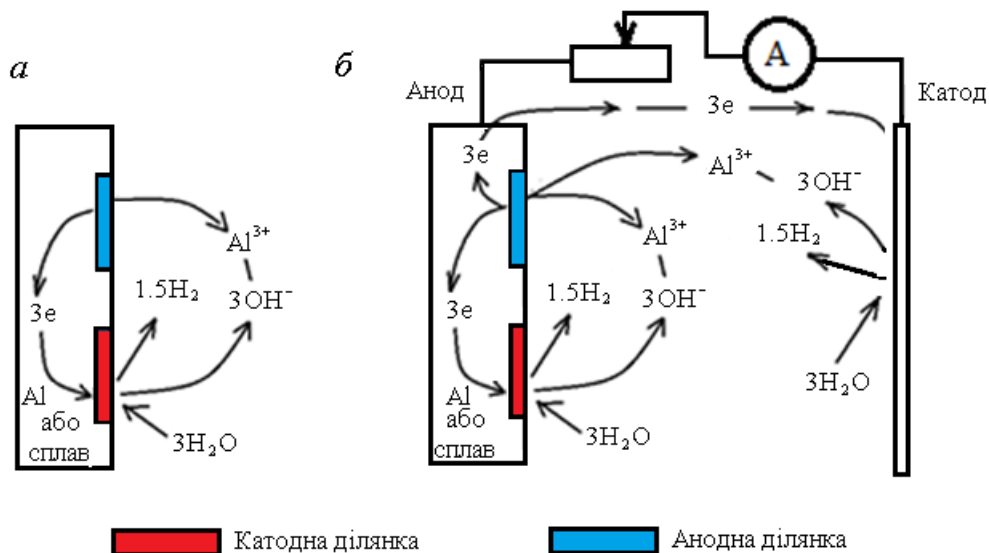


Рис. 1. Схема корозійного елементу з водневою деполіризацією (а) та короткозамкненого гальванічного елементу (б)

Крім того, використання додаткового катода з рівноважним потенціалом виділення водню в лужному середовищі близько мінус 0,8 В перетворює реактор на хімічне джерело струму (ХДС). При цьому густина струму та різниця потенціалів у такому ХДС значною мірою залежать від складу та структури анода (алюміній чи його сплав).

Оскільки передбачається використання брухту та відходів алюмінію довільного складу в якості анода, необхідно оцінити фактори, що впливають на швидкість розчинення алюмінію та його сплавів, тобто на корозійну стійкість цих матеріалів. Метал високої чистоти А999 розчиняється повільніше, ніж технічно чистий алюміній А0. Швидкість розчинення алюмінію А0 нижча, ніж у алюмінієвих сплавів. Деформовані сплави, які містять марганець, магній, кремній, мідь і залізо, характеризуються високою швидкістю корозії. Найвищу швидкість корозії мають сплави, що містять мідь і залізо (наприклад, сплави Д16, АК8, які містять до 3,8—4,9 % міді), а найменшу ті, що містять $\geq 4,5$ % магнію (АМг5 — 4,8—5,8 % магнію, АМг6 — 5,8—6,8 %). Причиною цього є структури типу Al_2Cu та Al_3Fe , перенапруга виділення водню на яких незначна.

Експерименти проводили в розчинах гідроксиду натрію концентрацією 0,1; 0,5; 1 та 2 моль/л у термостаті при температурах 20, 30, 40 і 50 °С. Розчинні аноди були виготовлені з чистого алюмінію (А999) та сплаву, що містить 3,8—4,9 % Cu; 1,2—1,8 % Mg; 0,3—0,9 % Mn та 0,5 % Fe. Катод виготовлено з нікелевої фольги. Електроди у вигляді пластин розміром 10×10 мм встановлювали на відстані 5 мм під бюреткою для збору газу, що виділяється. За об'ємом виділеного газу розраховували силу та густину струму розчинення алюмінію. У процесі експерименту вимірювали потенціали електродів відносно хлор-срібного електрода порівняння. Нікелевий катод підключали до алюмінієвого анода через амперметр М2020, що дозволило оцінювати співвідношення струмів виділення водню на алюмінії та на нікелі.

На першому етапі оцінювали швидкість розчинення алюмінію з виділенням водню та потенціал алюмінію в лужному розчині. Стандартний електродний потенціал (точка А, рис. 2—5)

відповідає довідниковим значенням. Потенціал виділення водню в лужному середовищі (точка С, рис. 2—5) визначали за рівнянням Нернста з урахуванням зміни потенціалу зі зростанням температури. Унаслідок деполяризації електрода воднем, який виділяється, потенціал алюмінієвого електрода зміщується з $-2,3$ В у позитивну сторону до приблизно $-1,5$ В. Величину струму виділення водню на алюмінії (точка В, рис. 2—5) розраховували за об'ємом виділеного газу. Вона становила близько $0,0024$ А (відповідно, густина струму $0,0024$ А/см²).

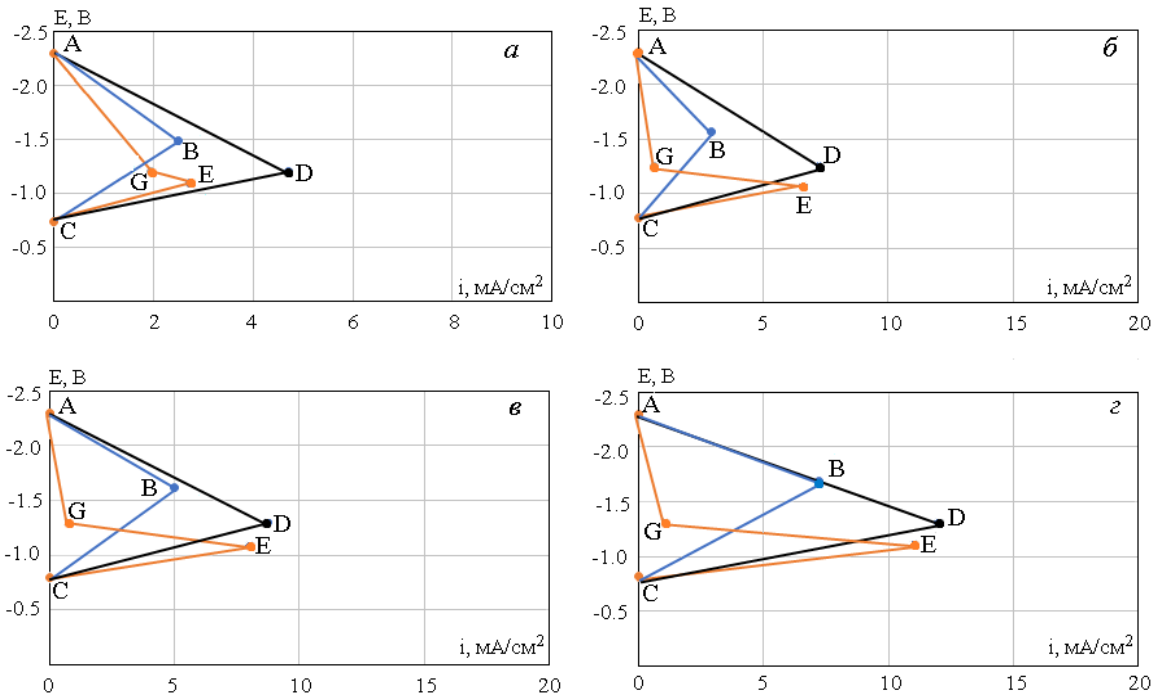


Рис. 2. Поляризаційні характеристики розчинення алюмінію і алюмінію в контакті з нікелевим електродом в $0,1\text{M}$ розчині гідроксиду натрію за температур, $^{\circ}\text{C}$: а — 20; б — 30; в — 40; г — 50.

На другому етапі до алюмінієвого електрода підключали нікелевий катод, вимірювали силу струму, що протікає через електроди (крива А — D — С, рис. 2—5), а також розраховували сумарну силу струму за об'ємом виділеного газу (точка D, рис. 2—5). Загальна сила струму виділення водню при цьому зростає майже вдвічі до $0,0047$ А. Потенціал алюмінієвого електрода зміщується до $-1,2$ В. Потенціал нікелевого електрода становить приблизно $-1,1$ В.

Частка струму виділення водню на алюмінії зменшувалася до $0,002$ А, тоді як на нікелевому електроді вона становила близько $0,0027$ А (лінія А — G — E — С, рис. 2—5).

Зі зростанням температури співвідношення потенціалів електродів зберігалось, а сила струму зростала до $0,012$ А на парі алюміній–нікель.

При збільшенні концентрації розчину гідроксиду натрію з $0,5$ до 2 М густина струму розчинення алюмінію та виділення водню на Al і Ni зростали. У 2 М NaOH при температурі 50 $^{\circ}\text{C}$ густина струму досягала $0,2$ А/см² (рис. 5г).

Потенціал алюмінію в лужному розчині (точка В, рис. 2—5) становить приблизно $-1,6$ В і незначно змінюється в розчинах різної концентрації. Відхилення потенціалу від термодинамічного значення (точка А, рис. 2—5) до точки В пояснюється деполяризацією електрода воднем, який виділяється.

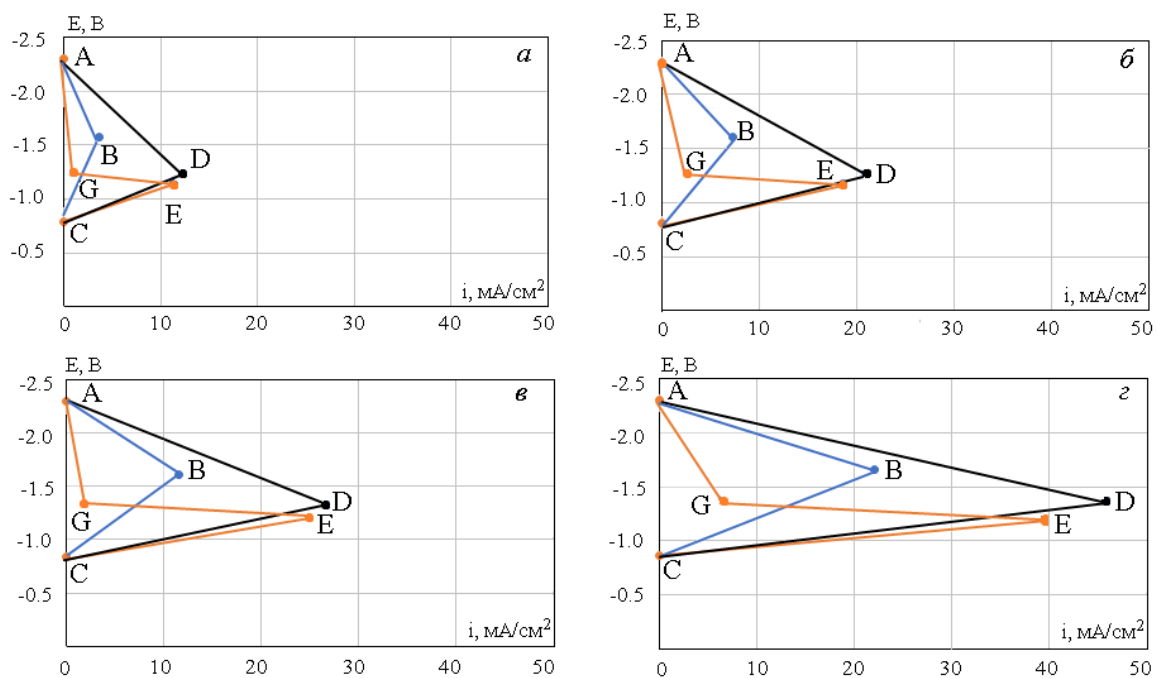


Рис. 3. Поляризаційні характеристики розчинення алюмінію і алюмінію в контакті з нікелевим електродом в 0,5М розчині гідроксиду натрію за температур, °С: а — 20; б — 30; в — 40; з — 50.

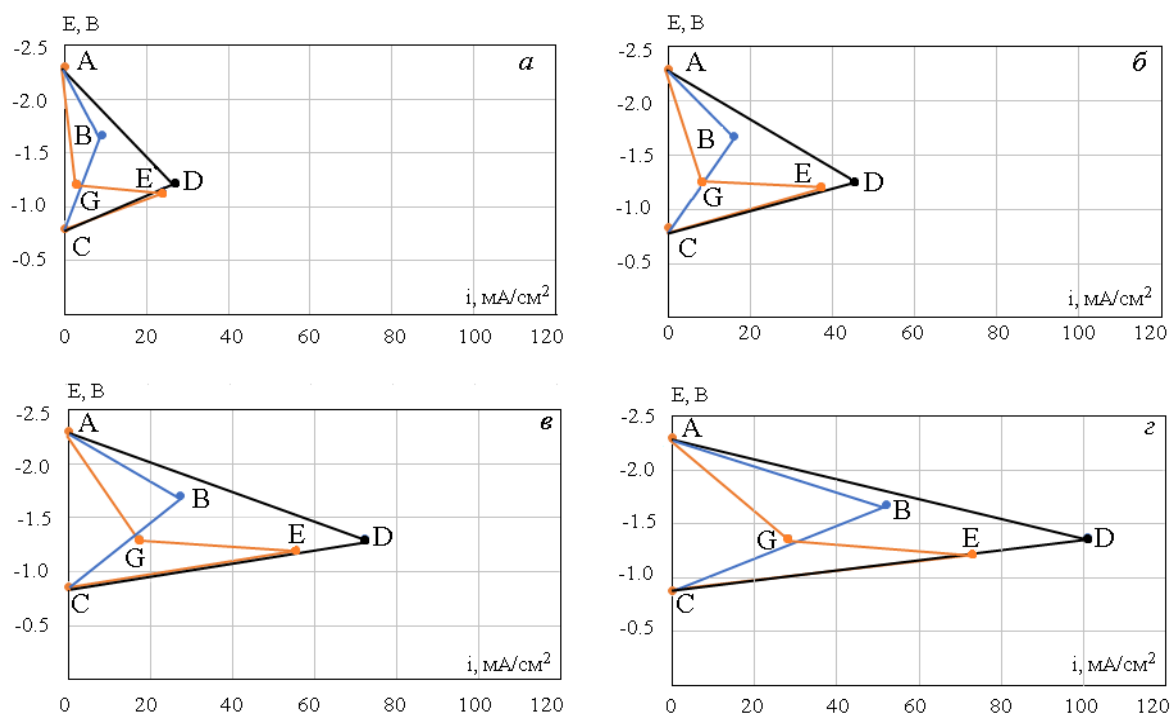


Рис. 4. Поляризаційні характеристики розчинення алюмінію і алюмінію в контакті з нікелевим електродом в 1,0М розчині гідроксиду натрію за температур, °С: а — 20; б — 30; в — 40; з — 50.

При підключенні нікелевого катода потенціал алюмінієвого електрода (точка D, рис. 2—5) зміщується в позитивну сторону приблизно на 200 мВ і становить близько $-1,4$ В. Це пов'язано з перенесенням частини електронів на нікелевий катод. Оскільки швидкість розчинення алюмінію лімітується процесом виділення водню, підключення додаткового катода і зсув потенціалу алюмінію в менш негативну сторону призводить до підвищення швидкості розчинення алюмінію (густини струму), від точки В до точки D на рис. 2—5.

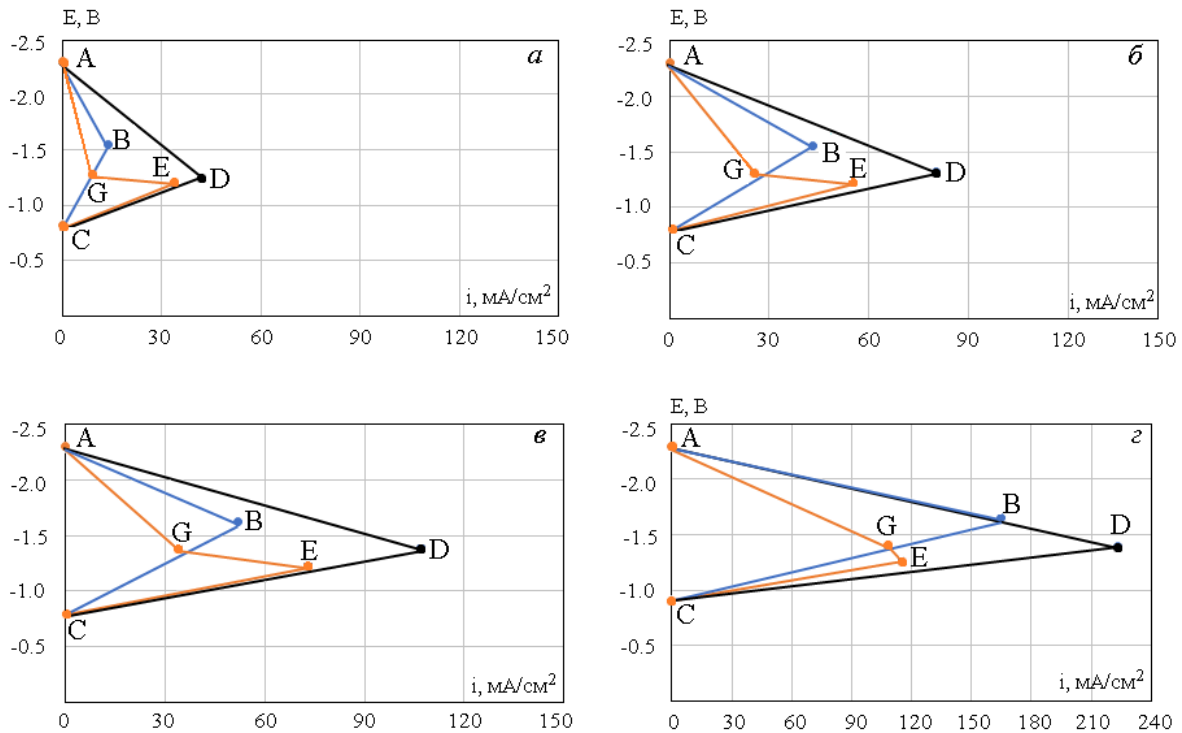


Рис. 5. Поляризаційні характеристики розчинення алюмінію і алюмінію в контакті з нікелевим електродом в 2,0М розчині гідроксиду натрію за температур, °С: а — 20; б — 30; в — 40; г — 50.

Різниця потенціалів між алюмінієвим та нікелевим електродами становить кілька десятків мілівольт (точки G і E). Це характерно для короткозамкнених електродів, де різниця потенціалів визначається омичними втратами напруги в провідниках першого та другого роду.

Окрім дослідження реактора, що працює в режимі короткозамкненого корозійного гальванічного елемента, були отримані розрядні криві реактора, який працює в режимі хімічного джерела струму. Підключення в схему (рис. 1) магазину опорів дозволяє визначити залежність потужності N від величини струму:

$$N = I^2 R,$$

де R — опір, Ом.

Залежності розрядної потужності від сили струму (густини струму) наведено на рис. 6. Як видно з отриманих даних, підвищення температури електроліту від 20 до 50 °С призводить до зростання максимальної питомої потужності у 3—4 рази. Слід відзначити синергетичний ефект впливу концентрації та підвищення температури, наприклад відбувається зростання потужності від $0,25 \times 10^{-6}$ Вт/см² (при 20 °С у 0,1 М розчині) до 15×10^{-6} Вт/см² (2 М розчин, 50 °С). Густина струму, якій відповідає максимум потужності, зростає від 0,7 мА/см² (при 20 °С у 0,1 М розчині) до 60 мА/см² (2 М розчин, 50 °С).

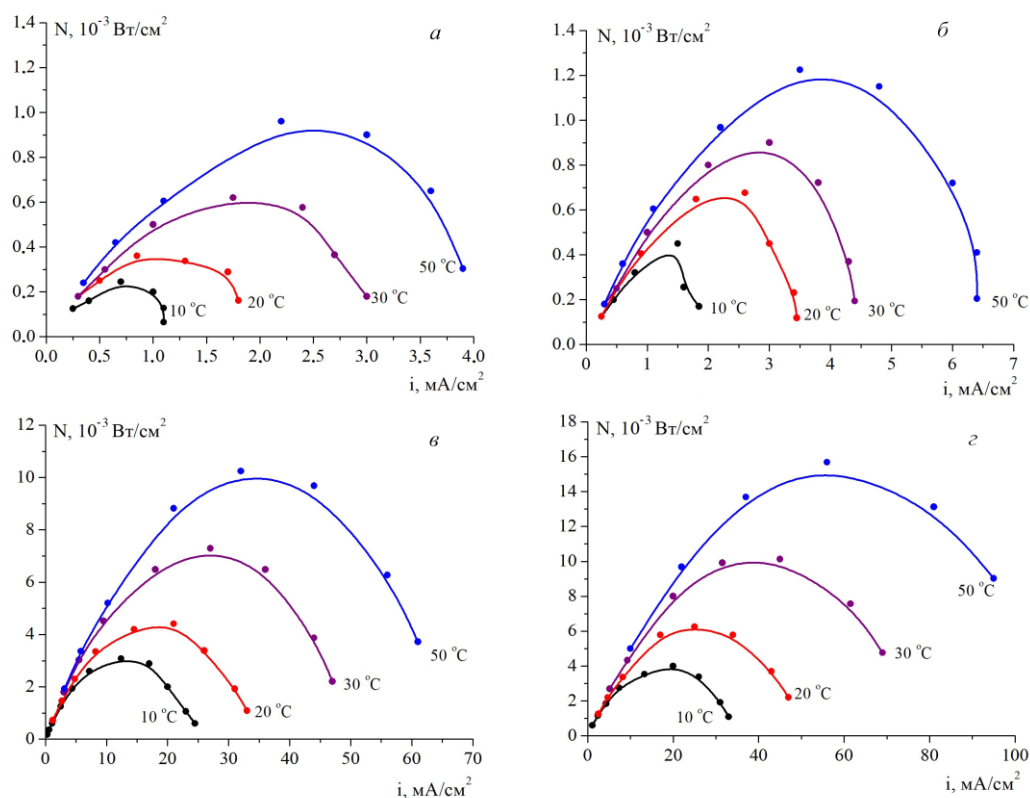


Рис. 6. Динаміка зміни потужності в розчині гідроксиду натрію концентрацією, М: а — 0,1; б — 0,5; в — 1,0; з — 2,0

Оцінимо співвідношення струмів виділення водню на алюмінії та нікелевому катоді (коефіцієнт К):

$$K = \frac{i_{H_2(Ni)}}{i_{H_2(Al)}}$$

Таблиця 1. Залежність співвідношення струмів виділення водню на різних електродах від температури та концентрації розчину

Концентрація розчину NaOH, М \ Температура, °С	Al A999				Al сплав			
	20	30	40	50	20	30	40	50
0,1	1,40	11,00	11,43	11,00	1,37	0,70	0,89	0,39
0,5	12,78	7,86	13,05	6,25	5,20	1,56	0,91	0,44
1,0	8,28	4,63	3,24	2,61	1,41	0,61	0,32	0,18
2,0	3,78	2,20	2,15	1,07	7,41	0,36	0,23	0,27

Із таблиці видно, що для алюмінію А999 при концентрації гідроксиду натрію 0,1 М зі зростанням температури величина коефіцієнта К (частка струму виділення водню на нікелі) зростає. Для більш концентрованих розчинів (1,0 і 2,0 М) навпаки зменшується. Із підвищенням концентрації за сталої температури частка струму виділення водню на нікелі зменшується майже на порядок.

Для алюмінієвого сплаву [13] за всіх концентрацій і зі зростанням температури частка струму виділення водню на нікелевому катоді зменшується, і при температурах вище 30 °С стає меншою, ніж для чистого алюмінію. За температури 20 °С підвищення концентрації розчину призводить до зростання частки струму на нікелевому катоді, тоді як при 40 і 50 °С частка струму виділення водню на алюмінії має тенденцію до збільшення. Це вказує на різке зниження перенапруги виділення водню на структурах Al_2Cu та Al_3Fe зі зростанням температури та концентрації розчину.

Абсолютні значення густини струму виділення водню на нікелевому катоді, короткозамкненому з анодом з чистого алюмінію А999 та його сплаву, наведено на рис. 7.

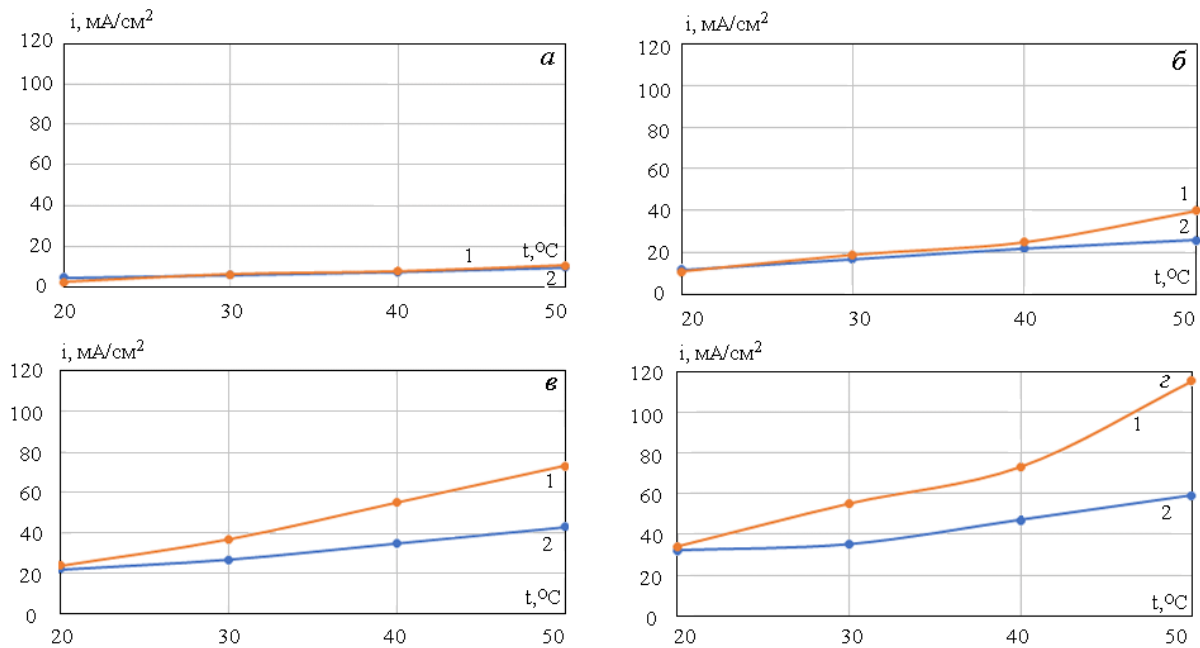


Рис. 7. Залежність густини струму виділення водню на нікелевому катоді, з'єднаного з електродом з чистого алюмінію (1) та сплаву алюмінію (2) від температури в розчинах NaOH концентрацією, М: а — 0,1; б — 0,5; в — 1,0; г — 2,0

З рисунка видно, що на катоді, замкненому з чистим алюмінієм та зі сплавом при температурі 20 °С у 0,1 М розчині густина струму виділення водню приблизно однакова й становить 0,002–0,004 А/см². При підвищенні температури до 50 °С у 0,1 М розчині гідроксиду натрію густина струму на катоді, з'єднаному з чистим алюмінієм і сплавом, зростає до 0,01–0,011 А/см².

При температурі 20 °С густина струму виділення водню для пари «чистий алюміній — нікель» та «сплав алюмінію — нікель» для всіх концентрацій однакова і змінюються при підвищенні концентрації до 0,03 А/см².

Зі зростанням температури густини струму виділення водню на нікелі у парі з А999 збільшуються до 0,04; 0,075 і 0,12 А/см² у розчинах концентрацією 0,5; 1,0 та 2,0 М відповідно. Для тих же умов у парі «нікель — сплав алюмінію» приріст густини струму виділення водню на нікелі значно менший і змінюється в межах 0,025; 0,04 та 0,06 А/см².

З урахуванням того, що густина струму розчинення алюмінієвого сплаву [13] значно перевищує зазначені величини, можна зробити висновок, що перенапруга виділення водню на структурах сплаву Al_2Cu та Al_3Fe менша, ніж на нікелі, особливо при вищих температурах.

Висновки

1. За допомогою поляризаційних діаграм досліджено процеси розчинення алюмінію та його сплаву в умовах корозійного елементу с водневою деполаризацією та короткозамкненого гальванічного елементу при підключенні додаткового нікелевого катода.

2. Встановлено, що густина струму розчинення анода А999 у 0,1 М розчині гідроксиду натрію з підвищенням температури від 20 до 50 °С збільшується від 0,002 до 0,007 А/см². При цьому, підключення додаткового катода збільшує швидкість розчинення алюмінію від 0,005 до 0,012 А/см².

3. У 2,0 М розчині NaOH за температури 20 °С співвідношення між густиною струму розчинення алюмінію а також при підключенні нікелевого катода зберігаються. При збільшенні температури до 50 °С ці показники зростають до 0,16 та 0,23 А/см² відповідно. Тобто процес розчинення алюмінію контролюється процесом виділення водню.

4. Вплив збільшення температури концентрації розчину має синергетичний ефект. Аналіз отриманих даних дозволяє стверджувати, що перенапряга виділення водню на алюмінії зі зростанням температури зменшується швидше, ніж на нікелі.

3. Питома електрична потужність, яка генерується реактором у режимі хімічного джерела струму, зростає при збільшенні як температури, так і концентрації розчину, і змінюється від $0,25 \times 10^{-6}$ Вт/см² у 0,1 М розчині при 20 °С до 16×10^{-6} Вт/см² у 2 М розчині при 50 °С.

Список використаної літератури

1. Yue M., Lambert H., Pahon, E., Rocke R., Jemei S., Hissel, D. Hydrogen energy system: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, Vol. 146, 111180. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111180>
2. Gupta R. B. Hydrogen Fuel: Production, Transport, and Storage. London : Boca Raton, New York : CRC Press, 2009. 603 p.
3. Козин Л. В., Волков С. В. Водородная энергетика и экология. Київ : Наукова думка, 2002. 334 с.
4. Hydrogen and Power to X Solutions. Brochure. URL: <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product-offerings/hydrogen-solutions.html> (дата звернення: 10.10.2024)
5. Chatenet M., Pollet B. G., Dekel D. R., Dionigi F., Deseure J., Millet P., Braatz R. D., Bazant M. Z., Eikerling M., Staffell I., Balcombe P., Shao-Horn Y., Schäfer H. Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments. *Chemical Society Reviews*, 2022, Vol. 51, 4583.
6. Виноградов Д. В. Современное состояние водородной энергетики. *Вопросы атомной науки и техники*, 2006, №1, С. 153–155.
7. Nefedov V., Matveev V., Sukhyi K., Polishchuk Yu., Bulat A., Bluss B., Mukhachev A. Electrochemical production of hydrogen in reactors with reduced energy costs. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023, Vol. 1156, 012034. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012034>
8. Ho C-Y. Hydrolytic reaction of waste aluminum foils for high efficiency of hydrogen generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, Vol. 42, P. 19622–19628. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.104>.
9. Xiao F., Yang R., Liu Z. Active aluminum composites and their hydrogen generation via hydrolysis reaction: a review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, Vol. 47, P. 365–386.
10. Справочник по электрохимии : справочник / Под ред. А.М. Сухотина. Ленинград : Химия, 1981. 488 с.
11. Sukhyi M., Nefedov V., Polishchuk Y. Analysis of the electrochemical method of production environmentally friendly hydrogen energy carrier according to the Evans diagram. *Monatshefte für Chemie - Chemical Monthly*, 2025, Vol. 156, P. 501–508. <https://doi.org/10.1007/s00706-025-03285-w>

ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF A REACTOR FOR HYDROGEN PRODUCTION AND ELECTRICITY GENERATION

Abstract

This article presents an innovative and environmentally friendly electrochemical method for hydrogen production in an alkaline medium using a soluble aluminum anode. In contrast to conventional water electrolysis, where the anodic process is the oxygen evolution reaction, the proposed system employs aluminum dissolution as the anodic reaction. This approach not only suppresses oxygen generation but also enables simultaneous hydrogen production and direct electricity generation within the same reactor.

Experimental investigations were conducted using pure aluminum (99.99%) or aluminum alloy, and a nickel cathode in sodium hydroxide solutions of varying concentrations (0.1–2.0 M) at temperatures ranging from 20 °C to 50 °C. The results demonstrated that increasing electrolyte concentration and temperature significantly enhanced the hydrogen evolution rate, reduced the overall cell potential, and increased the specific power output of the reactor.

References

- [1] Yue, M., Lambert, H., Pahon, E., Rocke, R., Jemei, S., & Hissel, D. (2021). Hydrogen energy system: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111180.
- [2] Gupta, R. B. (2009). *Hydrogen Fuel: Production, Transport, and Storage*. Boca Raton, London, New York: CRC Press. 603.
- [3] Kozin, L.V. & Volkov S.V. (2002). *Vodorodnaya energetika i ekologiya [Hydrogen energy]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
- [4] <https://new.siemens.com>.
- [5] Chatenet, M., Pollet, B. G., Dekel, D. R., et al. (2022). Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments. *Chemical Society Reviews*, 51, 4583.
- [6] Vinogradov, D.V. (2006). Sovremennoe sostoyanie vodorodnoj energetiki [The current state of hydrogen energy]. *Questions of nuclear science and technology*, №1, p. 153–155 [in Russian].
- [7] Nefedov, V., Matveev, V., Sukhyi, K., Polishchuk, Yu., Bulat, A., Bluss, B & Mukhachev, A. (2023) *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 1156, 012034.
- [8] Ho, C. Y. (2017). *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 19622.
- [9] Xiao, F., Yang, R., & Liu, Z. (2022). *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 365.
- [10] Sukhotin, A. M. (1981). *Spravochnyk po elektrokhimyy (Handbook of Electrochemistry)* Khimia, 488 [in Russian].
- [11] Sukhyi, M., Nefedov, V., & Polishchuk, Y. (2025). *Monatshefte für Chemie - Chemical Monthly*, 156, 501

Надійшла до редколегії 29.09.2025

Прийнята після рецензування 09.10.25

Опублікована 23.10.2025