

УДК 544.6.018.42

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОЛІЗНОГО ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ВОДНЮ І КИСНЮ ПРИ ПОСЛІДОВНОМУ І ПАРАЛЕЛЬНОМУ ПІДКЛЮЧЕННІ ЕЛЕКТРОДІВ

А. А. Шевченкоshevchenko84@ukr.net

ORCID: 0000-0002-6009-2387

М. М. Зіпунніков, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-0579-2962

А. Л. Котенко

ORCID: 0000-0003-2715-634X

Н. А. Чорна, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-9161-0298

Інститут проблем машинобудування
ім. А. М. Підгорного НАН України,
61046, Україна, м. Харків,
вул. Пожарського, 2/10

В статті наведено теоретичні та експериментальні дослідження процесу електрохімічного утворення водню і кисню при паралельному та послідовному підключенні електродів в одному електролітному об'ємі. Це дослідження ґрунтується на законах збереження маси, термодинаміки, електротехніки, електрохімії з використанням даних, отриманих на основі методів математичного та фізичного моделювання. Наведено дані з розробки та дослідження двох конструкцій електродних пакетів, а саме, з паралельним і послідовним з'єднанням електродів, з подальшим розміщенням кожного пакету в одному електролітному об'ємі. Експериментальні та розрахункові дані дозволили виявити закономірності протікання електрохімічної реакції розкладання рідкого електроліту на водень і кисень, розподілу напруги при паралельному та послідовному підключенні електродів в одному електролітному об'ємі. Також було встановлено зміну електричного потенціалу між внутрішніми електродами. Замір напруги проводився від електроду 1 до електроду 4. Результати експериментальних досліджень були відображені графічно. З наведених графіків видно, що напруга на клеммах внутрішніх електродів нижче, ніж необхідно для протікання електрохімічної реакції розкладання рідкого електроліту з генеруванням газоподібного водню і кисню. Для реалізації концепції розміщення послідовного (біполярного) з'єднання електродів в одному електролітному об'ємі необхідно акцентувати увагу на розробці конструкції електролізера, який дозволить: роз'єднати електроди електрично і забезпечити гальванічну ізоляцію їх між собою (окремо ізольовані електродні об'єми для кожної електродної пари). Це дасть змогу підвищити робочий тиск згенерованих водню і кисню до 20,0 МПа та знизити струмове навантаження електролізного процесу під час використання альтернативних джерел енергії.

Ключові слова: електролізер, послідовне і паралельне з'єднання електродів, водень, кисень, високий тиск.

Вступ

Зростання кількості енергетичних установок, що використовують джерела відновлюваної енергії, які входять до складу систем енергопостачання на регіональному, національному та міжнародному рівнях України [1], потребує все більшої уваги технологій перетворення і зберігання енергії [2, 3], щоб компенсувати її коливання та збалансувати надлишок і дефіцит згідно з потребами енергетичного ринку [4, 5].

Порівняно з іншими методами отримання водню [6, 7], електроліз відрізняється простотою технологічної схеми, можливістю ефективного використання відновлювальних джерел енергії [8–15], доступністю сировини і відносною легкістю обслуговування енергетичних установок [16–18]. Істотним недоліком електрохімічного методу отримання водню є велика енергоємність процесу розкладання води [19, 20].

Генерація водню і кисню високого тиску за допомогою циклічного методу з використанням газопоглинаючого електроду – це одна з технологій, яка може забезпечити зберігання великої кількості енергії у вигляді водню під високим тиском [21, 22] і використання його як екологічного палива для автотранспорту [23, 24].

Проблеми, пов'язані з широким застосуванням водних електролізерів, полягають в їх високій енергоємності та експлуатаційних витратах, які повинні бути знижені за рахунок оптимізації робочих процесів [25]. Експериментальні результати подаються по-різному, що ускладнює висновок про шляхи до оптимізації електролізного процесу [26]. Для забезпечення порівняння оцінки ефективності існує потреба в уніфікації методик і протоколів випробувань [27]. Для цього спочатку було розроблено методоло-

гію проведення експерименту, спроектовано основні елементи дослідницького обладнання, з подальшою перевіркою ефективності його застосування, щоб забезпечити зазначену точність вимірювання параметрів робочого процесу електролізу рідкого розчину лужного електроліту. Далі було визначено мінімальний набір вимог до обладнання випробувального комплексу. Робота підтверджує нагальну необхідність визначення одного або декількох еталонних вимірювальних параметрів на додаток до методики проведення експерименту і структури обладнання, щоб забезпечити точне порівняння результатів. Такий підхід створює передумови дослідження і розробки нових структур газопоглинаючого електроду [28] і на їх основі, концептуально нових генераторів водню і кисню високого тиску [29].

Необхідно приділити особливу увагу щодо умов випробувань і типу електролізера (монополярний або біполярний) [30], способу електричних з'єднань (паралельне або послідовне) [31] для отримання достовірних робочих характеристик.

Аналіз існуючих схем підключення електродів в електролізері для отримання водню і кисню

На рис. 1 наведено варіанти підключення електродних пакетів різних типів. За типом підключення електродів розрізняють монополярні пакети (електроди електрично з'єднані паралельно) (рис. 1, а) і біполярні пакети (електроди з'єднані послідовно) (рис. 1, в). Для зниження струмових навантажень і підвищення продуктивності монополярних електролізерів їх з'єднують в електричну мережу послідовно за допомогою електропровідних шин (рис. 1, б). На сьогодні широкого поширення набули біполярні електролізери фільтр-пресного типу, що обумовлено меншими габаритними розмірами електролізних систем і відсутністю множинних електричних з'єднань. Крім того, батарея

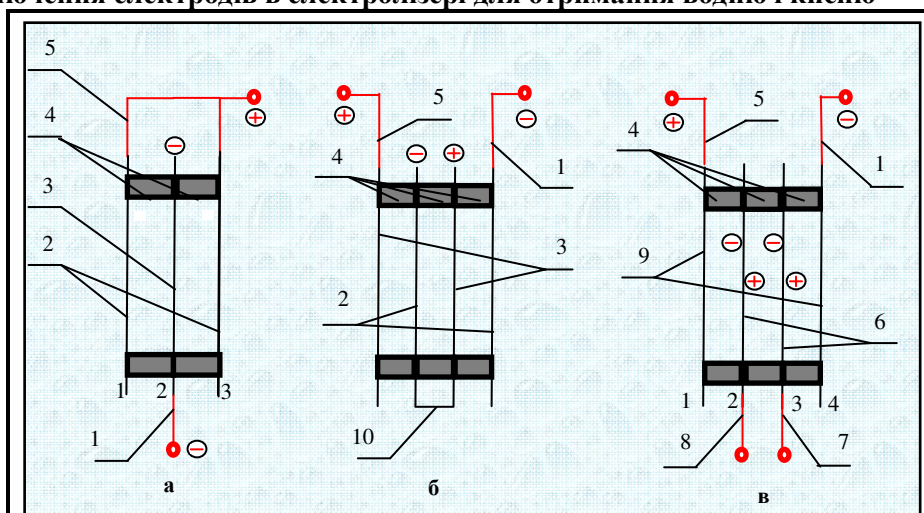


Рис. 1. Схеми підключення електродних пакетів:

- а – паралельне з'єднання електродів;
- б – послідовне з'єднання електродів монополярного типу;
- в – послідовне з'єднання електродів біполярного типу;
- 1 – струмовідвід катоду; 2 – анод; 3 – катод; 4 – діелектричні вставки;
- 5 – струмовідводи аноду; 6 – проміжні електроди послідовного з'єднання біполярного типу; 7 – клемма вимірювання напруги на проміжному електроді 3;
- 8 – клемма вимірювання напруги на проміжному електроді 2;
- 9 – основні електроди послідовного з'єднання біполярного типу;
- 10 – електропровідна шина

з біполярними електролізерами проектується на високу загальну напругу, в той час як батарея з монополярними комірками вимагає великих струмових навантажень за низької напруги.

До основних недоліків фільтр-пресних електролізерів відноситься велика кількість ущільнюючих матеріалів, технологічні труднощі з забезпеченням герметичності багатокомірчастих батарей.

Теоретичні основи розрахунку робочих характеристик електролізера при паралельному та послідовному підключенні електродів

Величина струму I в електричному колі живлення електролізера підтримується в межах відповідності обернено пропорційної залежності до кількості підключених модулів [32]:

$$I = \frac{m}{Nkt} \text{ або } I = \frac{VM}{22,4Nkt},$$

де m – маса газу, який вивільнився на електроді, кг; I – величина струму в електричному колі живлення електролізера, А; t – час проведення електролізу, с; M – молярна маса згенерованих газів; N – кількість підключених в електричне коло модулів електролізерів; V – об'єм згенерованих газів, м³.

Стосовно до схеми роботи електролізної установки залежність величини струму в електричному колі живлення модулів електролізера визначається законом Фарадея [32]

$$m = kQ = kIt, \quad (1)$$

де Q – кількість електрики, кул; k – електрохімічний еквівалент, обумовлений співвідношенням

$$k = \frac{M}{Na \cdot e \cdot z},$$

де e – заряд електрона; z – валентність присутніх у процесі іонів речовини, що вивільнилась; Na – число Авогадро.

Кількість молів газу, що вивільнився [32]

$$n = \frac{m}{M},$$

з урахуванням об'єму моля газоподібної речовини за нормальних умов складає 22,4 л, а об'єм газу, що вивільнився, визначається як

$$V = n \cdot 22,4 = \frac{m}{M} \cdot 22,4, \quad (2)$$

або якщо у формулу (2) підставити масу газу з формули (1), то об'єм газу, що вивільнився, буде визначатись як

$$V = \frac{kIt}{M} \cdot 22,4.$$

Для послідовної схеми з'єднання маса газу, що вивільнився, буде [32]

$$m = NkIt.$$

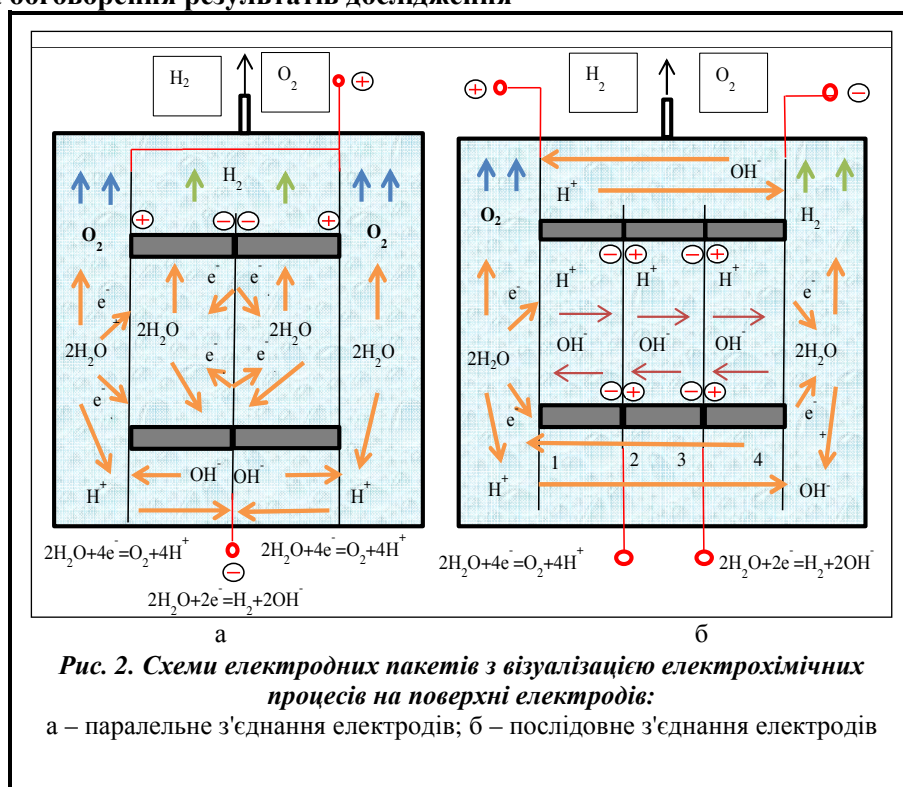
При цьому сумарна напруга, що витрачається на електролізер, росте за рахунок збільшення напруги в N раз [32]

$$U_{\Sigma} = NU_1,$$

де U_1 – напруга на кожному модулі електролізера.

Проведення експерименту та обговорення результатів дослідження

Для виконання експериментального дослідження процесів отримання водню і кисню у відділі водневої енергетики Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України були спроектовані основні елементи лабораторної установки, розроблена методологія проведення експерименту з подальшою перевіркою ефективності його застосування для забезпечення зазначеної точності вимірювання параметрів робочого процесу електролізу. Також були розроблені дві конструкції електродних пакетів з паралельним і послідовним з'єднанням електродів (рис. 2), які були почергово розміщені в прозорій герметичній ємності з електролітом.



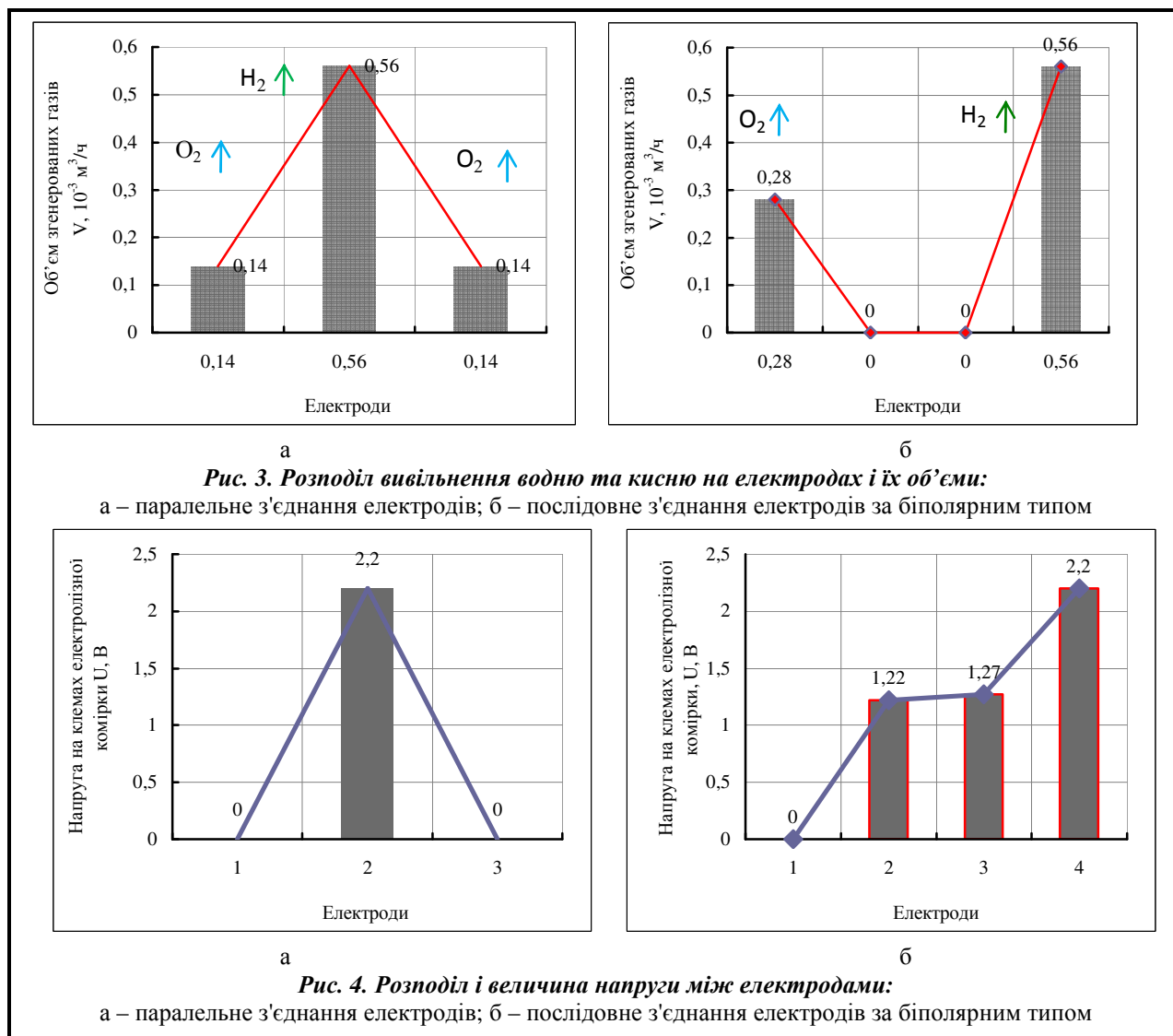
В монополярних електролізерах вся поверхня електроду має один потенціал, і вимоги до матеріалу і поверхні електроду однакові для всіх його частин. У біполярних електролізерах одна сторона електроду працює як катод, а інша – як анод [33, 34]. Біполярні електроди включені в електричну мережу як провідники другого роду [35].

Основні дані, отримані експериментальним шляхом під час дослідження паралельного і послідовного підключення електродного пакету, подані в таблиці. Електроди виготовлені із нержавіючої сталі типу 08X18H10T.

Результати дослідження типу підключення електродного пакету

Тип з'єднання	Площа електроду, см ²	Струм, А	Напруга, В	Густина струму, А/см ²	Об'єм водню, що вивільнився, м ³ /год	Об'єм кисню, що вивільнився, м ³ /год	Витрати електроенергії, кВт·год/м ³
08X18H10T – 08X18H10T							
Паралельне	29,75	0,44	2,2	0,007	$0,56 \cdot 10^{-3}$	$0,28 \cdot 10^{-3}$	5,2
Послідовне	29,75	0,44	2,2	0,015	$0,56 \cdot 10^{-3}$	$0,28 \cdot 10^{-3}$	5,2

При паралельному з'єднанні електродів електричний потенціал подавався на клему анодів 5 і клему катоду 1 (рис. 1, а), при цьому відбувалося вивільнення водню на катоді 3 і кисню на анодах 2. Напруга на клемі 1 і 5 електродного пакету становила 2,2 В (рис. 1, а) і не збільшувалася протягом експерименту (10 хв).



На рис. 3 подані гістограми розподілу вивільнення згенерованих водню та кисню при паралельному (за монополярним типом, рис. 3, а) і послідовному (за біполярним типом, рис. 3, б) з'єднанні електродів та їх об'єми.

При послідовному з'єднанні електродів електричний потенціал подавався на клеми 1 і 5 (рис. 1, б) електродних пакетів, після чого спостерігалось активне вивільнення газів на електродах 9, безпосередньо підключених до електроживлення (зовнішніх пластинах). При цьому газовивільнення на внутрішніх електродах 6 не було (рис. 3, б).

Розподіл напруги при паралельному і послідовному з'єднанні електродів в одному об'ємі електроліту зображено на рис. 4.

Також було помічено зміну потенціалу між електродами (рис. 4, б). Замір напруги проводився від електроду 1 до електроду 4 (рис. 1, б). З графіка видно, що напруга на клеммах внутрішніх електродів 7 і 8 нижче, ніж необхідно для протікання електрохімічної реакції розкладання рідкого електроліту $-1,48$ В.

На рис. 5 подані графіки розрахункового значення напруги електрохімічного процесу і відповідні їм експериментальні значення напруги при послідовному з'єднанні електродів.

Як видно з рис. 5, теоретична (розрахункова) напруга при послідовному підключенні електродів (08X18H10T – 08X18H10T) становить 6,6 В відповідно до 3 електродних пар. Значення напруги, яку отримано експериментальним шляхом, в одному електролітному об'ємі 25% розчину КОН становить 2,2 В і відповідає паралельній схемі підключення електродів.



Рис. 5. Графіки теоретичних і експериментальних значень напруги при послідовному з'єднанні електродів

Для реалізації концепції розміщення послідовного (біполярного) з'єднання електродів в одному електролітному об'ємі необхідно акцентувати увагу на розробці конструкції електролізера, здатного роз'єднати електроди електрично і забезпечити гальванічну ізоляцію їх між собою (окремо ізолювані електролітні об'єми для кожної електродної пари).

Висновки

Експериментальні дані показують, що величина напруги при розміщенні електродного пакету з послідовним підключенням електродів в одному електролітному об'ємі має становити 6,6 В на 3 електродні пари, а знаходиться на рівні 2,2 В, що відповідає паралельній схемі підключення електродів.

На основі досліджень електрохімічних характеристик електродних пакетів, сформованих за різними типами з'єднань, визначено, що для реалізації підключення електродів до джерела живлення за послідовною схемою з'єднання необхідно електрично ізолювати і розділити загальний об'єм електроліту на елементарні об'єми, що унеможливило протікання струму повз робочі поверхні активної робочої зони електродів.

Слід приділити особливу увагу розробці нової конструкції електролізера водню високого тиску з використанням газопоглинаючого електроду, що відповідав би зазначеним вище вимогам для послідовного підключення електродів в одному міцному корпусі.

Фінансування

Дослідження проводились за проектами № 13-20 «Акумулятори гідриду металу для систем, що постачають водень до паливних елементів»; № 2-20 «Дослідження процесів та удосконалення конструктивних і технологічних параметрів електролізних систем високого тиску для геліоводневих автономних установок енергозабезпечення». Виконані в рамках наукових проектів цільової програми наукових досліджень НАН України «Розробка наукових основ виробництва, зберігання та використання водню в системах автономного електроживлення».

Література

1. Iordache I., Bouzek K., Paidar M., Stehlík K., Töpler J., Stygar M., Dąbrowa J., Brylewski T., Stefanescu I., Iordache M., Schitea D., Grigoriev S. A., Fateev V. N., Zgonnik V. The hydrogen context and vulnerabilities in the central and Eastern European countries. *Intern. J. Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. Iss. 35. P. 19036–19054. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.128>.
2. Esposito D. V. Membraneless electrolyzers for low-cost hydrogen production in a renewable energy future. *Joule*. 2017. Vol. 1. Iss. 4. P. 651–658. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.07.003>.
3. Reuß M., Reul J., Grube T., Langemann M., Calnan S., Robinius M., Schlattmann R., Rau U., Stolten D. Solar hydrogen production: a bottom-up analysis of different photovoltaic–electrolysis pathways. *Sustainable Energy Fuels*. 2019. Iss. 3. P. 801–813. <https://doi.org/10.1039/C9SE00007K>.
4. Wirkert F. J., Roth J., Jagalski S., Neuhaus P., Rost U., Brodmann M. A modular design approach for PEM electrolyser systems with homogeneous operation conditions and highly efficient heat management. *Intern. J. Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45. Iss. 2. P. 1226–1235. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.185>.
5. Chang W. J., Lee K.-H., Ha H., Jin K., Kim G., Hwang S.-T., Lee H., Ahn S.-W., Yoon W., Seo H., Hong J. S., Go Y. K., Ha J.-I., Nam K. T. Design principle and loss engineering for photovoltaic–electrolysis cell system. *ACS Omega*. 2017. Vol. 2. Iss. 3. P. 1009–1018. <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b00012>.
6. Smolinka T. Fuels – Hydrogen Production. Water Electrolysis. *Encyclopedia Electrochemical Power Sources*. 2009. P. 394–413. <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00315-4>.
7. Phillips R., Dunnill Ch. W. Zero gap alkaline electrolysis cell design for renewable energy storage as hydrogen gas. *RSC Advances*. 2016. Vol. 6. Iss. 102. P. 100643–100651. <https://doi.org/10.1039/C6RA22242K>.
8. Kaya M. F., Demir N., Rees N. V., El-Kharouf A. Improving PEM water electrolyser's performance by magnetic field application. *Appl. Energy*. 2020. Vol. 264. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114721>.
9. Shevchenko A. A., Zipunnikov M. M., Kotenko A. L., Vorobiova I. O., Semykin V. M. Study of the influence of operating conditions on high pressure electrolyzer efficiency. *J. Mech. Eng.* 2019. Vol. 22. No. 4. P. 53–60. <https://doi.org/10.15407/pmach2019.04.053>.
10. Maier M., Meyer Q., Majasan J., Tan C., Dedigama I., Robinson J., Dodwell J., Wu Y., Castanheira L., Hinds G., Shearing P. R., Brett D. J. L. Operando flow regime diagnosis using acoustic emission in a polymer electrolyte membrane water electrolyser. *J. Power Sources*. 2019. Vol. 424. P. 138–149. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.03.061>.
11. Matsevytyi Yu. M., Chorna N. A., Shevchenko A. A. Development of a perspective metal hydride energy accumulation system based on fuel cells for wind energetics. *J. Mech. Eng.* 2019. Vol. 22. No. 4. P. 48–52. <https://doi.org/10.15407/pmach2019.04.048>.
12. Шевченко А. А. Создание автономных и сетевых энерготехнологических комплексов с водородным накопителем энергии. *Возобновляемая энергетика*. 2020. № 2 (61). С. 18–27. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.2\(61\).18-27](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.2(61).18-27).
13. Шевченко А. А., Козак Л. Р., Зипунников Н. Н., Котенко А. Л. Разработка автономных энерготехнологических комплексов с водородным накопителем энергии. *Косм. техника. Ракет. вооружение*. 2020. № 1. С. 160–169. <https://doi.org/10.33136/stma2020.01.160>.
14. Aminov R. Z., Bairamov A. N., Gariievskii M. V. Estimating the system efficiency of the multifunctional hydrogen complex at nuclear power plants. *Intern. J. Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45. Iss. 29. P. 14614–14624. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.187>.
15. Морозов Ю. П. Влияние теплопритока горного массива на температурный режим геотермальной циркуляционной системы. *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)*. 2018. № 25–30. С. 44–50. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.25-30.044-050>.
16. Sanath Y., De Silva K., Middleton P. H., Kolhe M. Performance analysis of single cell alkaline electrolyser using mathematical model. *IOP Conf. Ser.: Materials Sci. and Eng.* 2019. Vol. 605. P. 1–13. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/605/1/012002>.
17. Davis J. T., Qi J., Fan X., Bui J. C., Esposito D. V. Floating membraneless PV-electrolyzer based on buoyancy-driven product separation. *Intern. J. Hydrogen Energy*. 2018. Vol. 43. Iss. 3. P. 1224–1238. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.086>.
18. Соловей В. В., Жиров А. С., Шевченко А. А. Влияние режимных факторов на эффективность электролизера высокого давления. *Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования*: сб. науч. тр. 2003. С. 250–254.
19. Nikolic V. M., Tasic G. S., Maksic A. D., Saponjic D. P., Miulovic S. M., Marceta Kaninski M. P. Raising efficiency of hydrogen generation from alkaline water electrolysis–Energy saving. *Intern. J. Hydrogen Energy*. 2010. Vol. 35. Iss. 22. P. 12369–12373. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.069>.

20. Schalenbach M., Carmo M., Fritz D. L., Mergel J., Stolten D. Pressurized PEM water electrolysis: Efficiency and gas crossover. *Intern. J. Hydrogen Energy*. 2013. Vol. 38. Iss. 35. P. 14921–14933. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.09.013>.
21. Шевченко А. А. Использование ЭЛЭЛов в автономных энергоустановках, характеризующихся неравномерностью энергопоступления. *Авиаци.-косм. техника и технология*. 1999. № 13. С. 111–116.
22. Liguori S., Kian K., Buggy N., Anzelmo B. H., Wilcox J. Opportunities and Challenges of Low-Carbon Hydrogen via Metallic Membranes. *Progress in Energy and Combustion Sci.* 2020. Vol. 80. P. 1–29. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100851>.
23. Соловей В. В., Шевченко А. А., Воробьева И. А., Семикин В. М., Коверсун С. А. Повышение эффективности процесса генерации водорода в электролизерах с газопоглощающим электродом. *Вестн. Харьков. нац. автомоб.-дор. ун-та*. 2008. № 43. С. 69–72.
24. Соловей В. В., Зипунников Н. Н., Шевченко А. А. Исследование эффективности электродных материалов в электролизных системах с отдельным циклом генерации газов. *Пробл. машиностроения*. 2015. Т. 18. № 1. С. 72–76.
25. Solovey V. V., Khiem N. T., Zipunnikov M. M., Shevchenko A. A. Improvement of the membrane-less electrolysis technology for hydrogen and oxygen generation. *French-Ukrainian J. Chemistry*. 2018. Vol. 6. No. 2. P. 73–79. <https://doi.org/10.17721/fujcV6I2P73-79>.
26. Якименко Л. М., Модылевская И. Д., Ткачик З. А. Электролиз воды. М.: Химия, 1970. 264 с.
27. Carmo M., Fritz D. L., Mergel J., Stolten D. A comprehensive review on PEM water electrolysis. *Intern. J. Hydrogen Energy*. 2013. Vol. 38. Iss. 12. P. 4901–4934. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>.
28. Пристрій для генерації водню високого тиску: пат. 103681 Україна: МПК С25В 1/12, С25В 1/03. № а201115332; заявл. 26.12.2011; опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21. 4 с.
29. Solovey V. V., Zipunnikov M. M., Shevchenko A. A., Vorobjova I. O., Kotenko A. L. Energy effective membrane-less technology for high pressure hydrogen electro-chemical generation *French-Ukrainian J. Chemistry*. 2018. Vol. 6. No. 1. P. 151–156. <https://doi.org/10.17721/fujcV6I1P151-156>.
30. Томилов А. П. Прикладная электрохимия: учебник. М.: Химия, 1984. 520 с.
31. Сухотин А. М. Справочник по электрохимии. Л.: Химия, 1981. 488 с.
32. Якименко Л. М. Электродные материалы в прикладной электрохимии. М.: Химия, 1977. 264 с.
33. Kumagai M., Myung S.-T., Kuwata S., Asaishi R., Yashiro H. Corrosion behavior of austenitic stainless steels as a function of pH for use as bipolar plates in polymer electrolyte membrane fuel cells. *Electrochimica Acta*. 2008. Vol. 53. No. 12. P. 4205–4212. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.12.078>.
34. Langemann M., Fritz D. L., Müller M., Stolten D. Validation and characterization of suitable materials for bipolar plates in PEM water electrolysis. *Intern. J. Hydrogen Energy*. 2015. Vol. 40. No. 35. P. 11385–11391. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.155>.
35. Tawfik H., Hung Y., Mahajan D. Metal bipolar plates for PEM fuel cell – a review. *J. Power Sources*. 2007. Vol. 163. No. 2. P. 755–767. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.09.088>.

Надійшла до редакції 09.11.2020

Исследование процессов электролизного получения водорода и кислорода при последовательном и параллельном подключении электродов

А. А. Шевченко, Н. Н. Зипунников, А. Л. Котенко, Н. А. Черная

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины,
61046, Украина, г. Харьков, ул. Пожарского, 2/10

В статье представлены теоретические и экспериментальные исследования процесса электрохимического образования водорода и кислорода при параллельном и последовательном подключении электродов в одном электролитном объеме. Это исследование основано на законах сохранения массы, термодинамики, электротехники, электрохимии с использованием данных, полученных на основе методов математического и физического моделирования. Приведены данные по разработке и исследованию двух конструкций электродных сборок, а именно, с параллельным и последовательным соединением электродов, с последующим размещением каждого пакета в одном электролитном объеме. Экспериментальные и расчетные данные позволили выявить закономерности протекания электрохимической реакции разложения жидкого электролита на водород и кислород, распределения напряжения при параллельном и последовательном подключении электродов в одном электролитном объеме. Также было установлено изменение электрического потенциала между внутренними электродами. Замер на-

пряжения проводился от электрода 1 к электроду 4. Результаты экспериментальных исследований были отражены графически. Из приведенных графиков видно, что напряжение на клеммах внутренних электродов ниже, чем необходимо для протекания электрохимической реакции разложения жидкого электролита с генерированием газообразного водорода. Для реализации концепции размещения последовательного (биполярного) соединения электродов в одном электролитном объеме необходимо акцентировать внимание на разработке конструкции электролизера, который позволит: разъединить электроды электрически и обеспечить гальваническую изоляцию их между собой (отдельно изолированные электролитные объемы для каждой электродной пары). Это даст возможность повысить рабочее давление сгенерированных водорода и кислорода до 20,0 МПа и снизить токовую нагрузку электролизного процесса при использовании альтернативных источников энергии.

Ключевые слова: электролизер, последовательное и параллельное соединение электродов, водород, кислород, высокое давление.