



УДК 621.357.12

І. П. Назаренко, д.т.н.

ORCID: 0000-0001-6365-6777

В. Л. Іконніков

ORCID: 0000-0001-6381-1925

А. Б. Чебанов, к.т.н.

ORCID: 0000-0002-8014-8624

С. В. Дубініна

ORCID: 0000-0002-2029-8989

¹Таврійський державний агротехнологічний університет імені
Дмитра Моторного

e-mail: igornazarenko01@gmail.com тел. 0687968132

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ В ЕЛЕКТРОЛІЗЕРАХ З ЕЛЕКТРОЛІТИНОЮ МЕМБРАНОЮ

Анотація. Стаття присвячена дослідженню енергоефективності процесу електролізу в електролізерах з електролітичною мембраною під впливом електричних параметрів. Для встановлення цих характеристик, виготовлена експериментальна установка, використано необхідне вимірювальне обладнання, розроблена методика проведення досліджень та проведений необхідний розрахунок вимірюваних величин. В результаті, виявлено вплив робочої напруги на споживання струму, що протікає через електроди електролізера і споживану ним потужність, значення яких збільшуються із збільшенням робочої напруги. Встановлено, що енергоефективність процесу в електролізерах із застосуванням електролітичної мембрани зменшується із збільшенням робочої напруги. При робочій напрузі у 1,5 В, 1,7 В та 2 В, енергоефективність відповідно складає 90,7%, 89,5% та 88,3%.

Ключові слова. Електроліз, електролізер, паливний елемент, водень, відновлювальні джерела енергії.

Постановка проблеми. Воднева енергетика включає сукупність технологій виробництва, транспортування, акумулювання та використання універсального вторинного енергоносія – водню. У концепції водневої енергетики водень доповнює собою найважливіший вторинний енергоносіє – електроенергію. Енергетичне використання водню визначається можливістю екологічно чистого отримання електроенергії та тривалого зберігання без втрат.

Спочатку концепція водневої енергетики у найбільш «чистому» вигляді передбачала отримання водню на великих підприємствах шляхом розкладання води з витратою ядерної енергії, транспортування



водню до центрів його споживання та розподіл з подальшим використанням його як палива у тих випадках, де сьогодні використовуються газ, рідке чи тверде паливо [1,2].

З розвитком відновлюваної енергетики, що спирається на змінні ресурси сонячної та вітрової енергії, а також поширення технологій розподіленої генерації та інтелектуальних мереж проблема довготривалого і сезонного зберігання енергії виходить на перший план. Вирішення цієї проблеми забезпечить компенсацію коливання, збалансування надлишку і дефіциту електричної енергії згідно з потребами енергетичного ринку [3-5]. Для України важливим аспектом в рамках вирішення вище представлені проблеми є широке використання водню як високоефективного енергоносія, що забезпечить найбільш перспективний шлях до вирішення енергетичних проблем, таких як створення необхідних балансових потужностей [6]. Окрім цього використання водню суттєвого скоротить шкідливі викиди до атмосфери [7].

Один із найбільш перспективних шляхів розвитку водневої енергетики заснований на використанні водню, що вироблений методом електролізу, наприклад [8,9]. Електроліз відрізняється простотою технологічної схеми, можливістю ефективного використання відновлювальних джерел енергії, доступністю сировини і відносною легкістю обслуговування енергетичних установок [10]. Однак, істотним недоліком такого електрохімічного методу отримання водню є велика енергоємність процесу розкладання води [11]. Найменш енергоємним (тобто той, який має найбільшу енергоефективність) є метод електролізу із застосуванням електролітичної мембрани, наприклад [12]. В такому пристрої швидкість виділення водню та енергоефективність самого процесу буде залежати від напруги, що подається до електролізера. Пошук оптимальних параметрів представляє актуальне завдання даної роботи, так як такі данні нададуть можливість у серійних електролізерах встановити найбільшу енергоефективність процесу.

Аналіз останніх досліджень. Відомі різні способи виробництва водню, починаючи від традиційних, таких як, наприклад, конверсія вуглеводнів, та закінчуючи біологічними методами, коли водень виділяється спеціально підібраними мікроорганізмами [13]. У світі промисловим методом виробляється близько 50-60 млн. т. водню, при цьому практично 95% водню, що виробляється, виходить з вуглецевмісної сировини, в першу чергу копалин – природного газу та вугілля, а також нафтопродуктів. Більшість виробленого водню є побічним продуктом переробки нафти і використовується на місці виробництва в технологічній схемі. Наприклад, у ЄС у 2006 р. 42% водню вироблялося з нафтопродуктів та 47% споживали на

нафтопереробку [2]. Другим основним джерелом водню є природний газ (метан), а сферою споживання – виробництво аміаку [2].

Ключові технології отримання водню з вуглеводнів, вугілля та біомаси включають: конверсія (зокрема парова конверсія метану); часткове окислення та автотермічна конверсія; газифікація; біологічні методи (ферментація, фотоліз). Термохімічні методи засновані на проміжному отриманні синтез-газу, що являє собою суміш монооксиду вуглецю і водню в пропорціях до 1:3 [13].

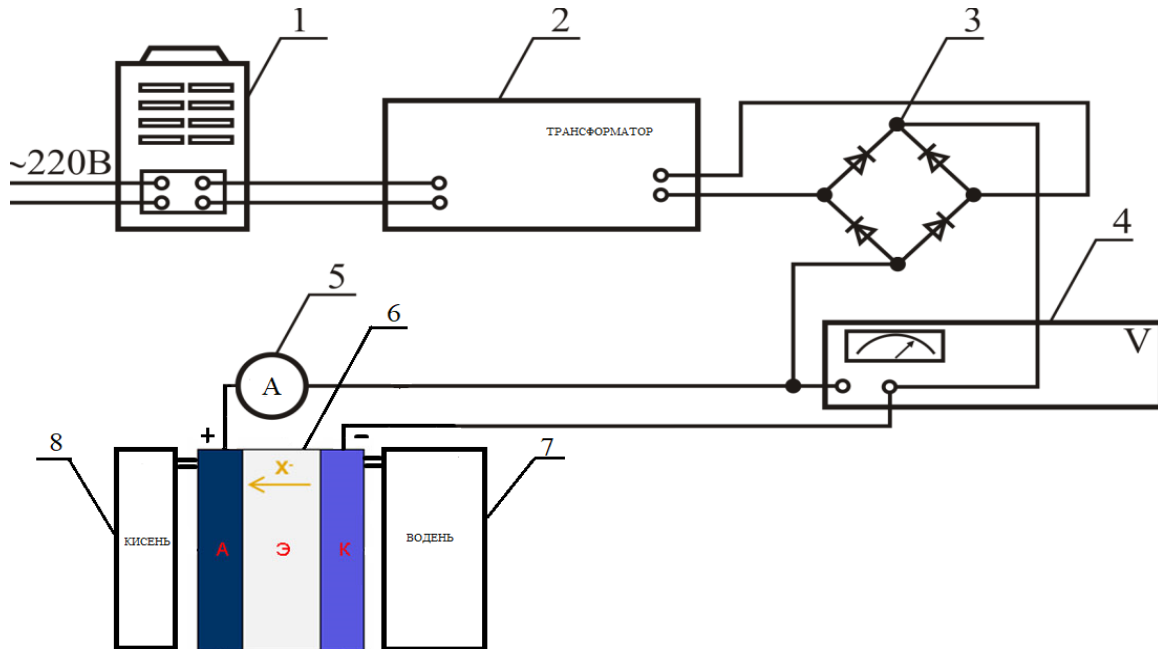
При отриманні водню з вихідної сировини можливе отримання проміжних продуктів, таких як синтетичні рідкі палива, біогаз та ін. із застосуванням таких методів як піроліз, торефікація, гідроліз, етерифікація, анаеробне зброджування, алкогольна ферментація тощо. Ці проміжні продукти можуть бути перероблено також у водень [13].

Найбільш розповсюдженим методом отримання водню є електролітичне розкладання води (електроліз). Основні види електролізу відрізняються типом носіїв заряду, такими як гідроксид-іони у лужному електролізі води та протони у кислотному електролізі. Високопродуктивні лужні та твердополімерні (PEM) електролізні системи у теперішній час виробляються багатьма зарубіжними компаніями, такими як CETH2/Areva H2Gen, Hydrotechnik, Hydrogenics, ITM Power, McPhy Energy, NEL, Next Hydrogen, PERIC, Siemens [14]. При виробництві, кожний електролізер оснащується допоміжними системами водопідготовки, охолодження та очищення до 99.999%, термін експлуатації становить 6-11 років. Але такий метод розкладання водню має доволі низький ККД, який безпосередньо впливає на енергоефективність процесу. Для серійних лужних електролізерів ККД за нижньою теплоотою згоряння водню на початок експлуатації знаходиться в діапазоні 52%-62% і 67-64% для твердополімерних, які характеризуються більшою швидкістю деградації, ніж лужні [14].

Формування цілей статті. Ціллю статті є оцінка впливу електричних параметрів процесу електролізу в електролізері із застосуванням електролітичної мембрани на його енергоефективність.

Основна частина. Для виконання експериментальних досліджень процесу отримання водню і кисню виготовлено експериментальну лабораторну установку (рис. 1). Лабораторна установка для дослідження процесу електролізу (рис. 1) складається з лабораторного автотрансформатора 1, необхідного для регулювання напруги, трансформатора 2 з випрямним діодним мостом 3, необхідного для зниження напруги та її випрямлення, вольтметру-амперметру DSN-VC288 4 та 5, електролізеру 6, двох камер об'ємом 20 мл для накопичення водню 7 та об'ємом 10 мл для накопичення кисню 8. При проведенні експериментальних досліджень було використано

електролізер з металевими електродами покритими платиною та розділених між собою електролітичною мембраною з твєдополімерного електроліту. Час накопичення водню вимірювався секундоміром (на схемі не вказано).



- 1 – лабораторний автотрансформатор;
2 – трансформатор; 3 – випрямний діодний міст;
4, 5 – вольтметр-амперметр DSN-VC288; 6 – електролізер;
7 – камери об'ємом 20 см³ для накопичення водню; 8 – камера об'ємом 10 см³ для накопичення кисню 8.

Рисунок 1. Схема лабораторної установки для дослідження електролізу

Показник енергоефективності процесу електролізу визначався, як:

$$\eta = \left(1 - \frac{W_{\Sigma 2}}{W_{\Sigma 1}}\right) \cdot 100, \quad (1)$$

де $W_{\Sigma 2}$ – витрати електричної енергії на виробництво водню, Дж/м³

$W_{\Sigma 1}$ – нижча теплотворна здатність, що може бути отримана при спалюванні водню. За [15] нижча теплотворна здатність водню становить 120 мДж/м³.

Складена методика проведення досліджень, яка полягала у наступному. Електролізер 6 заповнювався очищеною медичною дистильованою водою. Після цього, на електроди подавалась встановлена напруга постійного струму, яка в процесі одного дослідження підтримувалася постійною і не змінювалася. Значення



напруг постійного струму при яких проводилися дослідження, були наступні: $U_1 = 1,5\text{В}$; $U_2 = 1,75\text{В}$; $U_3 = 2\text{В}$. Величини напруг встановлені з урахуванням попередніх досліджень та методик, що представлено у [16]. При кожній нарузі на електродах електролізера б проводилось вимірювання струму, часу накопичення водню та об'єм водню, що отримується.

Розраховували потужність, що витрачається на виробництво водню за формулою в межах заданого часу:

$$P_i = I_i \cdot U_i, \quad (2)$$

де I_i – струм, що протікає через електроди електролізера, А;

U_i – робоча напруга процесу, В;

Розраховували витрати електричної енергії на виробництво водню лабораторним електролізером за формулою:

$$W_i = P_i \cdot (t_{i+1} - t_i), \quad (3)$$

де W_i – витрати електричної енергії на виробництво водню за час $(t_{i+1} - t_i)$, Дж;

$(t_{i+1} - t_i)$ – час, за який витрачено визначену кількість енергії на отримання відповідного об'єму водню, с.

У дослідженнях інтервал часу Δt , при яких фіксували значення параметрів з урахуванням попередніх досліджень [16] встановлено на рівні $\Delta t = 10$ сек. Таким чином, значення $(t_{i+1} - t_i)$ визначалося різницею між часом, за який виконувався поточний дослід t_{i+1} та часом, за яким відбувався попередній дослід t_i (або Δt).

Розраховували сумарну витрату електричної енергії на виробництво водню за формулою:

$$W_{\Sigma 2} = \sum W_i, \quad (4)$$

Енергоефективність процесу розраховували за формулою (1) з урахуванням тієї кількості водню, що отримано при дослідженнях. Тобто, якщо нижча теплотворна здатність для 1 м^3 водню становить $W_{\Sigma 1} = 120\text{ мДж/м}^3$, а при дослідженнях максимально отримано 20 мл, тоді для такої кількості водню, показник $W_{\Sigma 1}$ буде складати 2,4 кДж.

Проведеними дослідженнями визначено залежності струму, що протікає через електроди I , А (рис. 2) та потужності, що витрачається

на виробництво водню P , Вт (рис. 3) від часу накопичення водню t , с при різних значеннях робочої напруги U , В. Крайні праві точки усіх залежностей говорять про те, що за такий час отримано повний об'єм камери для водню, а саме $V = 20$ мл.

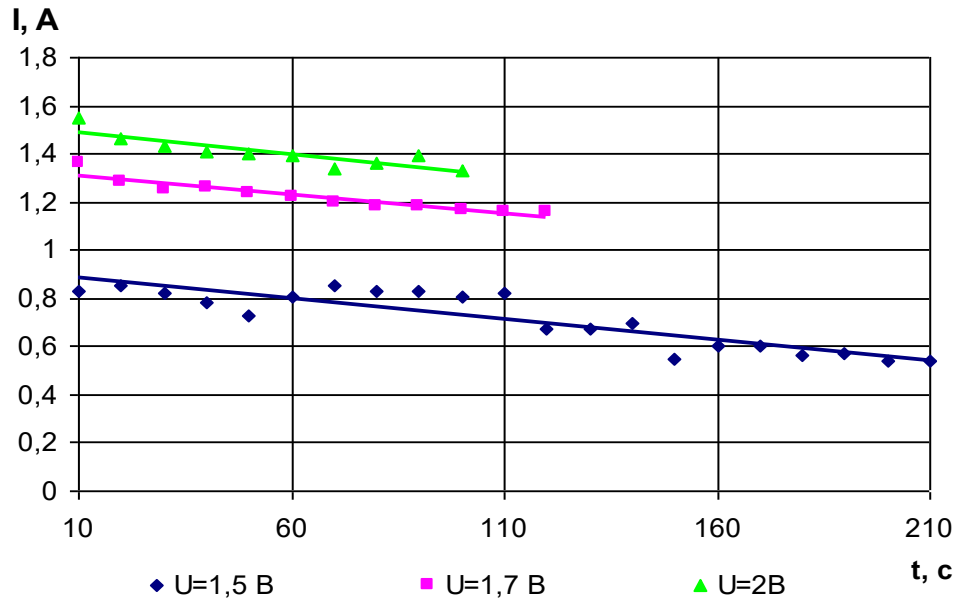


Рисунок 2. Залежність струму, що протікає через електроди I , А від часу накопичення водню t , с

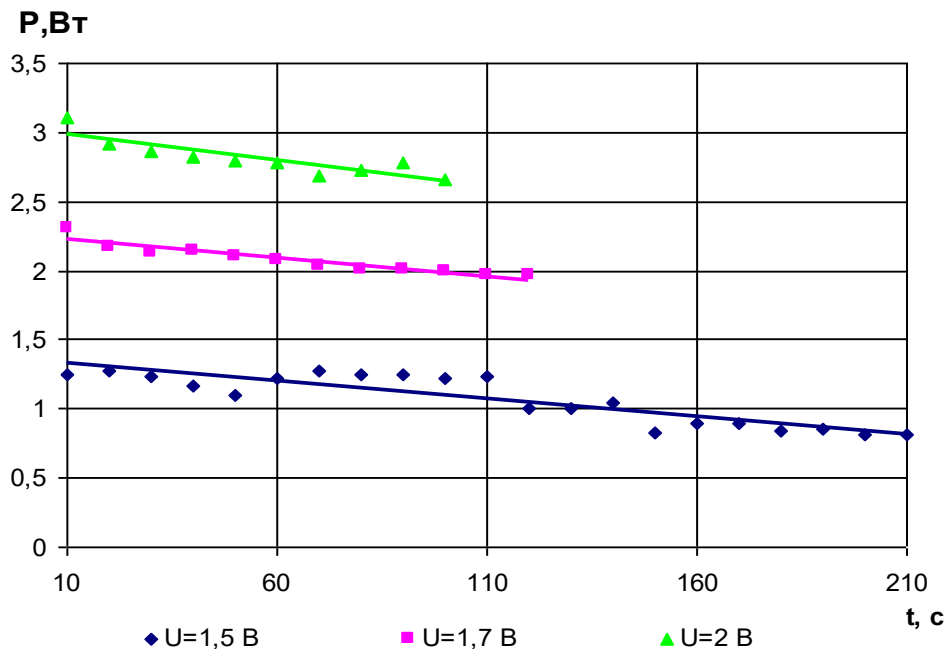


Рисунок 3. Залежність потужність, що витрачається на виробництво водню P , Вт від часу накопичення водню t , с

Аналізом залежностей (рис. 2 та 3) встановлено, що час накопичення водню у камеру об'ємом $V = 20$ мл зменшуються при



збільшені робочої напруги процесу отримання водню. Так, при робочій напрузі $U = 1,5\text{ В}$, час, за який наповнюється камера об'ємом $V = 20\text{ мл}$, складає $t = 210\text{ с}$; при $U = 1,7\text{ В}$, $t = 120\text{ с}$; при $U = 2,0\text{ В}$, $t = 100\text{ с}$. Окрім цього виявлено, що в процесі накопичення водню, споживання струму, що протікає через електроди електролізера, а відповідно і споживана ним потужність зменшується при будь-якій робочій напрузі. Це пояснюється зменшенням в процесі електролізу площі контакту води з електродами електролізера.

Із збільшенням робочої напруги процесу, відбувається збільшення споживання струму, що протікає через електроди електролізера (рис. 2) та, відповідно з урахуванням формул (2), споживаної потужності (рис. 3). Такий стан речей враховуючи формули (1-4) надає можливість зробити висновок про зменшення коефіцієнта корисної дії установки із збільшенням робочої напруги. Так, встановлено, що при робочій напрузі $U = 1,5\text{ В}$, сумарна витрата електричної енергії на виробництво водню складає $W_{\Sigma 2} = 224,4\text{ Дж}$; при $U = 1,7\text{ В}$, $W_{\Sigma 2} = 252,3\text{ Дж}$; при $U = 2,0\text{ В}$, $W_{\Sigma 2} = 281,2\text{ Дж}$. Тоді, енергоефективність для відповідної напруги буде складати $\eta = 90,7\%$, $\eta = 89,5\%$ та $\eta = 88,3\%$.

Рівняння регресії отриманих залежностей (рис. 2 та 3) мають вигляд:

- при $U = 1,5\text{ В}$ з обмеженнями $10 \leq t \leq 210$

$$I = -0,0017t + 0,9; P = -0,0026t + 1,35; \quad (5)$$

- при $U = 1,7\text{ В}$ з обмеженнями $10 \leq t \leq 120$

$$I = -0,0016t + 1,323; P = -0,0026t + 2,248; \quad (6)$$

- при $U = 2,0\text{ В}$ з обмеженнями $10 \leq t \leq 100$

$$I = -0,0018t + 1,507; P = -0,0037t + 3,015; \quad (7)$$

Висновки. В результаті проведених досліджень встановлено наступне:

1. Зі збільшенням робочої напруги скорочується час накопичення водню визначеного об'єму. Так, при $U = 1,5\text{ В}$, час, за який наповнюється камера для водню об'ємом $V = 20\text{ мл}$, складає $t = 210\text{ с}$; при $U = 1,7\text{ В}$, $t = 120\text{ с}$; при $U = 2,0\text{ В}$, $t = 100\text{ с}$.

2. Виявлено вплив робочої напруги на споживання струму, що протікає через електроди електролізера і споживана ним потужність,



значення яких збільшуються із збільшенням робочої напруги. Відповідно коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) в електролізерах із застосуванням електролітичної мембрани зменшується із збільшенням робочої напруги. При робочій напрузі $U = 1,5\text{В}$, енергоефективність складає $\eta = 90,7\%$; при $U = 1,7\text{В}$, $\eta = 89,5\%$ та при $U = 2,0\text{В}$, $\eta = 88,3\%$.

Список використаних джерел

1. Lewis N. S., Nocera D. G. Powering the planet: Chemical challenges in solar energy utilization. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2006. Vol. 103, pp. 15729–15735.
2. Дуников Д.О. Водородные энергетические технологии. Материали семинара лабораторії ВЭТ ОИВТ РАН: сб. науч. тр. М.: ОИВТ РАН, 2017. Вып. 1. 190 с.
3. 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>.
4. 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>.
5. Кузнецов Н.П., Лысенко О.В., Чебанов А.Б. Модель потребления электрической энергии для энергосистем Украины различного уровня локальности. *Проблемы региональной энергетики*. 2019. Вып. №3(44) С. 31-42. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3562195>.
6. Gahleitner G. Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2013. Vol. 38, pp. 2039–2061.
7. Gratzel M. Photoelectrochemical cells. *Nature*. 2001. Vol. 414, pp. 338–344.
8. Cox C. R., Lee J. Z., Nocera D. G., Buonassisi T. Ten-percent solar-to-fuel conversion with nonprecious materials. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2014. Vol. 111, pp. 14057–14061.
9. Ситнюк Г.О., Ночніченко І.В., Костюк Д.В., Мирончук В.С., Електроліз як актуальний спосіб отримання альтернативного палива водню. *Прикладна геометрія, дизайн, об'єкти інтелектуальної власності та інноваційна діяльність студентів та молодих вчених: Матер VII Всеукр. науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених*. 2018. м. Київ: С. 115-119.
10. Peharz G., Dimroth F., Wittstadt U. Solar hydrogen production by



water splitting with a conversion efficiency of 18%. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2007. Vol. 32, pp. 3248–3252.

11. Шевченко А.А., Зіпунніков М.М., Котенко А.Л., Чорна Н.А. Дослідження електролізного процесу отримання водню і кисню при послідовному і паралельному підключенні електродів. *Проблеми машинобудування*. 2020. Т. 23, № 4.

12. Добровольский Ю.А. и др. Протонно-обменные мембраны для водородно-воздушных топливных элементов. *Журнал российского химического общества имени Д.И. Менделеева*. 2006. Т1, №6. С.95-104.

13. Nocera D. G. The artificial leaf. *Acc. Chem. Res.* 2012, Vol. 45, pp. 767–776.

14 Felgenhauer M., Namacher T. State-of-the-art of commercial electrolyzers and on-site hydrogen generation for logistic vehicles in South Carolina // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. Т. 40. № 5. С. 2084-2090.

15. Кривцова В.И., Левтеров А.А. Грушко А.И. Анализ пожаровзрывобезопасности систем хранения и подачи водорода на основе реакций самораспространяющегося высокотемпературного синтеза интерметаллидов. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2006. Вип. 3. С. 145-151.

16. Васильковський О.М., Лещенко С.М., Васильковська К.В., Петренко Д.І. Підручник дослідника. Навчальний посібник для студентів агротехнічних спеціальностей. 2016. Кіровоград, 204 с.

I. Nazarenko, V. Ikonikov, A. Chebanov, S. Dubinina
Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University

STUDY OF ENERGY EFFICIENCY OF THE PROCESS IN ELECTROLYSES WITH ELECTROLYTIC MEMBRANE

Summary

One of the most promising ways to develop hydrogen energy is based on the use of hydrogen produced by electrolysis, for example. Electrolysis is characterized by the simplicity of the technological scheme, the possibility of efficient use of renewable energy sources, the availability of raw materials and the relative ease of maintenance of power plants. However, a significant disadvantage of this electrochemical method of hydrogen production is the high energy consumption of the water decomposition process. The least energy-intensive is the electrolysis method using an electrolytic membrane, for example. In such a device, the rate of hydrogen evolution and energy efficiency of the process itself will depend on the voltage supplied to the cell. The search for optimal parameters is an urgent task of this work, as such data will provide an opportunity in serial cells to establish the highest energy efficiency of the process.

Therefore, the article is devoted to the study of energy efficiency of the electrolysis process in electrolyzers with an electrolytic membrane under the influence of electrical parameters. To establish these characteristics, an experimental setup was made, the necessary measuring equipment was used, research methods were developed and the



necessary calculation of the measured values was performed. As a result, the influence of the operating voltage on the current consumption flowing through the electrodes of the cell and the power consumed by it, the values of which increase with increasing operating voltage. It is established that the energy efficiency of the process in electrolyzers using an electrolytic membrane decreases with increasing operating voltage. At operating voltages of 1,5 V, 1,7 V and 2 V, the energy efficiency is 90,7%, 89,5% and 88,3%, respectively.

Key words: Electrolysis, cell, fuel cell, hydrogen, renewable energy sources.

И. П. Назаренко, В. Л. Иконников, А. Б. Чебанов, С. В. Дубинина
Таврический государственный агротехнологический университет имени
Дмитрия Моторного

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА В ЭЛЕКТРОЛИЗЕРАХ С ЭЛЕКТРОЛИТИНОЙ МЕМБРАНОЙ

Аннотация

Статья посвящена исследованию энергоэффективности процесса электролиза в электролизерах с электролитической мембраной под влиянием электрических параметров. Для установления этих характеристик изготовлена экспериментальная установка, использовано необходимое измерительное оборудование, разработана методика проведения исследований и проведен необходимый расчет измеренных величин. В результате обнаружено влияние рабочего напряжения на потребление тока, протекающего через электроды электролизера и потребляемую им мощность, значения которых увеличиваются с увеличением рабочего напряжения. Установлено, что энергоэффективность процесса в электролизерах с использованием электролитической мембраны уменьшается с увеличением рабочего напряжения. При рабочем напряжении 1,5 В, 1,7 В и 2 В, энергоэффективность соответственно составляет 90,7%, 89,5% и 88,3%.

Ключевые слова: Электролиз, электролизер, топливный элемент, водород, возобновляемые источники энергии.