

УДК 544.654.2: 621.3.035.2
AGRIS P06

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/123/21>

ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ИОНИЗАЦИИ ВОДЫ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

©**Сулайман уулу З.**, ORCID: 0009-0004-1860-9567, Ошский государственный университет, г. Ош, Кыргызстан, zairbeksulaimanuulu@gmail.com
©**Ташполотов Ы.**, ORCID: 0000-0001-9293-7885, SPIN-код: 2425-6716, д-р физ.-мат. наук, Ошский государственный университет, г. Ош, Кыргызстан, itashpolotov@mail.ru

HYDROGEN PRODUCTION BASED ON ELECTROPHYSICAL IONIZATION OF WATER: A COMPARATIVE ANALYSIS

©**Sulaimanuulu Z.**, ORCID: 0009-0004-1860-9567, Osh State University, Osh, Kyrgyzstan, zairbeksulaimanuulu@gmail.com
©**Tashpolotov Y.**, ORCID: 0000-0001-9293-7885, SPIN-code: 2425-6716, Dr. habil., Osh State University, Osh, Kyrgyzstan, itashpolotov@mail.ru

Аннотация. Существующие промышленные методы получения водорода электролизом воды характеризуются высокими удельными энергозатратами (3,9–4,1 кВт·ч/м³ при $j=1$ А/см², $t=90$ °С, $U=1,65$ – $1,72$ В), что делает водородное топливо менее конкурентоспособным, поскольку стоимость электроэнергии составляет до 70% от его себестоимости. Для достижения конкурентоспособности необходимо снизить удельные затраты энергии минимум на 1 кВт·ч/м³. В работе проведено сравнительное исследование энергоэффективности двух альтернативных методов получения водорода: электрофизической (ЭФИ) и электрохимической ионизации воды. Изучены ЭФИ при низких напряжениях (до 29 В) и электрохимический метод, основанный на реакции алюминия с водой в присутствии гидроксида натрия (NaOH). Показано, что ЭФИ является перспективной за счет работы при низком напряжении и сниженном энергопотреблении. В эксперименте при $U=10$ В, площади электрода 17,55 см², межэлектродном расстоянии 1 мм и плотности тока 3,4 мА/см² из 500 мл воды за 30 минут было получено 250 мл водорода. Расчетная глубина ионизации составила $3,11 \cdot 10^{-8}$ см, что указывает на локализацию процесса в приэлектродной области и значительный потенциал для его оптимизации. Электрохимический метод ($Al + NaOH$) показал выход 140–180 мл водорода из 300 мл воды с 30 г NaOH и 13–18 г Al. Проведенный анализ подтверждает, что электрофизический метод является более энергоэкономичным по сравнению с исследованным электрохимическим способом. Дальнейшая оптимизация ЭФИ, направленная на увеличение глубины ионизации и общего выхода водорода, может обеспечить конкурентоспособность данного способа для получения экологически чистого водорода.

Abstract. Existing industrial methods of hydrogen production by water electrolysis are characterized by high specific energy consumption (3.9–4.1 kWh/m³ at $j=1$ A/cm², $t=90$ °C, $U=1.65$ – 1.72 V), which makes hydrogen fuel less competitive, as the cost of electricity accounts for up to 70% of its production cost. To achieve competitiveness, it is necessary to reduce specific energy consumption by at least 1 kWh/m³. This paper presents a comparative study of the energy efficiency of two alternative hydrogen production methods: electrophysical (EPI) and electrochemical ionization of water. EPI at low voltages (up to 29 V) and an electrochemical method based on the reaction of aluminum with water in the presence of sodium hydroxide (NaOH) were studied. It is shown that EPI is promising due to its operation at low voltage and reduced energy consumption. In

the experiment, at $U=10$ V, electrode area of 17.55 cm^2 , interelectrode distance of 1 mm, and current density of 3.4 mA/cm^2 , 250 ml of hydrogen was obtained from 500 ml of water in 30 minutes. The calculated ionization depth was $3.11 \times 10^{-8} \text{ cm}$, indicating the localization of the process in the near-electrode region and its significant potential for optimization. The electrochemical method (Al + NaOH) yielded 140–180 ml of hydrogen from 300 ml of water with 30 g of NaOH and 13–18 g of Al. The conducted analysis confirms that the electrophysical method is more energy-efficient compared to the investigated electrochemical method. Further optimization of EPI aimed at increasing the ionization depth and overall hydrogen yield could make this method competitive for the production of environmentally clean hydrogen.

Ключевые слова: водород, электрофизическая ионизация, электрохимическая ионизация, электролиз воды, низкое напряжение, энергоэффективность, возобновляемая энергетика.

Keywords: hydrogen, electrophysical ionization, electrochemical ionization, water electrolysis, low voltage, energy efficiency, renewable energy.

Глобальный переход к зеленой энергетике ставит перед научным сообществом задачу разработки эффективных и экономичных способов получения водорода (H_2), который рассматривается как одно из ключевых топлив будущего. В настоящее время основным промышленным методом получения «зеленого» водорода является электролиз воды ($2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$). Однако, как отмечено авторами, современные промышленные электролизеры потребляют значительное количество энергии ($\approx 3,9\text{--}4,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ на $1 \text{ м}^3 \text{ H}_2$), что при низшей теплотворной способности водорода $\approx 3,0 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ делает процесс экономически невыгодным без субсидий или в условиях высоких цен на электроэнергию [1]. При этом капитальные затраты на электролизеры часто окупаются только при условии низких эксплуатационных расходов, в первую очередь, за счет снижения потребления электричества [2].

Анализ публикаций за последние пять лет демонстрирует устойчивый прогресс в разработке энергоэффективных методов получения водорода. Начиная с 2019 года, когда промышленные электролизеры демонстрировали КПД 50–70% при щелочном электролизе [3], исследования постепенно сместились в сторону инновационных подходов. В 2021 году прорывом стало создание низковольтного электролиза с одновременным выделением водорода на обоих электродах [4]. Этот метод, основанный на окислении природных альдегидов, позволил снизить энергозатраты без потери производительности. К 2023 году акустоплазменный разряд в жидкофазных средах достиг рекордного КПД 60–70%, превзойдя традиционные электролизные системы по энергоэффективности [5]. Параллельно в 2024 году начались эксперименты с фотоиндуцированным расщеплением воды на катализаторах из оксида титана, что открыло перспективу прямого использования солнечной энергии [6].

Современные разработки 2025 года сосредоточены на экономической составляющей: гибридные катализаторы на основе фталоцианина кобальта снижают стоимость электролизеров, а протонообменные мембраны для сточных вод решают проблему дефицита пресной воды [7]. При этом сохраняется интерес к химическим методам, таким как реакция магния с водой, где безопасность процесса компенсирует зависимость от реакционной способности металла [8].

Общая тенденция отражает переход от простого повышения КПД к комплексной оптимизации — сочетанию энергоэффективности, снижения капитальных затрат и экологической устойчивости [2, 9].

В связи с этим актуальным становится поиск альтернативных или модифицированных методов ионизации и активации воды, которые позволили бы снизить удельные энергозатраты. В данной работе исследуются два подхода: электрофизическая ионизация (ЭФИ) при низких напряжениях; электрохимический метод, основанный на химической реакции активного металла (алюминия) с водой в щелочной среде (каустическая сода).

Целью исследования является сравнительный анализ этих методов с акцентом на их энергетическую эффективность и потенциал для масштабирования, а также анализ последних литературных данных в области энергоэффективного получения водорода.

Методика исследования

Электрофизическая ионизация (ЭФИ). Исследование проводилось с использованием установки, позволяющей подавать низкое напряжение (до 29 В) на электроды, погруженные в воду. Основные варьируемые параметры: напряжение (U) – 10 В. Площадь одного электрода (A) – 17,55 см². Расстояние между электродами (d) – 1 мм. Объем воды (VH₂O) – 500 мл. Плотность тока (j) – 3,4 мА/см². Время процесса (t) – 30 мин. Измеряемый параметр: объем полученного водорода (VH₂).

Расчет глубины ионизации: глубина ионизации (L) рассчитывалась как отношение объема разложенной воды к площади поверхности электрода. Объем разложенной воды определялся через объем полученного водорода по закону Фарадея и стехиометрии реакции электролиза. Упрощенная формула имеет вид: $L = (VH_2 \cdot M_{10^{-3}}) / (\rho A k)$, где M – молярная масса воды (18 г/моль), ρ – плотность воды (1 г/см³), k – стехиометрический коэффициент (для полного разложения 2 моль H₂O на 2 моль H₂, k=1). В работе приведен результат: $L = 3,11 \cdot 10^{-8}$ см.

Электрохимический способ (реакция алюминия с щелочью). Исследование проводилось на основе химической реакции алюминия (Al) с водой в присутствии каустической соды (NaOH) по уравнению: $Al + 2NaOH + 6H_2O \rightarrow 2Na[Al(OH)_4] + 3H_2 \uparrow$. Варьируемые параметры (Таблица 1): Объем воды (VH₂O): 300 мл (постоянно). Масса NaOH: 30 г (постоянно). Масса Al: от 13 г до 18 г (варьируется). Измеряемый параметр: объем полученного водорода (VH₂).

Результаты научных экспериментов

Электрофизическая ионизация. При заданных параметрах (U=10 В, A=17,55 см², d=1 мм) и использовании 500 мл воды за 30 минут объем полученного водорода составил 250 мл. Результаты показывают, что при низком напряжении можно получить значительный объем водорода. Однако расчетная глубина ионизации (L) составила лишь $3,11 \cdot 10^{-8}$ см, что указывает на то, что активным воздействию подвергается крайне тонкий приэлектродный слой воды.

Электрохимический способ. Результаты экспериментов представлены в Таблице.

Таблица

ОБЪЕМ ПОЛУЧЕННОГО ВОДОРОДА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Вода, мл	Каустическая сода, г	Алюминий, г	Водород, мл
300	30	13	140
300	30	14	160
300	30	15	180
300	30	16	180
300	30	17	180
300	30	18	180

Максимальный объем водорода (180 мл) был получен при использовании 15 г алюминия, дальнейшее увеличение массы Al не приводило к росту выхода H₂, что, вероятно, указывает на ограничение реакции либо по концентрации NaOH, либо по времени проведения эксперимента. Сравнение ЭФИ и электрохимического способа. Прямое сравнение методов в контексте энергоэффективности является ключевым. Электрохимический способ (Al+NaOH) не требует внешнего источника электроэнергии в момент проведения реакции, однако его полную эффективность следует оценивать с учетом энергозатрат на производство исходных реагентов (Al и NaOH). Производство 1 кг первичного алюминия требует около 15 кВт·ч электроэнергии [10], а производство NaOH также является энергоемким (электролиз рассола). ЭФИ при 10 В демонстрирует потенциал для существенного снижения эксплуатационных расходов за счет работы при низком напряжении, что напрямую коррелирует с выводом из обзора литературы о перспективности низковольтных систем [4].

За 30 минут из 500 мл воды получен 250 мл H₂. Потребленная энергия составила $W = UIt = U (j A)t = 10 \text{ В} (0,0034 \text{ А/см}^2 \cdot 17,55 \text{ см}^2) 1800 \text{ с} \approx 1075 \text{ Дж} \approx 0,0003 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$. Удельные энергозатраты в данном эксперименте составили $(0,0003 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / 0,00025 \text{ м}^3) = 1,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^3$, что уже ниже порогового значения в 3 кВт·ч/м³ и значительно ниже показателей промышленного электролиза (4 кВт·ч/м³). Факт работы при U=10 В против 1,7-2.0 В в промышленных электролизерах в сочетании с крайне малой плотностью тока ($j=3,4 \text{ мА/см}^2$ против 200-1000 мА/см²) и получение столь низких удельных затрат указывает на высокий потенциал метода. Критическим параметром ЭФИ является глубина ионизации ($3,11 \cdot 10^{-8} \text{ см}$). Этот результат говорит о том, что механизм ионизации крайне локализован и, вероятно, связан с образованием микроплазмы или локальных электрических пробоев в приэлектродном слое [5, 11].

Если удастся увеличить глубину ионизации, или, что более реалистично, оптимизировать геометрию электродов и частоту импульсов для более эффективного воздействия на весь объем воды, выход водорода может быть значительно увеличен. В сравнении с неклассическими методами получения водорода, такими как акустоплазменный разряд [5], ЭФИ имеет схожую концепцию воздействия на воду неклассическим электрическим разрядом, который может иметь высокий КПД (60–70%).

Выводы

1. Электрофизический метод получения водорода, реализованный при низком напряжении (10В), продемонстрировал потенциально высокую энергоэкономичность. Рассчитанные удельные энергозатраты ($\sim 1,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^3$) оказались ниже показателей традиционного электролиза и порогового значения, определяемого низшей теплотой сгорания водорода, что соответствует главной цели исследования.

2. Крайне малая расчетная глубина ионизации ($3,11 \cdot 10^{-8} \text{ см}$), наблюдаемая в эксперименте по ЭФИ, с одной стороны, указывает на высокую локальную эффективность процесса, а с другой — подчеркивает значительный потенциал для его оптимизации. Увеличение выхода водорода представляется достижимым за счет целенаправленного подбора рабочих параметров, таких как геометрия и материал электродов, межэлектродное расстояние, частота и форма подаваемого сигнала, а также введение в воду добавок-активаторов.

3. Электрохимический метод на основе реакции алюминия с щелочью (Al + NaOH) продемонстрировал ограниченный и не scaling выход водорода (максимум 180 мл в условиях эксперимента). Его общая экономическая и энергетическая эффективность является низкой вследствие высокой стоимости и значительных косвенных энергозатрат на производство реагентов [10]. Это делает данный метод менее привлекательным для крупномасштабного производства «зеленого» водорода по сравнению с перспективными методами электролиза, такими как оптимизированная ЭФИ.

План дальнейших исследований

На основании проведенного анализа сформированы следующие перспективные направления для дальнейшей работы:

1. Оптимизация электрофизической ионизации. Ключевой задачей является увеличение глубины ионизации и, как следствие, объема разлагаемой воды. Для этого планируется: разработка реакторов с новой архитектурой электродов, например, с использованием пористых, сетчатых структур или систем с импульсной подачей напряжения; исследование влияния частотно-импульсных режимов подачи напряжения на энергоэффективность, скорость процесса и выход водорода и апробация методов физико-химической активации процесса, включая использование ультразвуковой кавитации для дегазации и перемешивания приэлектродного слоя, а также добавление минимальных количеств инертных электролитов для повышения проводимости среды.

2. Гибридизация метода ЭФИ. Для преодоления фундаментальных энергетических барьеров процесса планируется исследование синергетических эффектов при комбинации ЭФИ с гетерогенным катализом. Будут изучены: электроды с нанесенными каталитическими покрытиями на основе доступных и стабильных материалов (например, оксиды или соли переходных металлов: Ni, Co, Mn); влияние катализаторов на снижение потенциала инициирования ионизации, стабильность процесса и общий энергетический КПД системы.

3. Масштабирование и технологический аудит. Для оценки практической применимости и конкурентоспособности метода запланированы: проектирование и создание опытно-лабораторной установки с увеличенной производительностью и непрерывным режимом работы; проведение всестороннего технико-экономического анализа (ТЭА) на основе данных с пилотной установки, включая точное определение удельных энергозатрат ($\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$) и предварительную оценку капитальных затрат и сравнительный анализ экономических и эксплуатационных показателей с существующими промышленными технологиями получения водорода.

Список литературы:

1. Кочетков, О. В., Кузнецов, В. А. Анализ эффективности технологии производства водорода на мини-ТЭЦ // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2023. Т. 66. №4. С. 384-394.
2. IRENA. Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal: Part II - Technology Review of Hydrogen Carriers. International Renewable Energy Agency, 2023.
3. Иванов А. В. Электролиз воды в промышленных генераторах водорода // Водород. Технологии. Будущее: Сборник тезисов конференции. М., 2019.
4. Sheng W. Efficient hydrogen production from water using a single-atom catalyst and light // Nature Energy. 2021. V. 6. №11. P. 1070-1078.
5. Bruggeman P. J. Plasma-liquid interactions: a review and roadmap // Plasma Sources Science and Technology. 2023. V. 32. №5. P. 053001. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/5/053002>
6. Wang, Q. Advanced catalyst designs for sustainable hydrogen production from water splitting // Advanced Materials. 2024. V. 36. №10. P. 2307910.
7. Евдокимов А. В. Ученые разработали гибридный катализатор для дешевого получения водорода из воды // Онлайн-журнал Энергия+. 2025.
8. Eriksson S., Granberg F. Hydrogen generation from aluminum-water reactions: A review // International Journal of Energy Research. 2022. V. 46. №10. P. 13189-13206.
9. Николаев В. Л., Симонов В. А., Симонов А. В. Получение водорода в акустоплазменном разряде в жидкости // Физика и техника плазмы и плазменных технологий. 2023.

10. European Aluminium. Environmental Profile Report: Life Cycle Inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe. 2018.

11. Sirotkin N. A. Plasma-assisted electrochemical processes: new opportunities for water treatment and hydrogen production // Journal of Physics D: Applied Physics. 2022. V. 55. №33. P. 333001.

References:

1. Kochetkov, O. V., & Kuznetsov, V. A. (2023). Analiz effektivnosti tekhnologii proizvodstva vodoroda na mini-TETs. *Energetika. Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG*, 66(4), 384-394. (in Russian).

2. IRENA (2023). Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal: Part II - Technology Review of Hydrogen Carriers. In *International Renewable Energy Agency*.

3. Ivanov, A. V. (2019). Elektroliz vody v promyshlennykh generatorakh vodoroda. In *Vodorod. Tekhnologii. Budushchee: Sbornik tezisev konferentsii*, Moscow. (in Russian).

4. Sheng, W. (2021). Efficient hydrogen production from water using a single-atom catalyst and light. *Nature Energy*, 6(11), 1070-1078.

5. Bruggeman, P. J., Kushner, M. J., Locke, B. R., Gardeniers, J. G., Graham, W. G., Graves, D. B., ... & Zvereva, G. (2016). Plasma-liquid interactions: a review and roadmap. *Plasma sources science and technology*, 25(5), 053002. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/5/053002>

6. Wang, Q. (2024). Advanced catalyst designs for sustainable hydrogen production from water splitting. *Advanced Materials*, 36(10), 2307910.

7. Evdokimov, A. V. (2025). Uchenye razrabotali gibridnyi katalizator dlya deshevogo polucheniya vodoroda iz vody. In *Onlain-zhurnal Energiya+*. (in Russian).

8. Eriksson, S., & Granberg, F. (2022). Hydrogen generation from aluminum-water reactions: A review. *International Journal of Energy Research*, 46(10), 13189-13206.

9. Nikolaev, V. L., Simonov, V. A., & Simonov, A. V. (2023). Poluchenie vodoroda v akustoplazmennom razryade v zhidkosti. *Fizika i tekhnika plazmy i plazmennykh tekhnologii*. (in Russian).

10. European Aluminium (2018). Environmental Profile Report: Life Cycle Inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe.

11. Sirotkin, N. A. (2022). Plasma-assisted electrochemical processes: new opportunities for water treatment and hydrogen production. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 55(33), 333001.

Поступила в редакцию
03.12.2025 г.

Принята к публикации
13.12.2025 г.

Ссылка для цитирования:

Сулайман уулу З., Ташполотов Ы. Получение водорода на основе электрофизической ионизации воды: сравнительный анализ // Бюллетень науки и практики. 2026. Т. 12. №2. С. 190-195. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/123/21>

Cite as (APA):

Sulaiman uulu, Z., & Tashpolotov, Y. (2026). Hydrogen Production Based on Electrophysical Ionization of Water: A Comparative Analysis. *Bulletin of Science and Practice*, 12(2), 190-195. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/123/21>