

УДК 620.9:621.311

МРНТИ 44.31.35

DOI 10.56525/ECRS5297

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВА ЗЕЛЕННОГО ВОДОРОДА

Қойшығара А., Баимбетов Д.

Университет Есенова, г. Актау, Қазақстан

e-mail: koishygara.altynbek@yu.edu.kz, e-mail: d2.baimbetov@yu.edu.kz

Аннотация. В статье представлен сравнительный анализ современных технологий производства зеленого водорода на основе электролиза воды, включая щелочные (AEL), протонно-обменные (PEM), твердооксидные (SOEC) и анионообменные (AEM) электролизеры. Актуальность исследования обусловлена необходимостью перехода к низкоуглеродной энергетике и поиском эффективных решений для декарбонизации промышленности и энергетического сектора.

В работе рассмотрены основные технические характеристики электролизеров, такие как эффективность, рабочая температура, плотность тока, срок службы и уровень технологической зрелости. Особое внимание уделено технико-экономической оценке систем производства водорода с использованием показателя приведенной стоимости водорода (LCOH).

Проведённый анализ показал, что различные технологии электролиза обладают существенными различиями по стоимости и эксплуатационным характеристикам. Установлено, что твердооксидные электролизеры обеспечивают наибольшую эффективность, однако ограничены проблемами надежности. PEM-электролизеры демонстрируют высокую гибкость и наиболее подходят для интеграции с возобновляемыми источниками энергии. Щелочные электролизеры остаются наиболее зрелой и экономически доступной технологией, тогда как AEM рассматриваются как перспективное направление развития.

Также выявлено, что ключевым фактором, влияющим на стоимость водорода, является стоимость электроэнергии, формирующая основную долю LCOH. Результаты исследования могут быть использованы при выборе оптимальных технологий для производства зеленого водорода и разработке энергетических стратегий.

Ключевые слова: зеленый водород, электролиз воды, AEL, PEM, SOEC, AEM, LCOH, технико-экономический анализ, возобновляемые источники энергии.

Введение.

В условиях глобального энергетического перехода и ужесточения требований по снижению выбросов парниковых газов особую значимость приобретает развитие низкоуглеродных технологий. Одним из наиболее перспективных направлений является использование водорода в качестве универсального энергоносителя, способного обеспечить декарбонизацию таких отраслей, как энергетика, транспорт и промышленность [1,2].

Зеленый водород производится путем электролиза воды с использованием электроэнергии из возобновляемых источников (солнечной и ветровой энергии), что позволяет практически полностью исключить выбросы CO₂ в процессе его получения [1]. В последние годы наблюдается значительный рост интереса к данному направлению, обусловленный как развитием технологий электролиза, так и снижением стоимости возобновляемой электроэнергии [3].

Среди основных технологий электролиза выделяются щелочные электролизеры (AEL), электролизеры с протонно-обменной мембраной (PEM), твердооксидные электролизеры (SOEC) и анионообменные электролизеры (AEM). Щелочные электролизеры являются наиболее зрелой технологией и характеризуются высокой надежностью и длительным сроком

службы, однако обладают ограниченной динамической гибкостью [2]. В свою очередь, PEM-электролизеры обеспечивают высокую плотность тока и быструю реакцию на изменения нагрузки, что делает их предпочтительными для интеграции с возобновляемыми источниками энергии, несмотря на более высокую стоимость из-за использования благородных металлов [4].

Твердооксидные электролизеры (SOEC) работают при высоких температурах (600–1000 °C) и обладают потенциально более высокой энергетической эффективностью за счет использования тепловой энергии, однако их широкое внедрение ограничено проблемами долговечности и деградации материалов [5]. Анионообменные электролизеры (AEM) представляют собой относительно новую технологию, сочетающую преимущества щелочных и PEM-систем, включая использование недорогих катализаторов и более низкие капитальные затраты, однако уровень их технологической зрелости пока остается ниже [6,7].

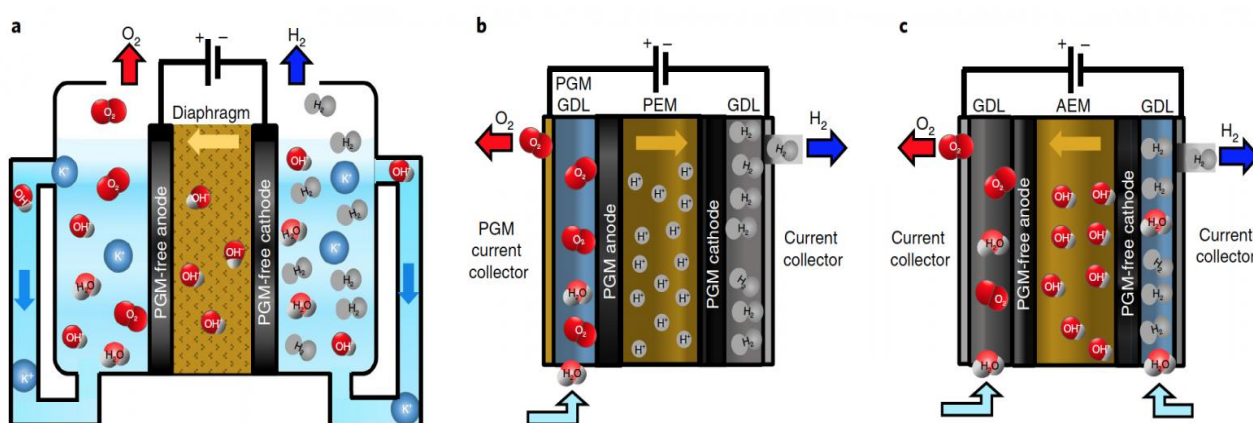


Рисунок 1 Схема низкотемпературного электролиза воды

Ключевым показателем эффективности систем производства водорода является приведенная стоимость водорода (Levelized Cost of Hydrogen, LCOH), которая определяется совокупностью капитальных затрат (CAPEX), эксплуатационных расходов (OPEX), стоимости электроэнергии и коэффициента использования установленной мощности [8,3]. Согласно современным исследованиям, стоимость производства зеленого водорода может варьироваться в широком диапазоне — от менее 3 до более 15 \$/кг в зависимости от используемой технологии, масштабов системы и стоимости электроэнергии [9,10].

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных отдельным технологиям электролиза, в существующих работах отсутствует комплексное сравнение технологий с учетом современных диапазонов стоимости электроэнергии и режимов работы возобновляемых источников энергии.

Целью данного исследования является количественная сравнительная оценка влияния технологических и экономических параметров на приведенную стоимость водорода (LCOH) для различных типов электролизеров. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- анализ основных технологий электролиза;
- сравнение их технических и эксплуатационных характеристик;
- оценка факторов, влияющих на LCOH;
- определение наиболее эффективных решений для производства зеленого водорода.

2. Методология (Methods)

Настоящее исследование основано на комплексном сравнительном и технико-экономическом анализе технологий производства зеленого водорода с использованием электролиза воды. Методологический подход включает анализ технических характеристик

электролизеров, а также оценку экономической эффективности на основе показателя приведенной стоимости водорода (LCOH).

2.1. Анализ технологий электролиза

В рамках исследования рассматриваются четыре основные технологии электролиза воды:

- щелочной электролиз (AEL),
- электролиз с протонно-обменной мембраной (PEM),
- твердооксидный электролиз (SOEC),
- анионообменный электролиз (AEM).

Сравнение проводится по следующим ключевым параметрам:

- энергетическая эффективность,
- рабочая температура,
- плотность тока,
- срок службы,
- капитальные затраты (CAPEX),
- уровень технологической зрелости.

Данные параметры были систематизированы на основе современных научных обзоров и технико-экономических исследований [2,7,10]. Особое внимание уделяется различиям в эксплуатационных характеристиках: например, высокая динамическая гибкость PEM-систем делает их предпочтительными для интеграции с возобновляемыми источниками энергии, в то время как SOEC-технологии обеспечивают более высокий КПД за счет работы при повышенных температурах [4,5].

2.2. Методика расчета приведенной стоимости водорода (LCOH)

Для оценки экономической эффективности различных технологий используется показатель приведенной стоимости водорода (Levelized Cost of Hydrogen, LCOH), широко применяемый в современных исследованиях [8,3].

В работе используется упрощенная расчетная модель:

$$LCOH = \frac{(CAPEX * CRF + OPEX)}{H_2}$$

где, CAPEX — капитальные затраты на установку электролизера,

OPEX — эксплуатационные расходы,

CRF — коэффициент восстановления капитала,

H_2 — годовой объем производства водорода.

Коэффициент восстановления капитала (CRF) определяется через ставку дисконтирования и срок службы оборудования, что позволяет учитывать временную стоимость денег [3].

$$CRF = \frac{r(1 + r)^n}{(1 + r)^n - 1}$$

В расчетах приняты следующие параметры:

ставка дисконтирования $r = 8\%$;

срок службы системы $n = 20$ лет;

стоимость электроэнергии: $0.03\text{--}0.08$ \$/кВт·ч.

Данные параметры соответствуют современным технико-экономическим исследованиям и используются для сопоставимости результатов. [1,3].

2.3. Исходные параметры моделирования

Для проведения технико-экономической оценки использованы типовые диапазоны параметров, представленные в научной литературе:

- стоимость электроэнергии: $0.03\text{--}0.08$ \$/кВт·ч;
- срок службы электролизеров: 40 000 – 80 000 часов;
- эффективность: 60–85% в зависимости от технологии;

- коэффициент использования мощности: 30–60% (для ВИЭ);

Эти значения соответствуют современным условиям эксплуатации систем зеленого водорода и широко используются в моделировании [9,3,10].

2.4. Подход к сравнительному анализу

Сравнительный анализ технологий проводится на основе:

1. Технических показателей (эффективность, температура, плотность тока)
2. Экономических параметров (CAPEX, OPEX, LCOH)
3. Эксплуатационных характеристик (гибкость, срок службы, зрелость технологии)

Для оценки влияния технологии на стоимость водорода используются данные из опубликованных технико-экономических моделей, включая сценарии с использованием солнечной и ветровой энергии [9,3].

2.5. Ограничения исследования

Следует отметить, что результаты анализа основаны на обобщенных данных из литературных источников и не учитывают:

- региональные особенности стоимости электроэнергии,
- логистику и хранение водорода,
- налоговые и регуляторные факторы.

Тем не менее, применяемый подход позволяет получить достоверную сравнительную оценку эффективности различных технологий электролиза и их влияния на стоимость производства зеленого водорода.

2.6. Расчетный сценарий



График 1. Расчетный сценарий влияния стоимости электроэнергии на LCOH

Для оценки влияния стоимости электроэнергии на LCOH был рассмотрен расчетный сценарий для PEM-электролизера.

При увеличении стоимости электроэнергии с 0,03 до 0,08 \$/кВт·ч наблюдается рост LCOH более чем на 40%, что подтверждает доминирующее влияние данного параметра на экономику производства водорода.

3. Результаты (Results)

3.1. Сравнение технологий электролиза

На основе анализа современных исследований [29,43,72,10] было проведено сравнение основных технологий электролиза воды: AEL, PEM, SOEC и AEM. Результаты систематизированы в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение основных технологий электролиза воды

Параметр	AEL (щелочной)	PEM	SOEC	AEM
Технологическая зрелость	Высокая	Высокая	Средняя	Низкая
Температура, °C	40–90	20–100	600–1000	40–70
Эффективность, %	60–70	65–75	75–85	60–75
Плотность тока, А/см ²	0.2–0.5	0.6–2.5	0.3–2.0	0.5–1.5
CAPEX, \$/кВт	500–1000	1000–1800	1500–3000	700–1400
Срок службы, ч	60 000–80 000	40 000–60 000	20 000–40 000	<40 000
Гибкость (ВИЭ)	Низкая	Высокая	Средняя	Высокая

3.2. Анализ технических характеристик

Результаты показывают, что щелочные электролизеры (AEL) остаются наиболее зрелой и экономически доступной технологией, однако уступают по динамической гибкости, что ограничивает их применение в системах с переменной генерацией энергии [2].

PEM-электролизеры демонстрируют высокую плотность тока и быструю реакцию на изменения нагрузки, что делает их наиболее подходящими для интеграции с солнечными и ветровыми электростанциями. Однако их недостатком являются более высокие капитальные затраты, обусловленные использованием благородных металлов [4].

SOEC-технология характеризуется наивысшей эффективностью благодаря использованию высокотемпературного режима, что позволяет снижать потребление электроэнергии. Тем не менее, ограничивающим фактором остается деградация материалов и высокая стоимость [5].

AEM-электролизеры представляют собой перспективное направление, сочетающее преимущества AEL и PEM, включая более низкую стоимость катализаторов и высокую гибкость, однако технология находится на стадии развития и требует дальнейших исследований [6,7].

3.3. Сравнение стоимости производства водорода (LCOH)

На основе анализа литературных данных [9,3,10] были обобщены диапазоны приведенной стоимости водорода (LCOH) для различных технологий.

Таблица 2 – Диапазон LCOH для различных технологий

Технология	LCOH, \$/кг
AEL	10 – 15
PEM	9 – 14
SOEC	7 – 10
AEM	8 – 12

3.4. Анализ результатов LCOH

Полученные результаты показывают, что:

- SOEC демонстрирует наименьшую стоимость водорода ($\approx 7\text{--}10$ \$/кг) за счет высокой эффективности, однако требует высоких температур и имеет ограничения по надежности [5,10];
- PEM обеспечивает конкурентоспособную стоимость ($\approx 9\text{--}14$ \$/кг) при высокой гибкости, что делает его оптимальным для ВИЭ-систем [9];
- AEL характеризуется более стабильной, но в среднем более высокой стоимостью ($\approx 10\text{--}15$ \$/кг), особенно при низком коэффициенте использования мощности [3];
- AEM занимает промежуточное положение и имеет высокий потенциал снижения стоимости при дальнейшем развитии технологии [6].

Более низкие значения LCON для SOEC объясняются высокой эффективностью, что снижает удельное потребление электроэнергии. В свою очередь, более высокая стоимость AEL связана с меньшей эффективностью и большим потреблением энергии на единицу произведенного водорода.

3.5. Влияние параметров на стоимость водорода

Анализ показал, что наибольшее влияние на LCON оказывают:

- стоимость электроэнергии (до 70% от общей стоимости) [1,3];
- коэффициент использования мощности;
- капитальные затраты электролизера;
- эффективность системы.

При снижении стоимости электроэнергии до уровня 0.03 \$/кВт·ч возможно уменьшение LCON более чем на 30–40%, что делает проекты зеленого водорода экономически более привлекательными [3].

Вывод:

- лучшая эффективность → SOEC
- лучшая гибкость → PEM
- самая зрелая технология → AEL
- самый перспективный баланс → AEM

4. Обсуждение (Discussion)

Полученные результаты демонстрируют существенные различия между технологиями электролиза как по техническим, так и по экономическим параметрам. Это подтверждает необходимость комплексного подхода при выборе технологии производства зеленого водорода в зависимости от условий эксплуатации и целей проекта.

Одним из ключевых факторов является компромисс между стоимостью, эффективностью и гибкостью. Так, твердооксидные электролизеры (SOEC) показывают наивысшую эффективность и минимальные значения LCON ($\approx 7\text{--}10$ \$/кг), что связано с использованием высокотемпературного режима и снижением потребления электрической энергии [5,10]. Однако высокая температура эксплуатации (до 1000 °C) приводит к ускоренной деградации материалов и снижению срока службы, что ограничивает их широкое внедрение в ближайшей перспективе [5].

В противоположность этому, щелочные электролизеры (AEL) остаются наиболее надежной и технологически зрелой системой. Их сравнительно низкая стоимость делает их привлекательными для масштабных проектов, однако низкая динамическая гибкость ограничивает их применение в условиях переменной генерации энергии, характерной для возобновляемых источников [2]. Это особенно важно при интеграции с солнечными и ветровыми электростанциями, где требуется высокая адаптивность к изменению нагрузки.

PEM-электролизеры занимают промежуточное положение, сочетая высокую гибкость и относительно конкурентоспособную стоимость ($\approx 9\text{--}14$ \$/кг). Их способность быстро реагировать на изменения мощности делает их наиболее подходящими для работы в связке с ВИЭ [9]. Тем не менее, высокая стоимость катализаторов на основе благородных металлов (платина, иридий) остается основным фактором, ограничивающим снижение CAPEX [4].

Анионообменные электролизеры (AEM) представляют собой перспективное направление развития, поскольку потенциально позволяют снизить стоимость системы за счет использования недорогих материалов при сохранении высокой гибкости [6,7]. Однако на текущий момент данная технология находится на стадии активных исследований и характеризуется ограниченным сроком службы и недостаточной промышленной зрелостью.

Следует отметить, что данные различных исследований могут существенно различаться в зависимости от исходных допущений, таких как стоимость электроэнергии, коэффициент загрузки и стоимость оборудования. Это создает неопределенность в оценке LCON и требует осторожности при сравнении результатов различных авторов.

Особое внимание в рамках исследования уделено влиянию экономических параметров на стоимость водорода. Анализ показывает, что стоимость электроэнергии является

доминирующим фактором, формируя до 60–70% LCOH [1,3]. Это означает, что даже при использовании менее эффективных технологий, но при наличии дешевой электроэнергии (например, от ВИЭ), возможно достижение конкурентоспособной стоимости водорода.

С точки зрения применения в условиях Казахстана, результаты исследования имеют особую значимость. Высокий потенциал ветровой энергии в западных регионах и солнечной энергии в южных областях создает благоприятные условия для производства зеленого водорода. В таких условиях наибольший интерес представляют PEM-электролизеры, как наиболее адаптивные к переменной генерации, а также AEL-системы для крупных стационарных проектов с более стабильной нагрузкой.

Кроме того, в долгосрочной перспективе возможно внедрение SOEC-технологий в сочетании с промышленными источниками тепла, что позволит дополнительно повысить эффективность систем. Одновременно развитие AEM-технологий может привести к значительному снижению стоимости водорода и расширению их применения.

Таким образом, выбор оптимальной технологии электролиза должен основываться на совокупности факторов, включая стоимость электроэнергии, режим работы, масштаб проекта и требования к гибкости системы. Результаты исследования подтверждают, что на современном этапе не существует универсального решения, и каждая технология имеет свою область наиболее эффективного применения.

5. Заключение (Conclusion)

В рамках данного исследования был проведён сравнительный анализ технологий производства зеленого водорода на основе электролиза воды, включая щелочные (AEL), протонно-обменные (PEM), твердооксидные (SOEC) и анионообменные (AEM) электролизеры.

Результаты показали, что каждая из рассматриваемых технологий обладает своими преимуществами и ограничениями. Щелочные электролизеры характеризуются высокой технологической зрелостью, надежностью и сравнительно низкими капитальными затратами, однако уступают по гибкости и эффективности. PEM-электролизеры демонстрируют высокую динамическую адаптивность и подходят для интеграции с возобновляемыми источниками энергии, но имеют более высокую стоимость из-за использования благородных металлов.

Твердооксидные электролизеры обеспечивают наивысшую эффективность и минимальные значения приведенной стоимости водорода (LCOH), однако ограничены проблемами долговечности и высокой рабочей температурой. Анионообменные электролизеры представляют собой перспективное направление, способное объединить преимущества существующих технологий, но требуют дальнейшего технологического развития.

Анализ показал, что ключевым фактором, влияющим на стоимость производства водорода, является стоимость электроэнергии, формирующая до 60–70% LCOH. Также существенное влияние оказывают капитальные затраты, коэффициент использования мощности и эффективность системы.

С точки зрения практического применения, наиболее эффективный выбор технологии зависит от условий эксплуатации. Для систем с переменной генерацией (солнечная и ветровая энергия) предпочтительными являются PEM-электролизеры, тогда как для крупных стационарных установок могут быть использованы AEL-системы. В долгосрочной перспективе значительный потенциал имеют SOEC и AEM технологии.

Установлено, что снижение стоимости электроэнергии до уровня 0.03 \$/кВт·ч позволяет уменьшить LCOH на 30–40%, что является ключевым фактором повышения экономической эффективности.

Впервые в рамках данной работы проведена сравнительная оценка технологий электролиза с учетом современных диапазонов параметров, актуальных для условий Казахстана, что позволяет рекомендовать PEM-технологии для ВИЭ-систем, а AEL — для стационарных установок.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bouchra Oussmou, Samya Sigure, Souad Abderafi. *Обзор технологий производства зелёного водорода для выбора оптимального процесса электролиза на основе возобновляемых источников энергии.* 2026 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116205>
2. Rafika Louli, Stefan Giurgea, Issam Salhi, Salah Laghrouche, Abdesslem Djerdir. *Критический обзор производства зелёного водорода методом электролиза: от технологий и моделирования до характеристик и стоимости.* 2026 <https://doi.org/10.3390/en19010059>
3. Rawan A. Abdelsalam, Moataz Mohamed, Hany E.Z. Farag, Ehab F. El-Saadany. *Установки по производству зелёного водорода: технико-экономический обзор.* 2024 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118907>
4. Henrique F. Araújo, Julián A. Gómez, Diogo M. F. Santos. *Электролиз с протонно-обменной мембраной для производства зелёного водорода: основы, структура затрат и стратегии снижения содержания платиновых металлов в электрокатализаторах реакции выделения водорода.* 2024 <https://doi.org/10.3390/catal14120845>
5. Hua Liu, Miao Yu, Xiaofeng Tong, Qingjie Wang, Ming Chen. *Высокотемпературный твердооксидный электролиз для производства зелёного водорода.* 2024 <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00795>
6. Minsu Kim, Donggyun Lee, Meng Qi, Junghwan Kim. *Технико-экономический анализ процесса электролиза с анионообменной мембраной для производства зелёного водорода в условиях неопределённости.* 2024 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118134>
7. Ailitabaier Abudureyimu, Ayiguzhali Tuluhong, Qingpu Chang, Feng Wang, Bao Luo. *Комплексный обзор технологий зелёного водорода: методы электролиза, топологии и стратегии управления, области применения.* 2025 <https://doi.org/10.3390/ma18214826>
8. Efenwengbe Nicholas Aminaho, Ndukaegho Sabastine Aminaho, Faith Aminaho. *Технико-экономическая оценка электролизёров для производства водорода.* 2025 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126515>
9. Abba L. B., Ahmed S. Menesy, Kotb M. Kotb, Surachai Chaitusaney, Mohammad A. Abido, Mahmoud Kassas, Usman Habu Taura, Mukhtar Fatihu Hamza. *Моделирование, проектирование и технико-экономическое сравнение технологий электролиза для водородной заправочной инфраструктуры, интегрированной с солнечно-ветровой энергосистемой.* 2026 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.152514>
10. Hafiz Ali Muhammad, Su Lim, Hyerin Kim, Young Duk Lee. *Сравнительная оценка методов электролиза для производства зелёного водорода с использованием солнечной энергии.* 2025 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.122104>

REFERENCES

1. Bouchra Oussmou, Samya Sigure, Souad Abderafi. *Review of green hydrogen production technologies, to choose the optimal process of electrolysis-renewable energy.* 2026 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116205>
2. Rafika Louli, Stefan Giurgea, Issam Salhi, Salah Laghrouche, Abdesslem Djerdir. *A Critical Review of Green Hydrogen Production by Electrolysis: From Technology and Modeling to Performance and Cost.* 2026 <https://doi.org/10.3390/en19010059>
3. Rawan A. Abdelsalam, Moataz Mohamed, Hany E.Z. Farag, Ehab F. El-Saadany. *Green hydrogen production plants: A techno-economic review.* 2024 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118907>
4. Henrique F. Araújo, Julián A. Gómez, Diogo M. F. Santos. *Proton-Exchange Membrane Electrolysis for Green Hydrogen Production: Fundamentals, Cost Breakdown, and Strategies to Minimize Platinum-Group Metal Content in Hydrogen Evolution Reaction Electrocatalysts.* 2024 <https://doi.org/10.3390/catal14120845>

5. Hua Liu, Miao Yu, Xiaofeng Tong, Qingjie Wang, Ming Chen. *High Temperature Solid Oxide Electrolysis for Green Hydrogen Production*. 2024 <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00795>
6. Minsu Kim, Donggyun Lee, Meng Qi, Junghwan Kim. *Techno-economic analysis of anion exchange membrane electrolysis process for green hydrogen production under uncertainty*. 2024 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118134>
7. Ailitabaier Abudureyimu, Ayiguzhali Tuluhong, Qingpu Chang, Feng Wang, Bao Luo. *A Comprehensive Review of Green Hydrogen Technology: Electrolysis Methods, Topologies and Control Strategies, Applications*. 2025 <https://doi.org/10.3390/ma18214826>
8. Efenwengbe Nicholas Aminaho, Ndukaegho Sabastine Aminaho, Faith Aminaho. *Techno-economic assessments of electrolyzers for hydrogen production*. 2025 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126515>
9. Abba L. B., Ahmed S. Menesy, Kotb M. Kotb, Surachai Chaitusaney, Mohammad A. Abido, Mahmoud Kassas, Usman Habu Taura, Mukhtar Fatihu Hamza. *Modelling, design and techno-economic comparison of electrolyzer technologies for photovoltaic-wind grid-tied hydrogen refueling infrastructure*. 2026 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.152514>
10. Hafiz Ali Muhammad, Su Lim, Hyerin Kim, Young Duk Lee. *Comparative evaluation of electrolysis methods for solar-assisted green hydrogen production*. 2025 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.122104>

ЖАСЫЛ СУТЕГІ ӨНДІРУ ЖҮЙЕЛЕРІН ЗЕРТТЕУ

А.Д. Қойшығара, Д.Б. Баимбетов

Есенов университеті, Ақтау қ., Қазақстан

e-mail: koishygara.altynbek@yu.edu.kz, d2.baimbetov@yu.edu.kz

Аңдатпа. Мақалада суды электролиздеу негізінде жасыл сутекті өндірудің заманауи технологияларына салыстырмалы талдау жүргізілген. Зерттеу аясында сілтілі (AEL), протон алмасу мембраналы (PEM), қатты оксидті (SOEC) және анион алмасу мембраналы (AEM) электролизерлер қарастырылды. Зерттеудің өзектілігі төмен көміртекті энергетикаға көшу қажеттілігімен және өнеркәсіп пен энергетиканы декарбонизациялау үшін тиімді шешімдерді іздеумен байланысты.

Жұмыста электролизерлердің негізгі техникалық сипаттамалары, соның ішінде тиімділігі, жұмыс температурасы, ток тығыздығы, қызмет ету мерзімі және технологиялық жетілу деңгейі талданды. Сонымен қатар, сутекті өндіру жүйелерінің технико-экономикалық тиімділігі LCOH (сутектің деңгейленген құны) көрсеткіші арқылы бағаланды.

Зерттеу нәтижелері әртүрлі электролиз технологияларының тиімділігі мен құны бойынша айтарлықтай айырмашылықтары бар екенін көрсетті. Қатты оксидті электролизерлер ең жоғары тиімділікті көрсеткенімен, олардың сенімділігі шектеулі. PEM-электролизерлер жаңартылатын энергия көздерімен біріктіру үшін ең қолайлы болып табылады. Сілтілі электролизерлер ең жетілген және қолжетімді технология болып табылады, ал AEM болашақта перспективалы бағыт ретінде қарастырылады.

Сонымен қатар, сутектің құнына ең үлкен әсер ететін фактор электр энергиясының бағасы екені анықталды. Зерттеу нәтижелері жасыл сутек өндірісінде тиімді технологияларды таңдауда қолданылуы мүмкін.

Түйінді сөздер: жасыл сутек, электролиз, AEL, PEM, SOEC, AEM, LCOH, технико-экономикалық талдау, жаңартылатын энергия көздері.

RESEARCH OF GREEN HYDROGEN PRODUCTION SYSTEMS

Koishygara A., Baimbetov D.

Yessenov University, Aktau, Kazakhstan

e-mail: koishygara.altynbek@yu.edu.kz, d2.baimbetov@yu.edu.kz

Abstract. This article presents a comparative analysis of modern green hydrogen production technologies based on water electrolysis, including alkaline (AEL), proton exchange membrane (PEM), solid oxide (SOEC), and anion exchange membrane (AEM) electrolyzers. The relevance of the study is driven by the global transition toward low-carbon energy systems and the need for efficient solutions to decarbonize industry and the energy sector.

The study examines key technical characteristics of electrolyzers, such as efficiency, operating temperature, current density, lifetime, and technological maturity. Particular attention is given to the techno-economic evaluation of hydrogen production systems using the Levelized Cost of Hydrogen (LCOH) metric.

The results indicate significant differences among electrolysis technologies in terms of cost and performance. SOEC systems demonstrate the highest efficiency but face durability challenges. PEM electrolyzers offer high operational flexibility and are well suited for integration with renewable energy sources. Alkaline electrolyzers remain the most mature and cost-effective technology, while AEM systems are considered a promising emerging solution.

It is also found that electricity cost is the dominant factor affecting hydrogen production cost, accounting for the largest share of LCOH. The findings of this study can be used to support decision-making in selecting optimal technologies for green hydrogen production and developing sustainable energy strategies.

Keywords: green hydrogen, water electrolysis, AEL, PEM, SOEC, AEM, LCOH, techno-economic analysis, renewable energy.