

Оценка перспектив и экономической целесообразности различных методов производства водорода для использования в ракетно-космической отрасли

Assessment of the prospects and economic feasibility of various methods of hydrogen production for use in the rocket and space industry

Современные экологические тенденции диктуют необходимость снижения выбросов парниковых газов (CO_2) предприятиями, в связи с чем по всему миру наблюдается постепенный переход к альтернативным источникам энергии, в том числе водородной энергетике. Уникальные энергетические и химические свойства обуславливают возрастающий спрос на водород в качестве энергоносителя и экологически чистого топлива в различных отраслях, в том числе для использования в двигателях ракет-носителей. В российской ракетно-космической отрасли также существует потребность в использовании водорода. Сложности в транспортировке и хранении водорода делают актуальным его производство на космодромах, однако в настоящее время пусковые площадки Российской Федерации не располагают подобной инфраструктурой. Анализ существующих методов показал, что оптимальными для малотоннажного производства водорода являются методы электролиза воды и пиролиза метана. Средняя расчетная себестоимость производства водорода на протяжении жизненного цикла предприятия (Levelized Cost of Hydrogen, LCOH) в условиях Российской Федерации составила 500,0 руб./кг и 102,0 руб./кг для электролиза и плазменного пиролиза соответственно.

Modern environmental trends dictate the need of enterprises to reduce greenhouse gas emissions. That is why a gradual transition to alternative sources of energy around the world is observed, hydrogen energy included. The unique energy and chemical properties increase the demand for hydrogen as an energy carrier and as environmentally friendly fuel in different industries, including rocket engines fuel. The Russian space industry is also experiencing a need for hydrogen. Difficulties of hydrogen transportation and storage make the on-site hydrogen production in demand, however the Russian Federation's launch sites currently lack the necessary infrastructure. An analysis of existing methods has shown that the methods of water electrolysis and methane pyrolysis are optimal for small-scale hydrogen production. The Levelized Cost of Hydrogen (LCOH) in the Russian Federation was estimated at 500,0 and 102,0 RUB/kg for electrolysis and plasma pyrolysis, respectively.

Ключевые слова: водород, пиролиз метана, электролиз, средняя расчетная себестоимость водорода, LCOH, водородная энергетика, бирюзовый водород, низкоуглеродный водород, безуглеродная энергетика

Keywords: hydrogen, methane pyrolysis, electrolysis, levelized cost of hydrogen production, LCOH, hydrogen energy, turquoise hydrogen, low-carbon hydrogen, carbon-free energy

**ЗАНИНА АННА АЛЕКСАНДРОВНА**

Главный специалист отдела прикладных и системных проектов Управления стратегического планирования и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»

E-mail: ZaninaAA@agat-roscosmos.ru

ZANINA ANNA

Chief specialist of Applied and System Projects Department of Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC "Organization "Agat"

**СТЕПАНОВ
АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

Менеджер комплексных проектов отдела прикладных и системных проектов Управления стратегического планирования и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»

E-mail: StepanovAV@agat-roscosmos.ru

**STEPANOV
ANDREY**

Complex project manager of Applied and System Projects Department of Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC "Organization "Agat"

**СОКОЛОВ ИЛЬЯ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ**

Заместитель начальника управления – начальник отдела прикладных и системных проектов Управления стратегического планирования и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»

E-mail: SokolovIV@agat-roscosmos.ru

SOKOLOV ILYA

Deputy Head of Directorate – Head of Applied and System Projects Department of Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC "Organization "Agat"

**ШАПОВАЛОВА
ОКСАНА ВЯЧЕСЛАВОВНА**

К.х.н., менеджер комплексных проектов Управления стратегического планирования и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»

E-mail: ShapovalovaOV@agat-roscosmos.ru

**SHAPOVALOVA
OKSANA**

Ph.D. in Chemistry, complex project manager of Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC "Organization "Agat"

**ЛИСОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

Начальник Управления стратегического планирования и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»

E-mail: LisovAA@agat-roscosmos.ru

LISOV ALEXEY

Head of Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC "Organization "Agat"

Для цитирования: Занина А. А. Оценка перспектив и экономической целесообразности различных методов производства водорода для использования в ракетно-космической отрасли / А. А. Занина, А. В. Степанов, И. В. Соколов, О. В. Шаповалова, А. А. Лисов. // Экономика космоса. – 2025. – № 13. – С. 22–40. – DOI 10.48612/agat/space_economics/2025.04.13.03

Введение

Современные тенденции в сфере экологической безопасности и управления климатическими изменениями диктуют необходимость снижения выбросов парниковых газов, в связи с чем ужесточается политика контроля за их образованием промышленными предприятиями. Среди инструментов, призванных ограничить выбросы парниковых газов, можно выделить экономические (углеродные налоги, системы торговли квотами на выбросы парниковых газов, субсидии на использование низкоуглеродных технологий) и административно-технические (техническое регулирование, установление норм расходования ресурсов, рекомендации к применению низкоуглеродных технологий)¹.

В Российской Федерации в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 4 ноября 2020 г. № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов» к 2030 году планируется обеспечить сокращение выбросов парниковых газов до 70% относительно уровня 1990 года. В связи с этим реализуются различные инициативы,

стимулирующие «технологический переход <...> от генерации на основе углеводородного сырья и других видов топлива к безуглеродным энергоресурсам и энергоресурсам с низким уровнем выбросов парниковых газов». Утвержденная стратегия предполагает развертывание и развитие новых отраслей промышленности, включая водородную энергетику². В данной публикации предлагается сравнение различных методов производства водорода, а также оценка их себестоимости в условиях Российской Федерации.

Водород как компонент топлива для космических средств выведения

Создание индустрии водородной энергетики в Российской Федерации запланировано в три этапа (табл. 1). Реализация программы предусматривает разработку нормативно-правовой базы, привлечение мер государственной поддержки и использование отечественных технологий и оборудования³.

Этап	Планируемые мероприятия	Планируемый объем производства водорода, в год
1 этап 2021-2024	- Реализация пилотных проектов; - Создание водородных кластеров; - Создание научно-технической инфраструктуры; - Разработка отечественных технологий и установок для получения водорода.	До 0,2 млн тонн
2 этап 2025-2035	- Запуск первых коммерческих проектов; - Создание крупных производств водорода и их применение в различных секторах экономики; - Реализация пилотных проектов на базе отечественного оборудования.	От 2 до 12 млн тонн
3 этап 2036-2050	- Преимущественное использование возобновляемых источников энергии для производства водорода; - Широкое применение водородных технологий в сферах транспорта, промышленности, энергетики Российской Федерации; - Уверенные позиции Российской Федерации на мировом рынке водорода.	От 15 до 50 млн тонн

Табл. 1. Поэтапное внедрение водородной энергетики в Российской Федерации на период до 2050 года.
Источник: составлено авторами на основе Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации

¹ Международные подходы к углеродному ценообразованию. Департамент многостороннего экономического сотрудничества Минэкономразвития России [Электронный ресурс] // Минэкономразвития России: [сайт]. [2021]. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/c13068c695b51eb60ba8cb2006dd81c1/13777562.pdf> (дата обращения: 20.06.2025).

² Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 октября 2021 г. № 3052-р.

³ Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 5 августа 2021 г. № 2162-р.

Задачи увеличения доли водорода в энергобалансе страны имеют эффект и для развития ракетно-космической промышленности. Водород обладает рядом положительных свойств, делающих его привлекательным для использования в качестве компонента ракетного топлива:

1. Наибольший удельный импульс водорода⁴ среди жидких топлив позволяет при одинаковой стартовой массе ракеты увеличить массу выводимой на орбиту полезной нагрузки;
2. Водород практически полностью сгорает с образованием воды, что принципиально важно для разработки многоразовых ракет-носителей: образование сажи и кокса при сгорании углеводородных топлив может снизить производительность или даже вывести двигатель из строя⁵.

Сегодня уже существуют несколько примеров использования водорода в качестве компонента ракетного топлива в таких ракета-носителях, как Atlas V, Ariane 5, Long March 5, Delta IV Heavy⁶. В отечественной практике был опыт применения водорода в качестве топлива двигателей РД-0120 второй ступени ракеты-носителя «Энергия». По оценкам АО «Организация «Агат», потребность ракетно-космической отрасли

Российской Федерации в этом химическом элементе в краткосрочной перспективе составит несколько тысяч тонн в год (рис. 1). Многообещающим представляется его использование в качестве топлива для разрабатываемой многоразовой ракеты-носителя «Корона» и для двигателя РД-0150 третьей ступени ракеты-носителя «Ангара-А5В».

Водород обладает рядом свойств, которые делают его транспортировку проблематичной и затруднительной [1]. Среди них:

- повышенные пожароопасность и взрывоопасность;
- низкая температура сжижения (-252.75°C);
- низкая плотность (71 кг/м^3) и динамическая вязкость ($0,136 \cdot 10^{-3} \text{ мПа}\cdot\text{с}$);
- взаимодействие с контактирующими материалами («наводороживание» и охрупчивание материалов);
- текучесть и высокие потери на испарение.

Возможным решением проблемы транспортировки может стать малотоннажное производство сжиженного водорода на местах его использования, то есть непосредственно на космодромах. Кроме того, собственное производство позволит обеспечить выполнение предъявляемых к водороду стандартов качества⁷ и необходимых объемов производства.

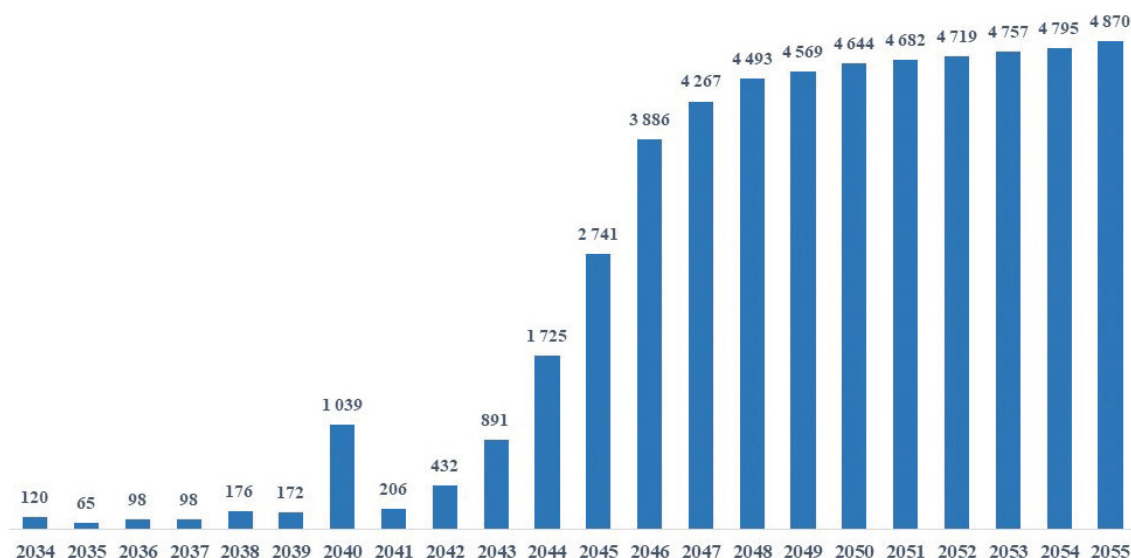


Рис. 1. Потребность в водороде на космодромах Российской Федерации, тонн.
Источник: составлено авторами

⁴ Справочник по свойствам веществ и материалов [Электронный ресурс]. [2025]. URL: <http://thermalinfo.ru/> (дата обращения: 22.06.2025).

⁵ Using Liquid Hydrogen As Rocket Fuel – Advantages And Drawbacks [Электронный ресурс] // Headed for Space: [сайт]. [2025]. URL: <https://headedforspace.com/using-liquid-hydrogen-as-rocket-fuel/> (дата обращения: 22.06.2025).

⁶ Справочник по свойствам веществ и материалов [Электронный ресурс]. [2025]. URL: <http://thermalinfo.ru/> (дата обращения: 22.06.2025).

⁷ ГОСТ Р 56248-2014 – национальный стандарт Российской Федерации «Водород жидкий. Технические условия».

Повышение спроса на водород способствует разработке новых технологий его получения и совершенствованию старых.

Обзор и сравнение методов получения водорода

В настоящее время в мире существует немало компаний и предприятий по получению водорода. Для удобства мировым сообществом введена «цветная» классификация методов получения водорода, однако она носит довольно условный характер (рис. 2). Преимущественной технологией является паровая конверсия метана (обеспечивает около 61% производимого в мире водорода)⁸. Кроме того, осуществляются масштабные научно-исследовательские работы по поиску и внедрению новых эффективных способов производства.

С целью поиска оптимального метода получения водорода для применения в РКО произведен обзор с точки зрения таких факторов, как энергетические показатели процесса, углеродный след, технологические

особенности метода.

Заранее отметим, что проблему образования парниковых газов возможно решить с помощью технологий улавливания, хранения и дальнейшего использования образующегося углекислого газа, однако данная технологическая стадия повышает стоимость производства. Технологии улавливания и использования углекислого газа в мире находятся на стадии активной разработки и внедрения, но должны быть адаптированы под современные масштабы производства. Кроме того, для эффективной реализации такой стратегии необходимо наличие рынка сбыта углекислого газа.

Отметим, что при производстве сетевой электроэнергетики также происходит образование углекислого газа, однако при исследовании этот вклад не учитывался. Перспективным является использование электроэнергии, вырабатываемой альтернативными источниками энергии (энергия Солнца, ветра и т.д.). Далее рассмотрены наиболее распространенные методы производства водорода.

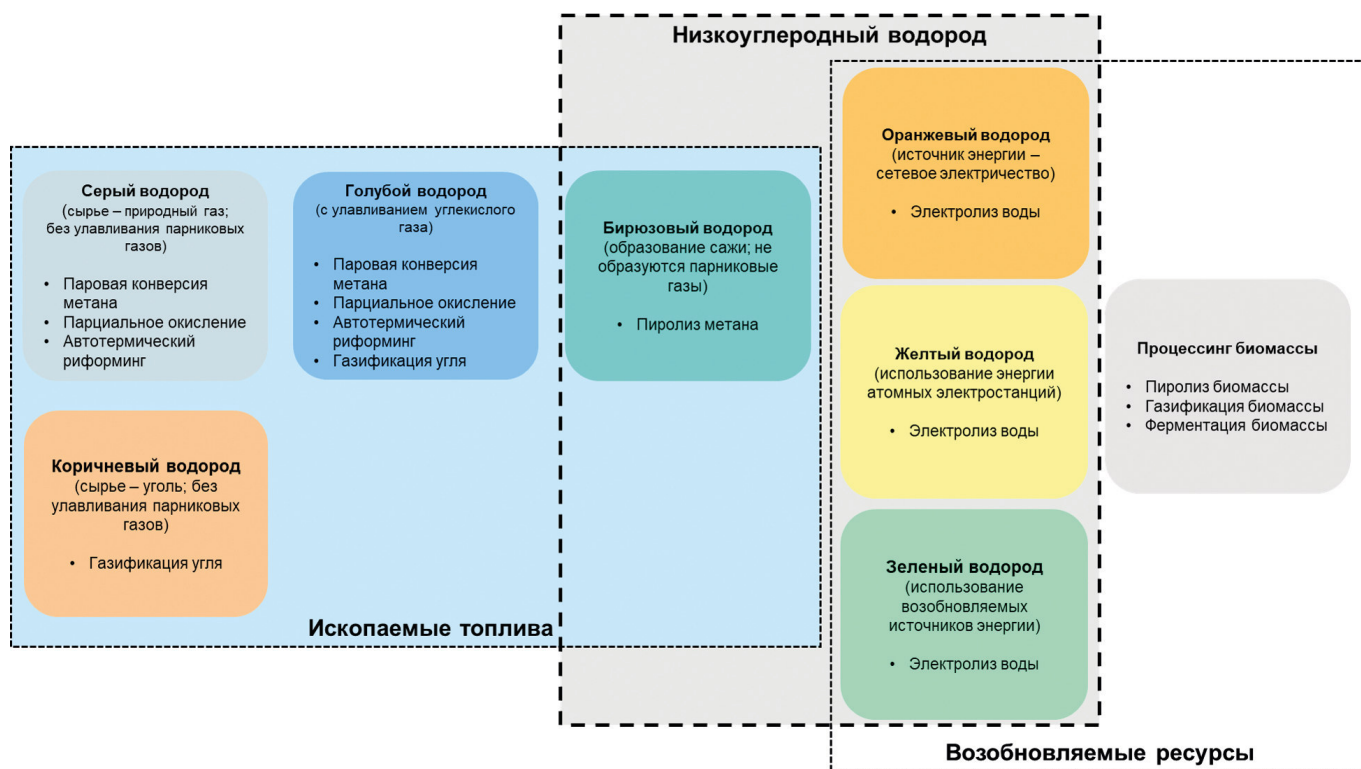
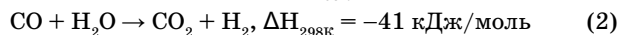


Рис. 2. «Цветная» классификация основных методов получения водорода.
Источник: составлено авторами на основе данных ресурса FASTECH⁹

⁸ Global Hydrogen Review 2024 [Электронный ресурс] // IEA: [сайт]. [2024]. URL: <https://www.iea.org/reports/global/hydrogen/review-2024> (дата обращения: 22.06.2025).

⁹ The colors of hydrogen [Электронный ресурс] // FASTECH: [сайт]. [2024]. URL: <https://www.fastechus.com/blog/the-colors-of-hydrogen-explained> (дата обращения: 22.06.2025).

1) Паровая конверсия метана – наиболее развитая технология получения водорода из природного газа, основной способ его получения в промышленности (порядка 61% от мирового производства). Представляет собой двухстадийный химический процесс:



Значительным недостатком метода является образование большого количества углекислого газа – на 1 кг производимого водорода образуется до 10 кг углекислого газа.

Другим недостатком метода является использование дорогостоящих катализаторов и высокое потребление электроэнергии.

2) Парциальное окисление метана (менее 1% от мирового производства водорода) – каталитический процесс полного окисления метана в присутствии стехиометрического количества кислорода при нагревании:



В ходе реакции образуется до 7 кг угарного газа на 1 кг водорода. Метод обладает несколькими недостатками для его применения в малотоннажном производстве:

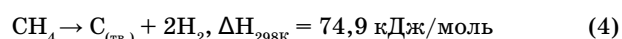
- высокая стоимость сырья (кислорода);

- образование углеродных отложений в условиях недостатка окислителя;
- необходимость дополнительной очистки целевого продукта [2].

3) Автотермический риформинг метана (менее 1% от мирового производства водорода) – объединяет в себе принципы паровой конверсии метана и парциального окисления.

В ходе реакций также выделяются парниковые газы. Преимуществом метода является низкое потребление электроэнергии, так как для протекания эндотермического процесса (1) используется теплота, выделяющаяся в ходе процессов (2), (3). Однако сохраняются недостатки предыдущих методов – дороговизна используемых катализаторов и кислорода.

4) Пиролиз – способ получения водорода путем термического разложения углеводородов (в основном, метана из природного газа, рассматривается далее) на углерод и водород в соответствии с уравнением реакции:



В зависимости от условий проведения реакции можно выделить высокотемпературный, каталитический и плазменный пиролиз [3] (рис. 3, табл. 2).

Производство так называемого «бирюзового» водорода (менее 1% от мирового производства водорода) выгод-

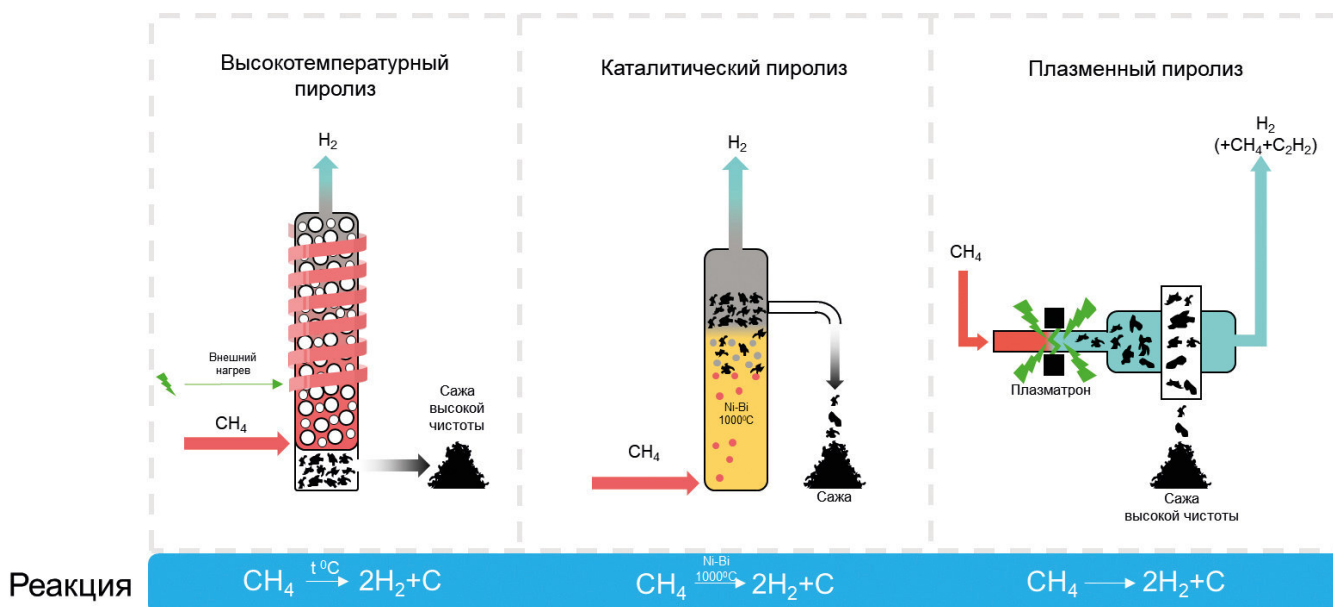


Рис. 3. Принципиальные схемы установок для пиролиза различных типов: высокотемпературного, каталитического, плазменного.

Источник: составлено авторами

	Высокотемпературный	Каталитический	Плазменный
Уровень готовности	Разработка	Разработка	Коммерциализация
Масштаб	кВт	кВт	кВт-МВт
Эффективность	70-99%	30-80%	до 99%
Температура процесса	70-99%	30-80%	до 99%
Температура	>1500 °С	500-1300 °С	1300-2100 °С
Преимущества	• получение побочного продукта – сажи	• получаемая сажа содержит больше полезных форм углерода (графит, графен, нанотрубки), чем при других способах пиролиза	• высокие показатели конверсии; • получение побочного продукта – сажи
Недостатки	• низкая скорость процесса; • необходимость доочистки водорода от непрореагировавшего метана	• сложности с отделением сажи от катализатора; • необходимость регенерации/замены катализатора в связи с накоплением сажи	• сложности с отделением сажи от катализатора; • необходимость регенерации/замены катализатора в связи с накоплением сажи

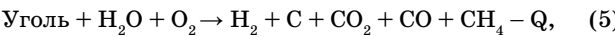
Табл. 2. Сравнение основных типов пиролиза.
Источник: составлено авторами на основе данных M. Shokrollahi et al, 2024 [4]

но выделяется среди других методов, использующих в качестве сырья ископаемые ресурсы. Во-первых, при проведении реакции не происходит образования парниковых газов, во-вторых, не требуется использование окислителей, в-третьих, необходимы низкие затраты электроэнергии. Важным фактором является образование побочного продукта – сажи. Производимая сажа потенциально может быть богата ценными модификациями углерода, например, нанотрубками, графеном и т.п.¹⁰.

Удаление сажи из реактора является трудновыполнимой задачей, поскольку речь идет не только об очистке ионизирующих поверхностей установки от твердых отложений, но и об удалении взвешенных частиц [5].

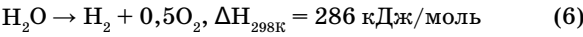
5) Газификация угля – способ получения водорода путем окисления угля. Этим методом получают около 21% производимого в мире водорода¹¹ и более 62% – в Китае¹². В системе протекают различные реакции окисления углерода с участием молекул кислорода

и воды, в результате чего получают смесь водорода и углеродсодержащих газов, требующих дальнейшего отделения от целевого продукта:



Главным недостатком данного метода можно указать невысокую эффективность процесса и низкий выход целевого продукта, а также выделение большого объема парниковых газов. Задачу также осложняет работа с веществом в твердой фазе (требуются технологические разработки/приемы для повышения эффективности процесса, транспортировки угля и т.д.).

6) Электролиз воды – способ получения газообразного, так называемого «голубого» водорода путем электролитического разложения воды в соответствии с уравнением реакции:

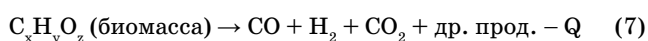


¹⁰ Справочник по свойствам веществ и материалов [Электронный ресурс]. [2025]. URL: <http://thermalinfo.ru/> (дата обращения: 22.06.2025).
¹¹ ГОСТ Р 56248-2014 – национальный стандарт Российской Федерации «Водород жидкий. Технические условия».
¹² By-product hydrogen: a bridge to a green hydrogen economy? [Электронный ресурс] // Dialogue Earth: [сайт]. [2022]. URL: <https://dialogue.earth/en/energy/by-product-hydrogen-a-bridge-to-a-green-hydrogen-economy/> (дата обращения: 20.06.2025).

По состоянию на 2024 год электролизом получают около 1% водорода в мире¹³. Парниковые газы в процессе электролиза не образуются. В зависимости от типа используемой электролитической ячейки можно выделить щелочной, твердооксидный электролиз и электролиз с протонообменной мембраной (рис. 4, табл. 3).

Общим недостатком всех электролитических методов являются высокие затраты электроэнергии (по сравнению, например, с пиролизом). Другой сложностью является необходимость замены основной конструктивной части электролизера – стэка, обладающего высокой стоимостью и ограниченным сроком службы. Однако высокая экологичность процессов и чистота образующегося продукта выгодно выделяют электролиз среди других методов.

7) Обработка биомассы (пиролиз/газификация/ферментация, менее 1% от мирового производства водорода) – процесс получения водорода путем переработки биомассы:



В ходе таких реакций образуются не только оксиды углерода, но и другие парниковые газы, требующие

улавливания.

Лимитирующим фактором применения данных методов является сложность обращения с исходным сырьем вследствие неоднородного состава, сезонности, трудности транспортировки, сбора и хранения и, как результат, серьезные препятствия для стабильного непрерывного производства одинаковых промышленных объемов водорода.

На основании обобщенных данных табл. 4, пиролиз метана и электролиз воды представляются авторам наиболее предпочтительными и перспективными методами для дальнейших исследований по следующим причинам:

1. Возможность организации малотоннажного производства.
2. Экологичность методов – не требуют улавливания парниковых газов.
3. Образование побочных продуктов, которые можно реализовать на рынке в относительно небольших количествах (термическая сажа в пиролизе).

В следующих разделах статьи для выбранных методов приведены результаты оценки себестоимости производства водорода в условиях Российской Федерации.

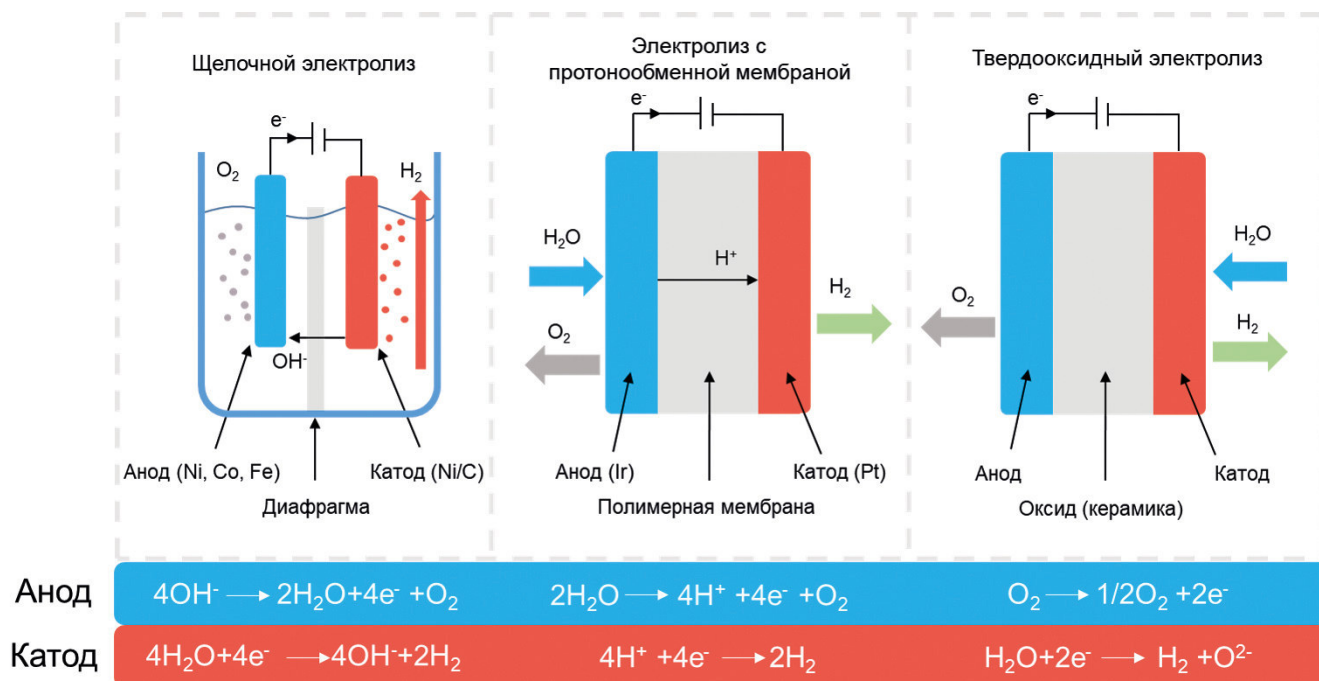


Рис. 4. Принципиальные схемы устройства электролизеров различных типов.
Источник: составлено авторами на основе данных F.M. Sapountzi et al, 2017 [6]

¹³ ГОСТ Р 56248-2014 – национальный стандарт Российской Федерации «Водород жидкий. Технические условия».

	Щелочной	С протонообменной мембраной	Плазменный
Уровень готовности	Коммерциализация	Коммерциализация	Разработка
Масштаб	МВт-ГВт	кВт-МВт	кВт
Эффективность электролизера	62-82%	67-82%	81-92%
Температура процесса	65-100 °С	70-90 °С	800-1000 °С
Средний срок работы стэка	60,000 ч	80,000 ч	20,000 ч
Преимущества	- экономическая эффективность при крупномасштабных производствах; - надежность и долговечность	- высокая эффективность, особенно при частичных нагрузках; - компактная конструкция	- лучшая энергетическая эффективность; - использование недорогостоящих катализаторов
Недостатки	- ограниченная эффективность в переменных условиях эксплуатации; - чувствительность к примесям в электролите; - подверженность электродов коррозии	- зависимость от дорогостоящих материалов (платиновые катализаторы); - подверженность деградации мембраны в жестких условиях эксплуатации; - сложности масштабирования	- низкий срок службы стэка электролизера; - сложности с динамическим изменением загрузки

Табл. 3. Сравнение основных типов электролиза.
Источник: составлено авторами на основе данных S.R. Arsad et al, 2024 [7]

Материалы и методы

Levelized cost of hydrogen (LCOH) – средняя расчетная себестоимость производства 1 кг водорода на протяжении всего жизненного цикла предприятия – показатель, используемый для предварительного финансового сравнения проектов. Экономический смысл показателя LCOH заключается в том, что он отражает наименьшую цену производимого водорода, при которой гарантируется безубыточность инвестиций в производство (NPV¹⁴ проекта равно нулю).

С целью расчета LCOH в условиях Российской Федерации авторами предлагается использовать данные о капитальных затратах из научно-исследовательских статей зарубежных авторов на тему технико-экономического обоснования различных методов производства водорода, в частности, электролиза и пиролиза метана.

Электролиз. Для вычисления LCOH, полученного

методом электролиза, использовалась следующая формула:

$$LCOH = \frac{TotalLifetimeCost}{TotalLifetimeH_2Production} = \frac{CAPEX + \sum_{n=1}^N \frac{OPEX_n \text{ deflated}}{(1+r)^n}}{\sum_{n=1}^N \frac{M_{H_2}}{(1+r)^n}}, \tag{8}$$

где:
CAPEX – капитальные затраты (у.е.);
OPEX – операционные затраты (у.е.);
M_{H₂} – масса производимого в год водорода (кг);
n – номер года эксплуатации;
N – общее число лет эксплуатации;
r – ставка дисконтирования.
Расчет произведен для стадии получения водорода

¹⁴ NPV (англ. Net Present Value) – чистая приведенная стоимость.

Метод	TRL [8]	Масштаб производства	Энергия на пр-во H ₂ (по реакции), кДж/моль	Углеродный след, CO ₂ экв./кг H ₂	Достоинства метода	Недостатки метода
Паровая конверсия метана	9-11	кВт-ГВт	42	9-10	Высокая чистота продукта; Доступное сырье; Энергетическая эффективность (60-75%)	Выделение до 10 кг CO ₂ на 1 кг произведенного H ₂
Парциальное окисление	2-3	МВт	-17,8	0	Не используется вода в реакции; Не выделяются парниковые газы; Высокая степень чистоты производимого H ₂	Контроль за соблюдением условий процесса (соотношение O ₂ /CH ₄); Использование высококачистого кислорода; Необходимость выделения водорода из газовой смеси
Автотермический риформинг	6-8	МВт	26	6,75	Требует меньше затрат энергии, чем паровая конверсия метана	Коксование при несоблюдении состава реакционной смеси; Необходимость использования высококачистого сырья
Газификация угля	6-8	кВт-ГВт	>65	>10	Доступное сырье	Низкая степень чистоты производимого H ₂ ; Необходимость очистки H ₂ от примесей газов
Пиролиз: А) высокотемпературный, Б) плазменный, В) каталитический	3-4 6-8 3-5	кВт-МВт	75	0	Не выделяются парниковые газы; Образование ценного побочного продукта – сажи	Возможность образования водородно-метановой смеси; Сложности с масштабированием; Использование высококачистого сырья
Электролиз: А) щелочной, Б) с протонообменной мембраной, В) твердооксидный	8-9 7-8 6-7	кВт-ГВт	286	0	Продукт очень высокой чистоты (99,9998%); Не требует дополнительной очистки; Сырье неуглеродного происхождения	Высокие затраты электроэнергии; Высокие капитальные затраты (электролизер)
Использование высококачистого кислорода	3-4	кВт-МВт	>65	>10	Экологичное возобновляемое сырье; Снижение использования ископаемых топлив	Зависимость от состава сырья и его сезонности и поставок; Необходимость очистки водорода от многих примесей

Сокращения в таблице: TRL (англ. technology readiness level) – уровень готовности технологии.

Табл. 4. Сравнение основных типов получения водорода.

Источник: составлено авторами на основе данных раздела «Обзор и сравнение методов получения водорода»

без учета стоимости предварительных мероприятий, дополнительной очистки, сжатия, хранения и транспортировки.

Кроме финансовых показателей, из литературных источников были получены значения эффективности и срока службы стэка. Явным образом учтены затраты на замену стэков электролизера по окончании заявленного срока службы:

$$CAPEX = CAPEX_0 + \sum_{n=x,y,\dots} \frac{Stack_cost}{(1+r)^n}, \quad (9)$$

где:

$CAPEX_0$ – капитальные затраты, закладываемые в начале проекта;

$Stack_cost$ – стоимость стэка электролизера.

В качестве допущения принималось, что в течение заявленного срока эксплуатации эффективность стэка постоянна и равна номинальной, по истечении срока производится замена стэка на новый.

Пиролиз. При расчете LCOH, полученного методом пиролиза, принималось, что установка имеет постоян-

ную эффективность и не требует замены каких-либо дорогостоящих частей. Также учитывалась стоимость продажи побочного продукта – сажи. Допускалось, что она соответствует показателям термической сажи. При производстве 1 кг водорода в соответствии с уравнением реакции (3) образуется 3 кг углерода (сажи):

$$LCOH = \frac{CAPEX + \sum_{n=1}^N \frac{OPEX_n \text{ deflated}^{-(3M_{H_2})n * SootPrice}}{(1+r)^n}}{\sum_{n=1}^N \frac{M_{H_2}}{(1+r)^n}}, \quad (10)$$

где:

SootPrice – цена термической сажи (60 руб./кг).

Операционные затраты включают в себя стоимость сырья (воды для электролиза и природного газа для пиролиза), сетевой электроэнергии, обслуживание оборудования в течение года, фонд оплаты труда. Добавлены ежегодные амортизационные отчисления, составляющие 5% от суммарных капитальных затрат.

Расчет стоимости водоснабжения произведен с учетом наибольших по Российской Федерации среднегодовых тарифов¹⁵. Расчет стоимости электроснабжения произведен с учетом максимальных среднегодовых тарифов сетевого электричества для предприятий¹⁶.

Фонд оплаты труда рассчитан исходя из максимальной среднемесячной заработной платы по стране с учетом социальных отчислений (31%). Допускалось, что при мощности производства менее 15 МВт на предприятии числится 15 сотрудников, более 15 МВт – 20 сотрудников.

Срок эксплуатации производства принят за 20 лет, ставка дисконтирования – 8%. При масштабировании расчета на 20-летний период использовались среднегодовые курсы валют¹⁷, отчетные тарифы, индексы-дефляторы за 2019–2024 годы¹⁸, а также прогнозные тарифы, среднегодовые курсы валют, индексы-дефляторы, представленные в Письме Министерства экономического развития Российской Федерации «О показателях долгосрочного прогноза социально-экономического развития

Российской Федерации на период до 2036 года...»¹⁹.

Для корректного сравнения LCOH стоимостные характеристики были конвертированы из валюты источника (доллар, евро, фунт стерлинга) в рубли.

Результаты и обсуждение

В соответствии с методикой, описанной в разделе «Материалы и методы», был произведен расчет показателя LCOH с учетом информации научных статей, посвященных технико-экономическому обоснованию использования методов электролиза и пиролиза для получения водорода.

Метод электролиза воды для получения водорода является намного более изученным (TRL 6-9), чем пиролиз метана (TRL 3-7), что объясняет наличие значительно меньшего объема информации на тему пиролиза.

1. Электролиз воды.

В связи с более высоким уровнем развития технологий щелочного электролиза и электролиза с протонообменной мембраной данным методам посвящено преимущественное число публикаций.

Как и ожидалось, среди электролитических методов получения водорода наименее дорогостоящим оказался щелочной электролиз. Себестоимость производства водорода твердооксидным электролизом и электролизом с протонообменной мембраной находится на одном уровне.

Расчетная себестоимость производства водорода методом щелочного электролиза лежит в пределах от 384,2 до 615,4 руб./кг, среднее значение LCOH составило 470,5 руб./кг.

Расчетная себестоимость производства водорода методом электролиза с протонообменной мембраной лежит в пределах от 366,8 до 795,1 руб./кг, среднее значение LCOH составило 533,0 руб./кг.

Расчетная себестоимость производства водорода методом твердооксидного электролиза находится в пределах от 324,6 до 872,6 руб./кг, среднее значение LCOH составило 522,4 руб./кг (табл. 5).

¹⁵ Тарифы на услуги водоснабжения и водоотведения [Электронный ресурс] // Мосводоканал: [сайт]. [2025]. URL: <https://www.mosvodokanal.ru/forabonents/tariffs/> (дата обращения: 25.06.2025).

¹⁶ Архив тарифов на регулируемые услуги [Электронный ресурс] // Мосэнергосбыт: [сайт]. [2025]. URL: <https://www.mosenergosbyt.ru/legals/tariffs-n-prices/archive/> (дата обращения: 25.06.2025).

¹⁷ Курс валют Центрального банка Российской Федерации [Электронный ресурс] // Курс валют: [сайт]. [2025]. URL: <https://www.kursvaliut.ru/средний-курс-валют-за-месяц> (дата обращения: 25.06.2025).

¹⁸ Индексы-дефляторы Министерства экономического развития Российской Федерации [Электронный ресурс] // АУ РБ Госэкс-пертиза: [сайт]. [2025]. URL: <https://ekspbur.ru/prices/indexes/?filter=9> (дата обращения: 25.06.2025).

¹⁹ Письмо Министерства экономического развития Российской Федерации от 7 декабря 2018 г. № 36097-АТ/ДОЗи «О показателях долгосрочного прогноза социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 года, используемых в целях ценообразования на продукцию, поставляемую по государственному оборонному заказу» [Электронный ресурс] // Гарант: [сайт]. [2025]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72044734/> (дата обращения: 25.06.2025).

Для каждого случая введены порядковые номера с идентификаторами: AWE – alkaline water electrolysis (щелочной электролиз), PEM – proton exchange membrane (электролиз с протонообменной мембраной), SOEC – solid oxide electrolyzer cell (твёрдооксидный электролиз).

Для определения факторов, вносящих наибольший вклад в себестоимость получения водорода, представле-

на разбивка цены на составляющие (рис. 5–7).

Капитальные затраты на создание системы можно разбить на две категории: затраты на стэки электролизеров и затраты на остальное оборудование. По данным источников, срок службы стэков для твёрдооксидного электролиза составляет в среднем 10-20 тыс. ч, в то время как для щелочного электролиза и твёрдооксид-

Метод	Идентификатор	Страна	Год	LCOH (из статьи), у.е./кг H ₂		LCOH (расчетный), у.е./кг H ₂		LCOH (расчетный), руб./кг H ₂		Источник
Щелочной	1_AWE	Разные страны	2025	3,5	евро	4,97	евро	384,2	руб.	²⁰
Щелочной	2_AWE	Южная Корея	2022	6,83	долл.	6,26	долл.	435,3	руб.	[9]
Щелочной	3_AWE	Южная Корея	2021	5,32	долл.	6,15	долл.	442,2	руб.	[10]
Щелочной	4_AWE	Китай	2021	5,2	евро	5,6	евро	445,2	руб.	[11]
Щелочной	5_AWE	Великобритания	2020	7,09	фунтов	4,93	фунтов	445,3	руб.	²¹
Щелочной	6_AWE	Южная Корея	2022	7,6	долл.	6,27	долл.	453,4	руб.	[12]
Щелочной	7_AWE	ЕС (Дания)	2020	не более 4	евро	5,84	евро	457,2	руб.	[13]
Щелочной	8_AWE	Испания	2022	3,5	евро	5,9	евро	457,8	руб.	[14]
Щелочной	9_AWE	Разные страны	2020	?	долл.	6,41	долл.	458,9	руб.	²²
Щелочной	10_AWE	США	2019	1,13-5,41	долл.	7,61	долл.	523,9	руб.	[15]
Щелочной	11_AWE	Великобритания	2024	8,68	евро	6,64	евро	527,3	руб.	[16]
Щелочной	12_AWE	Южная Корея	2021	?	долл.	7,75	долл.	550,9	руб.	[10]
Щелочной	13_AWE	Южная Корея	2023	11,77	долл.	8,51	долл.	615,4	руб.	[17]
С протонообменной мембраной	1_PEM	Великобритания	2023	4,34	фунтов	3,92	фунтов	366,8	руб.	[18]
С протонообменной мембраной	2_PEM	Разные страны	2025	3,8	евро	5,4	евро	418,1	руб.	[14]
С протонообменной мембраной	3_PEM	Южная Корея	2022	8,55	долл.	6,6	долл.	482,13	руб.	[12]
С протонообменной мембраной	4_PEM	Великобритания	2020	7,88	фунтов	5,91	фунтов	525,7	руб.	[15]
С протонообменной мембраной	5_PEM	Великобритания	2024	10,48	евро	6,77	евро	537,3	руб.	[16]
С протонообменной мембраной	6_PEM	Китай	2021	6,5	евро	7,46	евро	588,4	руб.	[11]
С протонообменной мембраной	7_PEM	Южная Корея	2023	13,44	долл.	11	долл.	795,1	руб.	[17]
Твёрдооксидный	1_SOEC	ЕС	2022	не более 6	евро	4,19	евро	324,6	руб.	[19]
Твёрдооксидный	2_SOEC	Южная Корея	2022	7,16	долл.	7,03	долл.	510,4	руб.	[12]
Твёрдооксидный	3_SOEC	ЕС (Дания)	2020	2,7-4,7	евро	7,01	евро	526,6	руб.	[13]
Твёрдооксидный (эфф.)	4_SOEC	Южная Корея	2022	10,16	долл.	10,02	долл.	728,2	руб.	[12]

Табл. 5. Расчетные значения LCOH, полученного электролитическими методами, в условиях Российской Федерации.
Источник: составлено авторами

²⁰ Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition / International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi, 2018. ISBN 978-92-9260-077-8.

²¹ Hydrogen Production Costs 2021 [Электронный ресурс] // Department for Business, Energy & Industrial Strategy: [сайт]. [2021]. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1011506/Hydrogen_Production_Costs_2021.pdf (дата обращения: 26.06.2025).

²² IEA G20 Hydrogen Report: Assumptions [Электронный ресурс] // IEA: [сайт]. [2025]. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a02a0c80-77b2-462e-a9d5-1099e0e572ce/IEA-The-Future-of-Hydrogen-Assumptions-Annex.pdf> (дата обращения: 26.06.2025).

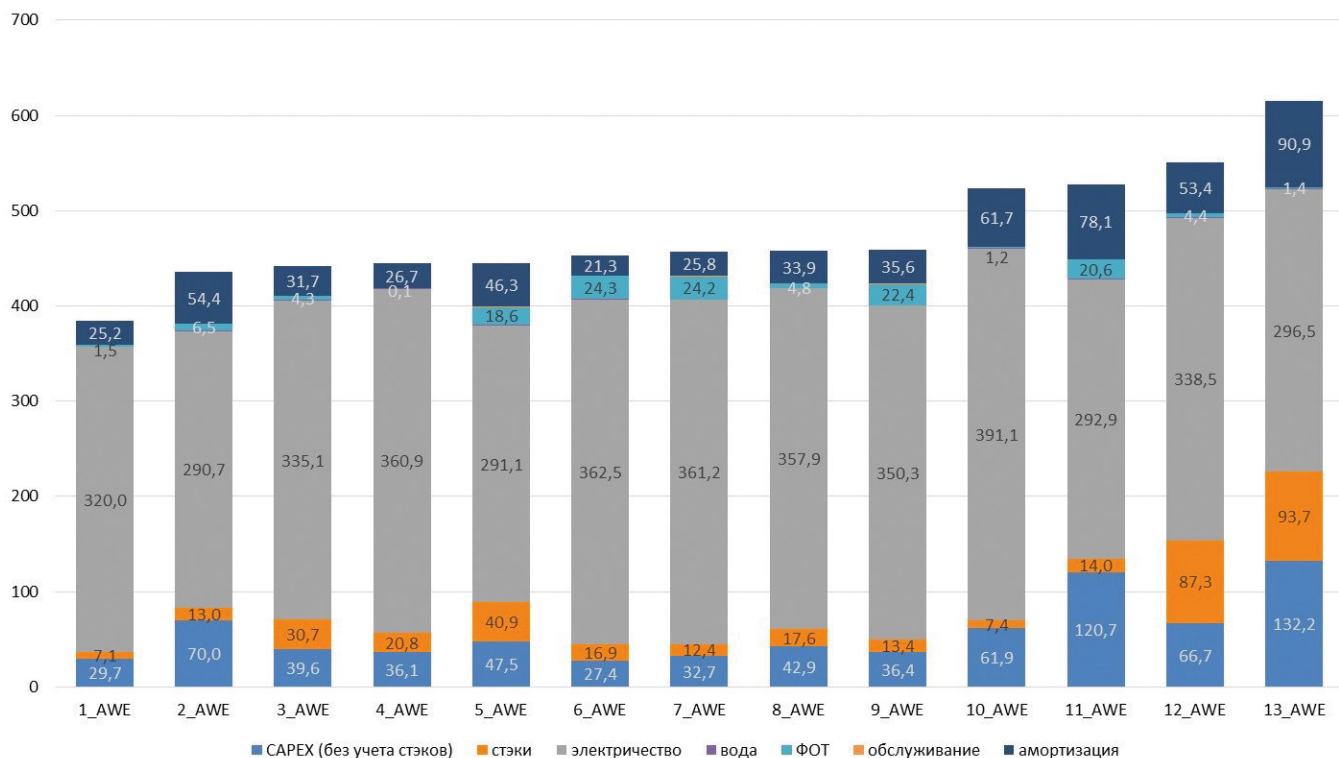


Рис. 5. Распределение и вклад отдельных затрат в значения LCOH для щелочного электролиза, руб./кг.
Источник: составлено авторами

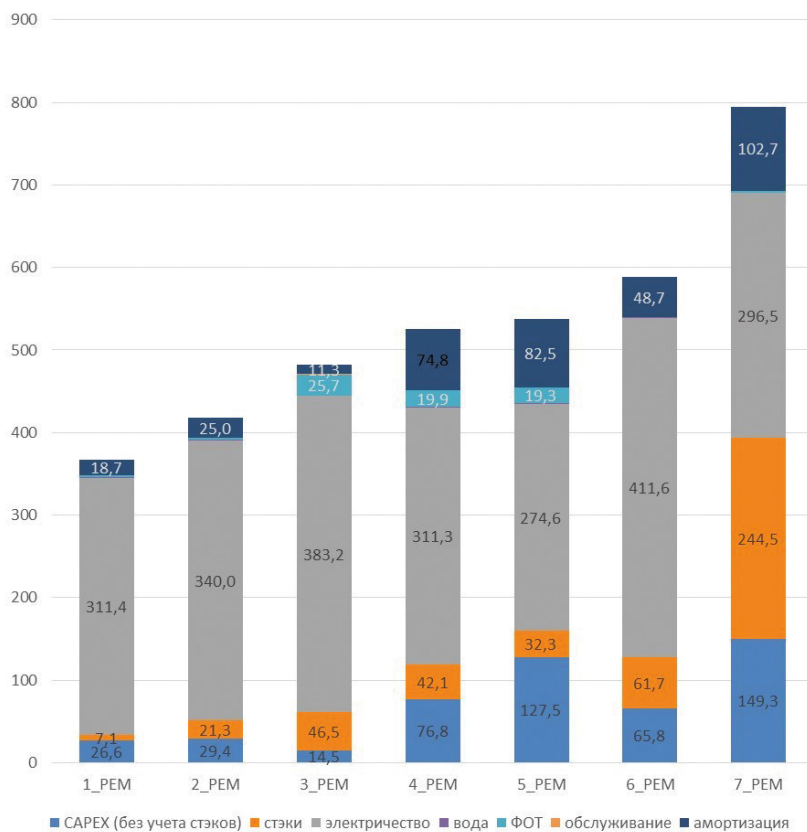


Рис. 6. Распределение и вклад отдельных затрат в значения LCOH для электролиза с протонообменной мембраной, руб./кг.
Источник: составлено авторами

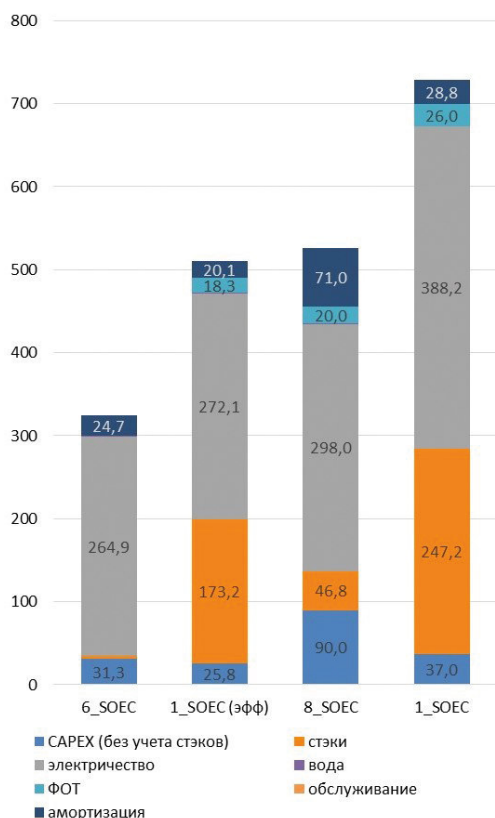


Рис. 7. Распределение и вклад отдельных затрат в значения LCOH для твердооксидного электролиза, руб./кг.
Источник: составлено авторами

ного электролиза – от 60 до 90 тыс. ч. Низкий срок службы стэков обуславливает необходимость их закупки и обновления.

Данный тип затрат определяет капитальные вложения для метода твердооксидного электролиза, где затраты на стэки достигают до 35% от LCOH (рис. 6, 2_SOEC, 4_SOEC). Напротив, низкий уровень капитальных затрат на стэки для 1_SOEC объясняется:

- относительно низкой себестоимостью стэка (12% от CAPEX);
- длительным сроком эксплуатации – 90 тыс. ч, что в несколько раз превышает стандартные значения для твердооксидного электролиза и кажется не вполне реалистичным.

Для всех рассматриваемых методов наиболее критичным фактором, определяющим себестоимость получения водорода, являются операционные затраты на электроснабжение (от 70 до 90% LCOH).

Снижение затрат на электроэнергию возможно при выполнении следующих условий:

1. Снижение себестоимости электроэнергии (например, использование в будущем альтернативных источников энергии по более низкой стоимости).
2. Повышение эффективности преобразования электрической энергии в установке в полезную энер-

гию химической реакции (в настоящий момент эффективность промышленных электролизеров в соответствии с данными источников не превышает 75%).

Например, снижение LCOH и вклада затрат на электроэнергию наблюдается при переходе от обычной системы (4_SOEC) к системе с повышенной энергоэффективностью (2_SOEC) (рис. 3).

Влияние эффективности установки на долю расходов на электричество в LCOH можно проследить на примере рассматриваемых случаев щелочного электролиза (2, 11, 3, 9, 10_AWE). Можно наблюдать постепенное увеличение затрат на электроснабжение при поступательном переходе от системы с эффективностью 82% (2_AWE) к системе с эффективностью 54,3% (11_AWE): для производства 1 кг водорода необходимо затратить 290,7 и 391,1 руб. соответственно.

Отметим, что водоснабжение, ежегодное обслуживание системы и ФОТ в большинстве случаев вносят незначительный вклад в LCOH.

На основании результатов (табл. 5, рис. 5–7) можно сделать вывод, что производство водорода методами электролиза в Российской Федерации оказывается выгоднее, чем за рубежом, при условии более низких тарифов на электроэнергию. Значения стоимости электроэнергии, используемые при расчетах LCOH в Великобритании и странах Европейского союза, часто являются заниженными относительно реальных тарифов для промышленных предприятий в этих странах и относятся к субсидированным проектам [13–15].

2. Пиролиз метана.

Технология пиролиза метана является менее развитой и распространенной, чем электролиз воды. В открытых источниках содержится мало информации о данном методе в части финансовых показателей, в связи с чем довольно сложно оценить потенциальную стоимость производства водорода в промышленных масштабах. Стоит отметить, что в литературных источниках не учитывают замену каких-либо критических частей плазменной установки на протяжении реализации всего проекта. Таким образом, основным показателем, влияющим на стоимость производства водорода методом плазменного пиролиза, являются капитальные затраты.

Стоимость производства водорода методом плазменного пиролиза в условиях Российской Федерации составляет 102,0 руб./кг (табл. 6, рис. 8).

Анализ научной литературы показывает, что капитальные затраты на создание системы по получению водорода методом плазменного пиролиза находятся в пределах от 5 до 10 тыс. евро/кВт. Экспериментальные данные, полученные в лабораторных установках, пока-

Метод	Страна	Год	LCOH (из статьи), у.е./кг H ₂	LCOH (расчетный), у.е./кг H ₂	LCOH (расчетный), руб./кг H ₂	Источник
Плазменный пиролиз	Германия	2021	2,55 евро	1,343 евро	102,03 руб.	[20]

Табл. 6. Расчетные значения LCOH, полученного методом плазменного пиролиза, в условиях Российской Федерации.
Источник: составлено авторами

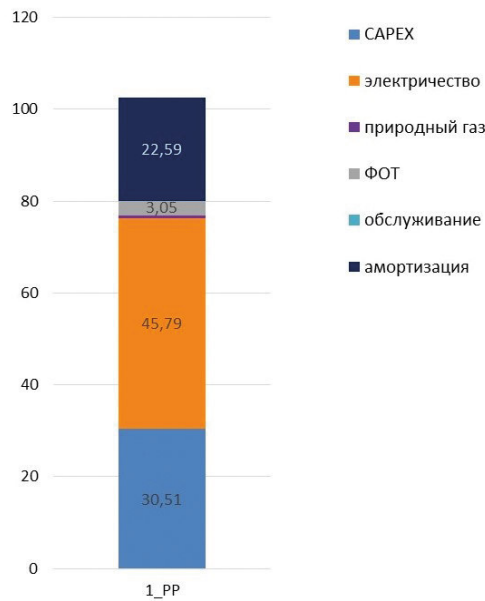


Рис. 8. Распределение и вклад отдельных затрат в значения LCOH для электролиза с протонообменной мембраной, руб./кг.
Источник: составлено авторами

	50%	75%	85%	90%	100%
5 тыс. евро/ кВт	163,25	108,84	96,03	90,7	81,63
7 тыс. евро/ кВт	197,24	131,49	116,02	109,58	98,62
8,5 тыс. евро/ кВт	222,73	148,48	131,05	123,74	111,36
10 тыс. евро/ кВт	248,21	165,47	146	134,89	124,11

Табл. 7. Зависимость LCOH (руб./кг) для плазменного пиролиза метана от эффективности установки (%) и капитальных затрат на установку (тыс. евро/кВт) без учета стоимости сажи.
Источник: составлено авторами

	50%	75%	85%	90%	100%
5 тыс. евро/ кВт	2,148	1,432	1,264	1,193	1,074
7 тыс. евро/ кВт	2,621	1,747	1,542	1,456	1,311
8,5 тыс. евро/ кВт	2,976	1,984	1,75	1,653	1,488
10 тыс. евро/ кВт	3,33	2,22	1,959	1,85	1,665

Табл. 8. Зависимость LCOH (евро/кг) для плазменного пиролиза метана от эффективности установки (%) и капитальных затрат на установку (тыс. евро/кВт) без учета стоимости сажи.
Источник: составлено авторами

3. Возможность реализации побочного продукта.

Реализация побочного продукта делает производство водорода методом плазменного пиролиза крайне

	50%	75%	85%	90%	100%
5 тыс. евро/ кВт	-76,75	-131,16	-143,97	-149,3	-158,37
7 тыс. евро/ кВт	-42,76	-108,51	-123,98	-130,42	-141,38
8,5 тыс. евро/ кВт	-17,27	-91,52	-108,98	-116,26	-128,64
10 тыс. евро/ кВт	8,21	-74,52	-93,99	-102,1	-115,89

Табл. 9. Зависимость LCON (руб./кг) для плазменного пиролиза метана от эффективности установки (%) и капитальных затрат на установку (тыс. евро/кВт) с учетом реализации сажи.

Источник: составлено авторами

выгодным, так как стоимость производимой сажи полностью покрывает затраты на производство (табл. 9, 10).

	50%	75%	85%	90%	100%
5 тыс. евро/ кВт	-0,811	-1,527	-1,695	-1,766	-1,885
7 тыс. евро/ кВт	-0,338	-1,212	-1,417	-1,503	-1,648
8,5 тыс. евро/ кВт	0,017	-0,975	-1,209	-1,306	-1,471
10 тыс. евро/ кВт	0,371	-0,739	-1	-1,109	-1,294

Табл. 10. Зависимость LCON (евро/кг) для плазменного пиролиза метана от эффективности установки (%) и капитальных затрат на установку (тыс. евро/кВт) с учетом реализации сажи.

Источник: составлено авторами

Заключение

Электролиз воды и пиролиз природного газа являются перспективными методами получения водорода в небольших масштабах.

Электролиз воды является относительно дорогостоящим методом получения водорода. Основной вклад в среднюю расчетную себестоимость производства (показатель LCON) вносят стоимость электролизера (стэков) и электроэнергии. Снижение LCON возможно при увеличении срока службы стэков, снижения стоимости электроэнергии (возможно при использовании альтернативных источников энергии) или при повышении энергоэффективности процессов.

В отличие от электролиза метод пиролиза метана требует низких затрат электроэнергии, поэтому основной вклад в LCON для него вносят капитальные затраты на оборудование. Метод находится в процессе развития,

поэтому справедливо ожидать снижение стоимости оборудования с дальнейшим совершенствованием технологий.

Производство водорода в условиях Российской Федерации может оказаться менее дорогостоящим, чем производство за рубежом, вследствие низкой себестоимости электроэнергии.

Научными институтами ракетно-космической отрасли Российской Федерации ведутся исследовательские работы по разработке технологий производства водорода. Например, в АО ГНЦ «Центр Келдыша» разработан плазматрон типа «звезда», позволяющий в лабораторных условиях получать водород из природного газа методом плазменного пиролиза. Наличие собственного малотоннажного производства водорода является многообещающим направлением в развитии отрасли.

Список литературы

- Егорычев В. С. Топлива химических ракетных двигателей / В. С. Егорычев, В. С. Кондрусев. – Самара: Издательство СГАУ, 2007. – 72 с.; ISBN 978-5-7883-0512-7. – Текст: непосредственный.
- Маслов И. А. Процессы разложения и парциального окисления метана в присутствии родий- и никельсодержащих катализа-

торов: автореферат дисс. ... кандидата химических наук: 02.00.13 / Маслов Игорь Александрович; [Место защиты: Рос. Гос. ун-т нефти и газа им. И.М. Губкина]. – Москва, 2009. – Текст: электронный. – URL: <https://new-disser.ru/avtoreferats/01004368701.pdf> (дата обращения: 30.06.2025).

3. Макконначи М. Обзор литературы по каталитическому пиролизу метана для получения водорода и углерода / М. Макконначи и др. – Текст: электронный // Международный журнал по водородной энергетике. – Т. 48, I. 66. – 2023. – С. 25660–25682. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.123> (дата обращения: 12.06.2025).

4. Шокроллахи М. Пиролиз метана как потенциальный фактор, меняющий правила игры в водородной экономике: технико-экономическая оценка и выбросы парниковых газов / М. Шокроллахи, Н. Теймури и др. – Текст: электронный // Международный журнал по водородной энергетике. – Т. 66. – 2024. – С. 337–353. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.056> (дата обращения: 12.06.2025).

5. Пушкарев А. И. Плазмохимический пиролиз метана в барботажном реакторе / А. И. Пушкарев, С. С. Полисадов, М. М. Анисимов, Ю. Струков. – Текст: электронный // Водород. Технологии. Будущее: сборник тезисов докладов II Всероссийской конференции с международным участием, г. Томск, 25–27 октября 2021 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2021. – С. 32. – URL: <https://earchive.tpu.ru/handle/11683/69227> (дата обращения: 17.06.2025).

6. Сапунтзи Ф. М. Электрокатализаторы для получения водорода, кислорода и синтез-газа / Ф. М. Сапунтзи. – Текст: электронный // Прогресс в энергетике и науке о горении. – Т. 58, I. 23. – 2017. – С. 1–35. – URL: https://www.researchgate.net/publication/308578569_Electrocatalysts_for_the_generation_of_hydrogen_oxygen_and_synthesis_gas (дата обращения: 17.06.2025).

7. Арсад С. Р. Последние достижения в области электролиза воды для получения водорода: всесторонний библиометрический анализ и обновление технологий / С. Р. Арсад, А. З. Арсад и др. – Текст: электронный // Международный журнал по водородной энергетике. – Т. 60. – 2024. – С. 780–801. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.184> (дата обращения: 09.06.2025).

8. Дермуть С. Сравнение наиболее перспективных технологий получения низкоуглеродистого водорода / С. Дермуть, У. Ридель. – Текст: электронный // Топливо. – Т. 340. – 2023. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127478> (дата обращения: 14.06.2025).

9. Ли Х. Перспективы промышленного производства экологически чистого водорода с помощью гибридной системы электролиза щелочной воды и системы накопления энергии, основанной на сезонном солнечном излучении / Х. Ли, Б. Чоу и др. – Текст: электронный // Журнал более чистого производства. – Т. 337. – 2022. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134210> (дата обращения: 20.06.2025).

10. Ли Б. Комплексная технико-экономическая и экологическая оценка производства экологически чистого H₂ методом электролиза щелочной воды на основе экспериментальных данных / Б. Ли, Х.-С. Чо и др. – Текст: электронный // Журнал экологической химической инженерии. – Т. 9. – 2021. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106349> (дата обращения: 20.06.2025).

11. Фан Дж.-Ли. Сравнение средней стоимости водорода (LCOH) при преобразовании угля в водород с использованием CCS и электролизе воды с использованием возобновляемых источников энергии в Китае / Дж.-Ли Фан, П. Ю. и др. – Текст: электронный // Энергия. – Т. 242. – 2022. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.123003> (дата обращения: 20.06.2025).

12. Джанг Д. Технико-экономический анализ и моделирование методом Монте-Карло технологии производства экологически чистого водорода с использованием различных технологий электролиза воды / Д. Джанг, Дж. Ким и др. – Текст: электронный // Преобразование энергии и управление. – Т. 258. – 2022. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115499> (дата обращения: 22.06.2025).

13. Нами Х. Технико-экономический анализ существующих и перспективных технологий электролиза для производства экологически чистого водорода / Х. Нами, О. Б. Ризванди и др. – Текст: электронный // Преобразование энергии и управление. – Т. 269. – 2022. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116162> (дата обращения: 22.06.2025).

14. Матуте Дж. Технико-экономическая модель и оценка осуществимости проектов по производству экологически чистого водорода на основе электролиза, обеспечиваемого фотоэлектрическими PPA / Дж. Матуте, Дж. М. Юста, Н. Навал. – Текст: электронный // Международный журнал по водородной энергетике. – Т. 48. – 2023. – С. 5053–5068. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.035> (дата обращения: 22.06.2025).

15. Фернандес Г. Интеграция производства водорода и рынков электроэнергии: аналитические материалы из Калифорнии / Г. Фернандес, О. Хосе и др. – Текст: электронный // Golden, CO: Национальная лаборатория возобновляемых источников энергии, NREL/TP-6A40-80902, 2022. – URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/80902.pdf> (дата обращения: 18.06.2025).

16. Хилл С. Стоимость получения чистого водорода с помощью морской ветроэнергетики и электролиза / С. Хилл и др. – Текст: электронный // Журнал более чистого производства. – Т. 445. – 2024. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141162> (дата обращения: 08.06.2025).

17. Шин Х. Технико-экономическая оценка производства экологически чистого водорода с использованием технологий низкотемпературного электролиза воды, непосредственно связанных с возобновляемыми источниками энергии / Х. Шин, Д. Джанг и др. – Текст: электронный // Преобразование и управление энергией. – Т. 286. – 2022. – URL: <https://doi.org/10.1016/j>.

enconman.2023.117083 (дата обращения: 12.06.2025).

18. Вивес А. Технично-экономический анализ крупномасштабного производства и хранения экологически чистого водорода / А. Вивес и др. – Текст: электронный // Прикладная энергетика. – Т. 346. – 2023. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121333> (дата обращения: 12.06.2025).

19. Пратчнер С. Автономная работа против сетевой: технико-экономическая оценка установки по преобразованию энергии в жидкость, сочетающей электролиз твердых оксидов и синтез Фишера-Тропша / С. Пратчнер и др. – Текст: электронный // Инженерно-химический журнал. – Т. 481. – 2024. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.148413> (дата обращения: 24.06.2025).

20. Кершер Ф. Получение низкоуглеродистого водорода с помощью электронно-лучевого плазменного пиролиза метана: технико-экономический анализ и оценка углеродного следа / Ф. Кершер, А. Старый и др. – Текст: электронный // Международный журнал по водородной энергетике. – Т. 46. – 2021. – С. 19897–19912. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.114> (дата обращения: 24.06.2025).

List of literature

1. Egorychev V. S. Fuels for chemical rocket engines / V. S. Egorychev, V. S. Kondrusev. – Samara: SSAU Publishing House, 2007. – 72 p.; ISBN 978-5-7883-0512-7. – Text: direct.

2. Maslov I. A. Decomposition and partial oxidation of methane in the presence of rhodium- and nickel-containing catalysts: abstract of the dissertation. ... of Ph.D. in Chemistry: 02.00.13 / Maslov Igor Aleksandrovich; [Place of defense: Russian State University of Oil and Gas named after I. M. Gubkin]. – Moscow, 2009. – Text: electronic. – URL: https://new-diss.ru/_avtoreferats/01004368701.pdf (accessed: 30.06.2025).

3. McConnachie M. Literature review of the catalytic pyrolysis of methane for hydrogen and carbon production / M. McConnachie, et al. – Text: electronic // International Journal of Hydrogen Energy. – V. 48, I. 66. – 2023. – pp. 25660–25682. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.123> (accessed: 12.06.2025).

4. Shokrollahi M. Methane pyrolysis as a potential game changer for hydrogen economy: Techno-economic assessment and GHG emissions / M. Shokrollahi, N. Teymouri et al. – Text: electronic // International Journal of Hydrogen Energy. – V. 66. – 2024. – pp. 337–353. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.056> (accessed: 12.06.2025).

5. Pushkarev A. I. Plasma chemical pyrolysis of methane in a bubbling reactor / A. I. Pushkarev, S. S. Polisadov, M. M. Anisimov, Y. Strukov. – Text: electronic // Hydrogen. Technologies. Future: collection of abstracts of II All-Russian conference with international participation, Tomsk, October 25–27, 2021. – Tomsk: TSU Publishing House, 2021. – p. 32. – URL: <https://earchive.tpu.ru/handle/11683/69227> (accessed: 17.06.2025).

6. Sapountzi F. M. Electrocatalysts for the generation of hydrogen, oxygen and synthesis gas / F. M. Sapountzi. – Text: electronic // Progress in Energy and Combustion Science. – V. 58, I. 23. – 2017. – pp. 1–35. – URL: https://www.researchgate.net/publication/308578569_Electrocatalysts_for_the_generation_of_hydrogen_oxygen_and_synthesis_gas (accessed: 17.06.2025).

7. Arsad S. R. Recent advancement in water electrolysis for hydrogen production: A comprehensive bibliometric analysis and technology updates / S. R. Arsad, A. Z. Arsad, et al. – Text: electronic // International Journal of Hydrogen Energy. – V. 60. – 2024. – pp. 780–801. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.184> (accessed: 09.06.2025).

8. Dermuhl S. A comparison of the most promising low-carbon hydrogen production technologies / S. Dermuhl, U. Riedel. – Text: electronic // Fuel. – V. 340. – 2023. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127478> (accessed: 14.06.2025).

9. Lee H. Outlook of industrial-scale green hydrogen production via a hybrid system of alkaline water electrolysis and energy storage system based on seasonal solar radiation / H. Lee, B. Choe, et al. – Text : electronic // Journal of Cleaner Production. – V. 337. – 2022. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134210> (accessed: 20.06.2025).

10. Lee B. Integrative techno-economic and environmental assessment for green H₂ production by alkaline water electrolysis based on experimental data / B. Lee, H.-S. Cho, et al. – Text: electronic // Journal of Environmental Chemical Engineering. – V. 9. – 2021. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106349> (accessed: 20.06.2025).

11. Fan J.-Li. A levelized cost of hydrogen (LCOH) comparison of coal-to-hydrogen with CCS and water electrolysis powered by renewable energy in China / J.-Li Fan, P. Yu, et al. – Text: electronic // Energy. – V. 242. – 2022. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.123003> (accessed: 20.06.2025).

12. Jang D. Techno-economic analysis and Monte Carlo simulation of green hydrogen production technology through various water electrolysis technologies / D. Jang, J. Kim et al. – Text: electronic // Energy Conversion and Management. – V. 258. – 2022. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115499> (accessed: 22.06.2025).

13. Nami H. Techno-economic analysis of current and emerging electrolysis technologies for green hydrogen production / H. Nami, O.B. Rizvandi et al. – Text: electronic // Energy Conversion and Management. – V. 269. – 2022. – URL: <https://doi.org/10.1016/j>

enconman.2022.116162 (accessed: 22.06.2025).

14. Matute G. Techno-economic model and feasibility assessment of green hydrogen projects based on electrolysis supplied by photovoltaic PPAs / G. Matute, J. M. Yusta, N. Naval. – Text: electronic // International Journal of Hydrogen Energy. – V. 48. – 2023. – pp. 5053–5068. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.035> (accessed: 22.06.2025).

15. Fernández G. Integrating hydrogen production and electricity markets: analytical insights from California / G. Fernández, O. José, et al. – Text: electronic // Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-6A40-80902, 2022. – URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/80902.pdf> (accessed: 18.06.2025).

16. Hill S. The cost of clean hydrogen from offshore wind and electrolysis / S. Hill, et al. – Text: electronic // Journal of Cleaner Production. – V. 445. – 2024. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141162> (accessed: 08.06.2025).

17. Shin H. Techno-economic evaluation of green hydrogen production with low-temperature water electrolysis technologies directly coupled with renewable power sources / H. Shin, D. Jang et al. – Text: electronic // Energy Conversion and Management. – V. 286. – 2022. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117083> (accessed: 12.06.2025).

18. Vives A. Techno-economic analysis of large-scale green hydrogen production and storage / A. Vives et al. – Text: electronic // Applied Energy. – V. 346. – 2023. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121333> (accessed: 12.06.2025).

19. Pratschner S. Off-grid vs. grid-based: Techno-economic assessment of a power-to-liquid plant combining solid-oxide electrolysis and Fischer-Tropsch synthesis / S. Pratschner et al. – Text: electronic // Chemical Engineering Journal. – V. 481. – 2024. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.148413> (accessed: 24.06.2025).

20. Kerscher F. Low-carbon hydrogen production via electron beam plasma methane pyrolysis: Techno-economic analysis and carbon footprint assessment / F. Kerscher, A. Stary et al. – Text: electronic // International Journal of Hydrogen Energy. – V. 46. – 2021. – pp. 19897–19912. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.114> (accessed: 24.06.2025).

Рукопись получена: 30.06.2025

Рукопись одобрена: 19.09.2025