

## ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ СТАТЬЯ

<https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2025-2-4>

УДК 332.12

JEL L94, O25

А. А. Двинанинов  

УрФУ имени первого президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация

## ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ КЛАСТЕРОВ РОССИЙСКОГО РЫНКА ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ<sup>1</sup>

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы трансформации энергетического рынка России в контексте распространения водородных энергетических технологий, а также основные тенденции его развития в период активной диверсификации топливно-энергетического комплекса РФ. Целью статьи является выработка концептуального представления об этапах формирования рынка водородной энергетики России с учетом региональных особенностей. Методологической базой исследования послужил системный подход, предполагающий прохождение трех этапов, на первом из которых осуществлены систематизация показателей глобального рынка водородных технологий, классификация его участников, выполнено уточнение понятийного аппарата; на втором этапе на основе анализа технико-экономических показателей способов получения водорода сделан вывод о целесообразности дальнейшего развития технологий получения «желтого» и «голубого» водорода как наименее затратных (от 1,45 до 4,7 долл. за кг) и обладающих необходимыми техническими и экологическими параметрами; сформулирована организационно-экономическая специфика формирования отечественного рынка водородной энергетики. На третьем этапе осуществлялся логико-структурный анализ факторов и перспектив развития рынка с учетом возможностей экспорта водорода в страны Азии. Показано, что, несмотря на прогнозные значения роста использования водорода в мире к 2050 г. до 528 млн т, в сравнении с потреблением природного газа (2,583 трлн т), говорить о полноценном переходе от углеводородной энергетики к водородной преждевременно. Обоснована необходимость совершенствования методического инструментария для оценки экономической эффективности водородных проектов. Полученные научные результаты выражены в организационно-методических рекомендациях по реализации восточного водородного кластера с образованием международных консорциумов, а также предложенного инструментария оценки экономической эффективности водородных проектов, представляющих интерес для бизнес-сообщества и органов государственной власти.

**Ключевые слова:** водородная энергетика, водородная экономика, энергетический рынок, альтернативная энергетика, экономическая эффективность, региональный кластер

**Для цитирования:** Двинанинов, А.А. (2025). Организационно-экономические аспекты формирования региональных кластеров российского рынка водородной энергетики. *Экономика региона*, 21(2), 301-317. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2025-2-4>

<sup>1</sup> © Двинанинов А. А. Текст. 2025.

## Organizational and Economic Aspects of Developing Regional Clusters in the Russian Hydrogen Market

**Abstract.** This article analyses the transformation of the Russian energy market amid the rise of hydrogen technologies, emphasizing key trends in the diversification of Russia's fuel and energy sector. It proposes a conceptual framework for the hydrogen market's development, focusing on regional differences. Using a three-stage systems approach, the study first systematizes global hydrogen market indicators and classifies participants. Next, it assesses hydrogen production methods, concluding that advancing "yellow" and "blue" hydrogen is economically viable due to their low costs (\$1.45–\$4.70/kg) and favourable technical and environmental traits. This stage also defines the organizational and economic features of Russia's domestic hydrogen market formation. The third stage comprises a logical and structural analysis of factors influencing market development, including opportunities for hydrogen export to Asian countries. It is shown that although global hydrogen consumption is expected to rise to 528 million tons by 2050, this volume remains small compared to natural gas consumption (2.583 trillion tons), indicating that a full transition from hydrocarbons to hydrogen energy is still premature. The article emphasizes the need to improve methods for assessing the economic efficiency of hydrogen projects and proposes organizational recommendations for creating an eastern hydrogen cluster through international consortia.

**Keywords:** hydrogen energy, hydrogen economy, energy market, alternative energy, economic efficiency, regional cluster

**For citation:** Dvinianinov, A. A. (2025). Organizational and Economic Aspects of Developing Regional Clusters in the Russian Hydrogen Market. *Ekonomika regiona / Economy of regions*, 21(2), 301–317. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2025-2-4>

### Введение

В Энергетической стратегии РФ до 2050 года<sup>1</sup> отдельное внимание уделено технологиям с минимальным углеродным следом, в том числе использованию водорода в качестве энергоносителя. На текущий момент основной объем потребления водорода приходится на химическую и нефтехимическую отрасли промышленности, а также металлургию, но уже в ближайшее десятилетие водород начнет постепенную экспансию на рынок энергоносителей и составит серьезную конкуренцию углеводородам, что позволит начать формирование так называемой «водородной энергетики» (Андриянов и др., 2021; Холкин, 2021; Zhiznin et al., 2020).

Водород, несомненно, имеет ряд энергетических и экологических преимуществ. Так, удельное содержание химической энергии на единицу массы у водорода в несколько раз превышает аналогичные значения для бензина или метана (120 МДж/кг, 43,6 МДж/кг и 50,1 МДж/кг соответственно). При сжигании водорода не образуется оксидов углерода, что минимизирует воздействие на окружающую среду — важный эффект в контексте де-

карбонизации топливно-энергетического комплекса (Родичкин, Карасевич, 2022). Однако для полноценного перехода к водородной энергетике необходимо решить целый комплекс проблем в сферах получения, хранения, транспортировки водорода и технологий его использования конечными потребителями<sup>2</sup>.

Сегодня известно свыше десятка различных способов получения водорода<sup>3</sup>, но при этом в экспертном сообществе до сих пор не сформировано единого мнения о технологии, обладающей наибольшим технико-экономическим потенциалом. Наименее проработанными являются вопросы, связанные с системами накопления и транспортировки водорода в промышленных масштабах, сложность создания которых в первую очередь обусловлена его взрывоопасностью и спецификой взаимодействия с металлами. Реализованные проекты, связанные с водородной энергетикой, представляют собой разрозненные локальные решения с жесткой привязкой к потребителю.

<sup>2</sup> Карпова, С. С., Компан, М. Е., Максимов, А. И., Мошников, В. А., Сапурина, И. Ю., Спивак, Ю. М., Теруков, Е. И., Терукова, Е. Е., Титков, А. Н., Томасов, А. А., Шилова, О. А., Шишов, М. А. (2010). *Основы водородной энергетики*. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 289.

<sup>3</sup> Уральский государственный университет им. А. М. Горького. (2008). УМКД «Материалы для водородной энергетики». Екатеринбург, 132.

<sup>1</sup> *Энергетическая стратегия России на период до 2050 года*. Официальный сайт Правительства Российской Федерации. <http://static.government.ru/media/files/LWYfSENa10uBrrBoyLQqAAOj5eJYlA60.pdf> (дата обращения: 21.05.2025).

Таблица 1

## Обобщение трактовок понятий «водородная энергетика» и «водородная экономика»

Table 1

## Comparison of interpretations of the concepts of “hydrogen energy” and “hydrogen economy”

| Термин                | Формулировка термина   |
|-----------------------|--|
| Водородная энергетика | Отрасль энергетики, основанная на использовании водорода в качестве средства для зарядки, транспортировки, производства и потребления энергии (Жук и др., 2021)  |
|                       | Значительное изменение сложившейся структуры топливно-энергетического комплекса, связанное с заменой углеродосодержащих энергоносителей (нефть, природный газ, уголь и продукты их переработки) на водород, получаемый из воды с использованием традиционных и возобновляемых источников энергии (ВИЭ) (Тарасов, Лотоцкий, 2006) |
|                       | Новая зарождающаяся отрасль мировой энергетики, основанная на использовании водорода в качестве средства для аккумуляции, транспортировки, производства и потребления энергии (Макарян, Седов, 2021а)  |
|                       | Новый технологический уклад, в котором водород играет роль накопителя энергии, энергоносителя и химического реагента в промышленности (Мастепанов, 2021)   |
| Водородная экономика  | Образ будущего, в котором регионы полностью уходят от «экономики углеводородов», применяя водород в качестве топлива для автомобилей, домов, электростанций (Гольцов и др., 2002; Митрова и др., 2019)   |
|                       | Структурное изменение глобальной экономической системы, вызванное полномасштабным переходом к водородной энергетике (Ren et al., 2020)   |

Источник: составлено автором.

Рассматривая водород в контексте его использования в энергетике, укрупненно принято рассматривать три принципиально разные с точки зрения технологических решений схемы: термоядерный синтез; топливные элементы; водород как энергоноситель. Далее в статье под «водородными технологиями» будет рассматриваться третья схема по причине все возрастающего интереса к альтернативным решениям замены традиционного углеводородного топлива при энергетическом переходе (Гительман, Кожевников, 2023).

Что касается терминов «водородная энергетика» и «водородная экономика», то они используются в науке и практике сравнительно недавно, поэтому вполне естественно, что в профессиональном сообществе единая строгая формулировка этих понятий отсутствует. Данный тезис можно продемонстрировать посредством систематизации их трактовок в различных исследованиях (табл. 1).

В результате обобщения приведенных понятий и экспертных мнений автором предлагаются следующие определения этих терминов: водородная экономика — это представление о глобальной экономике, где в качестве основного энергетического ресурса в топливно-энергетическом секторе, транспорте и промышленности используется водород; водородная энергетика — это сектор энергетики, базирующийся на технологиях использования водорода в качестве энергоносителя и включающий этапы его производства, транспортировки, хранения и потребления.

На основе анализа литературы, посвященной вопросам водородной энергетики (Жук и др., 2021; Полякова, 2012; Rosen & Koohi-Fayegh, 2016; Abe et al., 2019; Yue et al., 2021), можно заключить, что с позиций технологических решений степень изученности проблематики является высокой. Ключевым проблемным аспектом современных исследований в области водородных технологий становятся вопросы, связанные с обоснованием экономической целесообразности и формированием глобального и национальных рынков водорода<sup>1,2</sup>. В отличие от проектов традиционной энергетики, где разработаны и применяются показатели экономической и инвестиционной эффективности, такие как NPV, DPP, IRR и ряд других<sup>3</sup>, в случае с водородной энер-

<sup>1</sup> Глобальный спрос на водород с учетом технологии производства в сценарии чистого нуля, 2020–2030 гг. Официальный сайт Международного энергетического агентства (2021). <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-demand-by-production-technology-in-the-net-zero-scenario-2020-2030> (дата обращения: 20.05.2024).

<sup>2</sup> Конопляник, А. (2020). Чистый водород из природного газа. Корпоративный журнал «Газпром», (9), 20–29. <https://www.gazprom.ru/press/news/reports/2020/pure-hydrogen/> (дата обращения: 20.05.2024).

<sup>3</sup> Дубинин, С. К., Горюнов, П. В., Бусаров, В. Н., Горюнов, В. Н., Дьячков, А. Б., Ильюша, А. В., Горюнова, М. П., Кеткин, Л. А., Ковалев, А. С., Курабцев, А. Б., Лопаткина, Г. П., Панкратов, С. Н., Поздняков, Н. И., Поляшова, Е. В., Пустошилов, П. П., Дзюба, А. А. (2000). *Методические особенности оценки эффективности проектов в электроэнергетике*. Кн. 1. Москва: НЦПИ, 222.

гетикой таких закреплённых на официальном уровне метрик не существует. Предлагаемые подходы в оценке водородных проектов с позиций расчёта и сравнения показателей LCOH и LCOE с аналогичными показателями объектов традиционной энергетики не являются в полной мере объективными, т. к. не учитывают истощаемость углеводородных ресурсов, рост их стоимости в среднесрочной перспективе, удешевление водородных технологий при достижении «технологической зрелости» и ряда других.

В качестве объекта исследования в статье рассматривается сегмент формирующегося рынка водородной энергетики России в части технологий использования водорода как энергоносителя. Целью статьи является выработка концептуального представления об этапах формирования данного рынка с учётом региональных особенностей, включая обоснование подходов к оценке экономической эффективности соответствующих проектов. Задачами исследования являются:

1) обобщение теоретических данных о технико-экономической специфике использования водорода в качестве энергоносителя;

2) выявление основных тенденций, направлений и мероприятий, стимулирующих формирование отечественного рынка «водородных технологий»;

3) анализ сценариев его дальнейшего развития в сложившихся геополитических и экономических реалиях.

В свою очередь, гипотеза автора заключается в том, что формирование отечественного рынка водородной энергетики должно основываться на следующих ключевых положениях:

— по совокупности экономических и производственных факторов основным «товаром» является «голубой» водород;

— наиболее перспективными для отечественного рынка «товарами» являются «жёлтый» и «бирюзовый» водород;

— локализацию соответствующих производств целесообразно производить в дальневосточных регионах, выполняющих роль хабов для покрытия перспективного спроса в странах Азии;

— экономическая эффективность проектов водородной энергетики должна оцениваться на основе единого утверждённого государственными регуляторами подхода с использованием перечня метрик, учитывающих технико-экономическую специфику водородных проектов и региональных особенностей.

Прикладное значение исследования выражается в предложенной последовательности выполнения этапов реализации проекта по созданию альтернативного кластера водородных технологий в восточном направлении страны на примере Амурской области и их содержательном наполнении.

Научная новизна статьи заключается в выработке системного представления о формировании водородных кластеров и их экономической оценке в фазе становления рынка с учётом комплекса факторов различной природы и их междисциплинарных взаимосвязей.

### Материалы и методы

Материалами для проведения исследования послужили данные профильных, секторальных обзоров, статистические бюллетени, действующие отраслевые концепции и другие стратегические документы, а также экспертные оценки представителей академического и бизнес-сообщества. Были проведены секционные интервью с представителями следующих отраслевых предприятий и научных организаций: АО «Росатом», ПАО «Газпром», ПАО «Новатэк», ООО «ЗапСибНефтехим», АО ГНЦ «Центр Келдыша», Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Уральский энергетический институт и Институт экономики и управления Уральского федерального университета. Всего было опрошено 27 экспертов.

Методология исследования основывается на последовательном прохождении трёх этапов, первым из которых является литературный анализ отечественных и зарубежных публикаций, а также аналитических отчетов<sup>1,2</sup> (Жук и др., 2021; Литвиненко и др., 2020; Noyan et al., 2023; Sharma et al., 2020). Его результатом стали уточнения в понятийном аппарате, систематизация основных современных способов получения водорода, выделение основных преимуществ и недостатков каждого. Проанализированы основные технологические схемы получения водорода, обладающие наибольшим экономическим эффектом для отечественного энергетического рынка. По резуль-

<sup>1</sup> Аналитический доклад ИПЕМ (2022). Водород: формирование рынка и перспективы России. Институт проблем естественных монополий. <http://ipem.ru/content/vodorod-formirovanie-rynka-i-perspektivy-rossii/> (дата обращения: 28.05.2024).

<sup>2</sup> A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social committee and the committee of the regions. [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen\\_strategy.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf) (дата обращения: 28.05.2024).

татам проведенного анализа делается вывод об экономической и технологической зрелости «желтого» и «голубого» водорода как основного товара формирующегося рынка водородной энергетики в России.

На втором этапе рассматривались технологическая специфика и глобальные факторы, определяющие функционирование рынка водородной энергетики. Использовались экспертные оценки, материалы международных энергетических агентств, корпоративные аналитические отчеты<sup>1</sup>, статистические бюллетени<sup>2</sup> (Шафиев и др., 2020; Maghami et al., 2020).

Третий этап предполагал обобщение существующих экономических показателей для оценки эффективности водородных проектов и логико-структурный анализ факторов и перспектив развития создаваемой инфраструктуры в рамках этих проектов с целью последующего обсуждения и выработки методических рекомендаций для совершенствования дорожной карты водородной энергетики РФ<sup>3,4</sup>.

## Результаты

### *Технико-экономическая специфика использования водорода как энергоносителя*

В зависимости от первоначального источника существует градация водорода по цвету (Литвиненко, 2020).

«Серый» водород производится при риформинге метана с одновременным образованием оксидов углерода (углекислого и угарного газов). Если в последующем водород очищают от этих газов, то его называют «го-

лубым» (реже «синим»). «Коричневый» (или «черный») водород получается за счет газификации угля. «Бирюзовый» — путем пиролиза (термического разложения) метана (получающийся при этом углерод реализуется). «Зеленый» водород в основном получают электролизом воды с использованием электроэнергии, выработанной возобновляемыми источниками энергии, или при паровой конверсии биометана. «Желтый» водород также образуется при электролизе воды, но с использованием электроэнергии от атомных электростанций.

Наиболее экологичными и экономически эффективными способами получения водорода являются электролиз воды и паровая конверсия (риформинг) метана с последующей утилизацией оксидов углерода.

*Электролиз воды* является наиболее известным и изученным методом получения водорода. Доля этого способа в промышленных масштабах в зависимости от источников варьируется в пределах 1–4 %. Себестоимость полученного водорода оценивается в 4–15 долл. за кг (Шафиев и др., 2020). Согласно прогнозам, стоимость «желтого» водорода опустится до значений 2–2,5 долл. за кг, а стоимость «зеленого» водорода будет в интервале 3–6 долл. за кг к 2035 г.

*Паровая конверсия метана* — преобладающий в промышленности метод производства водорода. По данной технологической схеме производится до 50 % водорода в мире. Себестоимость водорода, получаемого этим способом, колеблется в интервале 1–3,2 долл. за 1 кг H<sub>2</sub>. Основным его недостатком является то, что в случаях, когда в последующем используется чистый водород, а не синтез-газ, возникает необходимость удалять из газовой смеси оксиды углерода (CO и CO<sub>2</sub>) и в дальнейшем утилизировать их, что добавляет порядка 20–40 % к себестоимости «голубого» водорода.

Другим перспективным методом получения водорода из природного газа является *пиролиз метана*<sup>5</sup>, подразумевающий термическое разложение этого газа без доступа кислорода. Себестоимость 1 кг H<sub>2</sub> при этом составляет 1,4–1,8 долл. Побочным продуктом этого метода является углерод, который может дополнительно реализовываться на рынке. Одним из недостатков технологии

<sup>1</sup> Митрова, Т., Мельников, Ю., Чугунов, Д. (2019). *Водородная экономика — путь к низкоуглеродному развитию*. Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО. [https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO\\_EneC\\_Hydrogen-economy\\_Rus.pdf](https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Hydrogen-economy_Rus.pdf) (дата обращения: 28.05.2024).

<sup>2</sup> *Ежегодный статистический бюллетень ОПЕК за 2022 г.* Официальный сайт Организации стран — экспортеров нефти. [https://asb.opec.org/ASB\\_Charts.html?chapter=1572](https://asb.opec.org/ASB_Charts.html?chapter=1572) (дата обращения: 28.05.2024).

<sup>3</sup> *План мероприятий «Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года»*. (2020). (Отменен в 2023 году). Официальный сайт Правительства РФ. <http://static.government.ru/media/files/7b9bstNfV640nCkAzCRJ9N8k7uhW8mY.pdf> (дата обращения 03.06.2024).

<sup>4</sup> *Правительство РФ, Росатом и «Газпром» подписали соглашение о сотрудничестве в сфере водородной энергетики*. Официальный сайт госкорпорации «Росатом». <https://www.rosatom.ru/journalist/news/pravitelstvo-rf-rosatom-i-gazprom-podpisali-soglashenie-o-sotrudnichestve-v-sfere-vodorodnoy-energet/> (дата обращения: 03.06.2024).

<sup>5</sup> *Плазменный пиролиз метана*. Официальный сайт государственного научного центра Российской Федерации «Исследовательский центр имени М. В. Келдыша». <https://keldysh-space.ru/nasha-deyatelnost/proizvodstvo/plazmennyy-piroliz-metana/> (дата обращения: 10.06.2024).

## Сравнение технико-экономических показателей различных типов водорода

Table 2

## Comparison of technical and economic indicators of various types of hydrogen

| Способ получения         | Тип водорода согласно «цветовой» градации | Энергозатраты на получение, кВт·ч/кг | Текущая стоимость получения водорода, долл. США/кг | Прогнозируемая стоимость получения водорода, долл. США/кг | Дополнительные затраты на утилизацию оксидов углерода | Достаточность изначальных ресурсов на отечественном рынке | Возможность промышленного масштабирования технологии | Возможность реализации побочного продукта |
|--------------------------|---|--------------------------------------|--|---|---|---|--|---|
| Электролиз воды          | «Зеленый» водород                         | 52-58,5                              | 4-15   | 3-6   | Отсутствуют   | Недостаточно  | Существует на практике                               | Существует                                |
|                          | «Желтый» водород                          |                                      | 4,7-3,2  | 2,9-2,3   | Отсутствуют   | Избыток   | Существует на практике                               | Существует                                |
| Паровая конверсия метана | «Серый» водород                           | 14                                   | 1-3,2  | Возможно удорожание                                       | Отсутствуют   | Достаточно  | Существует на практике                               | Отсутствует                               |
|                          | «Голубой» водород                         | 16-20                                | 1,45-2,4   | Существенно не изменится                                  | Существенные  | Достаточно  | Существует на практике                               | Частично                                  |
| Газификация угля         | «Бурый» водород                           | 54,5-95,5                            | 1,1-1,8  | Возможно удорожание                                       | Существенные  | Достаточно  | Существует на практике                               | Частично                                  |
| Пиролиз метана           | «Бирюзовый» водород                       | 15                                   | 1,4-1,8  | Существенно не изменится                                  | Незначительные  | Достаточно  | Существует в теории                                  | Существует                                |

Источник: составлено автором на основании (Дауди и др., 2021; Макарян, Седов, 2021а; Григорьев и др., 2008; Schneider et al., 2020; Pareek et al., 2020)

является отсутствие действующих образцов оборудования для промышленного получения водорода (Patlolla et al., 2023).

Как видно из таблицы 2, содержащей систематизацию ключевых характеристик указанных схем, наиболее перспективным для отечественного рынка по совокупности технических, экономических и экологических показателей различных способов получения является «голубой» водород<sup>1</sup>. Следом идет «желтый» водород. С учетом активно развивающейся атомной энергетики России, необходимости увеличения коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) АЭС, а также конечности углеводородного сырья, в отдаленной перспективе этот тип водорода может составить серьезную конкуренцию водороду, полученному методом риформинга метана. Одним из перспективных способов является плазменный пиролиз метана, но в ближайшее время из-за отсутствия возможности технического масштабирования полученный таким способом «бирюзовый» водород может использоваться только в локальных проектах, например, на водородных заправках.

### Перспективы российского водорода на глобальном рынке

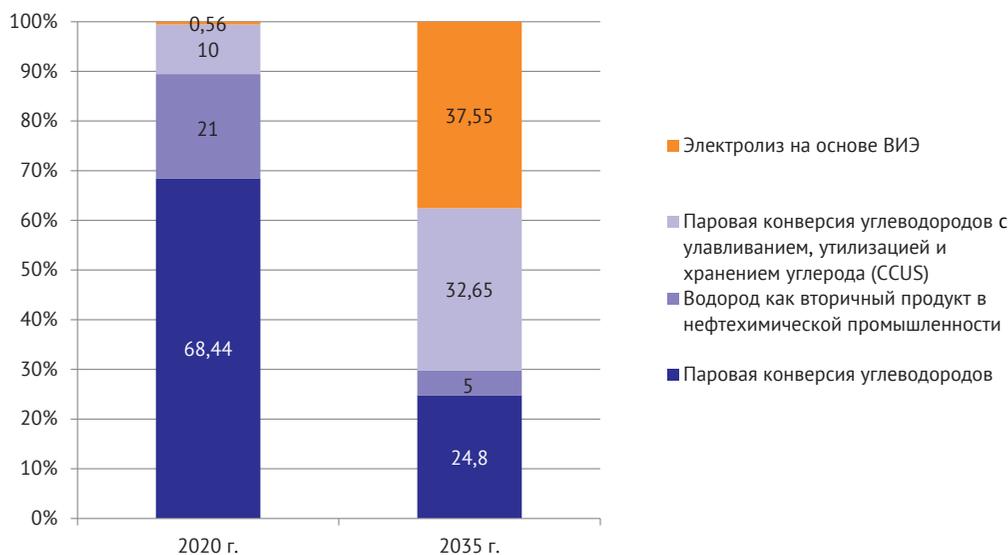
По итогам 2022 г. портфель водородных проектов в мире превысил 70 млн т в год, а сегмент рынка оборудования для производства и потребления водорода (электролизеры и топливные элементы) составил 5–7 млрд долл. Прогнозируется, что к 2030 г. объем глобального рынка низкоуглеродного водорода в денежном выражении достигнет значений 500–800 млрд долл. Отчетливо просматривается тенденция к росту производства водорода, так, в 2020 г. на глобальном рынке было произведено 90 млн т, в 2021 г. — 94 млн т, в 2022 г. — уже 98 млн т. До 2050 г., по данным Международного энергетического агентства (МЭА), мировой спрос на H<sub>2</sub> будет достигать 528 млн т<sup>2</sup>.

При этом изменятся и показатели мирового спроса на водород, полученный разными способами (рис. 1).

Следует акцентировать, что доля «зеленого» водорода кратно возрастет в ближайшие тридцать лет по причине запланированного увеличения ввода в эксплуатацию объектов ВИЭ и необходимости выравнивания зна-

<sup>1</sup> Радченко, Р. В., Мокрушин, А. С., Тюльпа, В. В. (2014). *Водород в энергетике*. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 229.

<sup>2</sup> *Деловой профиль (2023, 13 сентября)*. Водородная энергетика 2023: тренды и перспективы рынка чистой энергетики. <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/vodorodnaya-energetika-2023-trendy-i-perspektivy-rynka-chistoy-energetiki/> (дата обращения: 20.06.2024).



**Рис. 1.** Мировой спрос на водород, полученный разными способами в 2020 г., и прогнозируемые значения к 2035 г. (источник: Глобальный спрос на водород с учетом технологии производства в сценарии чистого нуля, 2020–2030 гг. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-demand-by-production-technology-in-the-net-zero-scenario-2020–2030> (дата обращения: 20.05.2024))

**Fig. 1.** Global demand for hydrogen produced by various methods in 2020 and projected values by 2035



**Рис. 2.** Структура мирового потребления водорода, % (источник: Аналитическое исследование. Развитие водородной энергетики в России (2021). Группа «ДЕЛОВОЙ ПРОФИЛЬ». [https://delprof.ru/upload/iblock/eef/DelProf\\_Analitika\\_Vodorodnaya-energetika.pdf](https://delprof.ru/upload/iblock/eef/DelProf_Analitika_Vodorodnaya-energetika.pdf) (дата обращения: 18.11.2024 г.))

**Fig. 2.** Structure of global hydrogen consumption, %

чения КИУМ для этих энергообъектов. Водород при этом будет использоваться как инструмент для накопления и последующей транспортировки энергии. Также кратно вырастет и производство «голубого» водорода, что обусловлено экологическими аспектами и декарбонизацией топливно-энергетического комплекса. Несмотря на приведенные данные по росту производства и использования водорода в глобальной энергетике в сравнении с общим объемом добычи природного газа в мире, который, согласно данным международной организации стран-экспортеров нефти (ОПЕК)<sup>1</sup> в 2023 г. со-

<sup>1</sup> Ежегодный статистический бюллетень за 2024 г. Официальный сайт Organization of the Petroleum Exporting Countries. <https://publications.opec.org/asb/chapter/show/123/2160/2163> (дата обращения: 20.06.2024).

ставил 4,283 трлн м<sup>3</sup> (2,655 трлн т), становится очевидным, что полностью заменить природный газ в качестве энергоносителя в среднесрочной перспективе не представляется возможным. Производство и потребление природного газа несоизмеримо больше, чем водорода, и будет оставаться таким даже к 2050 г., что в первую очередь связано с «вторичностью» водорода как энергоносителя (Дегтярев, Березкин, 2021).

Сегодня основными потребителями этого газа являются химическая и нефтехимическая промышленность (рис. 2), где он используется для производства других соединений (полимеры, аммиак, этанол и пр.), а также в процессах нефтеочистки. В энергетике водород используется в основном для технологических

Таблица 3

Страны-экспортеры, импортеры, а также с балансом в производстве и потреблении водорода

Table 3

Exporters, importers, and countries with a balance in the production and consumption of hydrogen

| Страна   | Пояснения   |
|--|---|
| <i>Страны-импортеры водорода</i>                               |   |
| Европейский союз   | Водородная стратегия принята в 2020 г. Необходимые капиталовложения: 180-470 млрд евро до 2050 г.   |
| Германия   | Водородная стратегия принята в 2020 г. Потребность к 2040 г. — 1,9-2,5 млн т. Необходимые капиталовложения: 12,5 млрд евро до 2026 г.         |
| Япония   | Водородная стратегия принята в 2017 г. Потребность к 2050 г. — 5-10 млн т. Необходимые капиталовложения: 16,6 млрд евро до 2030 г.            |
| Южная Корея  | Водородная стратегия принята в 2019 г. Потребность к 2050 г. — 5,26 млн т.  |
| <i>Страны-экспортеры водорода</i>                              |   |
| Австралия  | Водородная стратегия принята в 2019 г. Экспортные возможности к 2050 г. — 6,75 млн т.   |
| Чили   | Водородная стратегия принята в 2020 г. Экспортные возможности к 2050 г. — 24 млн т.   |
| Россия   | Водородная стратегия принята в 2021 г. Экспортные возможности к 2050 г. — 11,9 млн т. в базовом сценарии и 30 млн тонн в ускоренном сценарии. |
| Норвегия   | Водородная стратегия принята в 2021 г.  |
| <i>Страны с балансом в производстве и потреблении водорода</i> |   |
| Великобритания   | Водородная стратегия принята в 2021 г. Планируемые инвестиции — 2,1 млрд фунтов стерлингов.   |
| Китай  | Водородная стратегия принята в 2022 г. Производство водорода на уровне 0,2 млн т/год к 2025 г.  |

Источник: составлено автором на основе данных Института естественных монополий.

Примечание: Аналитический доклад ИПЕМ. Водород: формирование рынка и перспективы России (2022) // Институт проблем естественных монополий. <http://ipem.ru/content/vodorod-formirovanie-rynka-i-perspektivy-rossii/> (дата обращения: 20.06.2024).

нужд, например, при охлаждении турбогенераторов. Доля его использования составляет всего 1–2 % от общего объема.

Этот аспект является ключевым в определении формирования глобального энергетического рынка производства и потребления водорода: несмотря на всё возрастающий спрос, самого рынка как такового не существует, как в мире, так и в России.

Глобальный рынок водородных технологий тесно взаимосвязан с процессами становления национальных рынков, создающих спрос и предложение. Участников рынка условно можно разделить на три ключевые группы: экспортеры, импортеры, а также страны с балансом в производстве и потреблении водорода (табл. 3).

Исходя из данных таблицы 3, Россия относится к странам-возможным экспортерам водорода. В 2023 г. в РФ было произведено 2,393 млрд м<sup>3</sup> водорода, что на 1,4 % выше в сравнении с показателем 2022 г. За 2017–2023 гг. среднегодовой прирост производства составил 12,8 %. Данные объемы относятся в основном к внутреннему потреблению этого газа в традиционных сферах его использования. Для масштабного перехода к использованию водорода в качестве энергоносителя требуется кратное увеличение объемов его производства, что не-

возможно осуществить только за счет внутреннего потенциала. Следовательно, на текущем этапе становления отечественного рынка водородной энергетики следует рассматривать сценарий увеличения экспортоориентированных проектов в соответствующих регионах страны. Сегодня в связи со складывающейся конъюнктурой рынка и геополитической спецификой такими регионами, в первую очередь, представляются территории Дальневосточного федерального округа.

#### **Формирование региональных рынков водородных технологий в РФ**

Первоначальными планами по формированию отечественного рынка водородных технологий было предусмотрено создание трех основных кластеров с ориентацией на внутренний и внешние рынки<sup>1</sup>: Восточный, ориентированный на рынок азиатских стран и регионы Дальнего Востока; Северо-Западный с фокусом на экспорт водорода в европейские страны; Арктический. Также рассматривались инициативы по формированию Южного кластера

<sup>1</sup> Водородная концепция России (2021). *Общественно-деловой научный журнал «Энергетическая политика»*. <https://energypolicy.ru/vodorodnaya-konceptciya-rossii/novosti/2021/18/13/> (дата обращения: 17.09.2024).

с ориентацией на рынки Ближнего Востока и юга Европы.

Под кластером в данном случае понимается консорциум игроков рынка, сконцентрированных на определенной территории, включающий предприятия и инжиниринговые компании, специализирующиеся на разработках и апробации технологических решений, циклах производства и транспортировки, а также использовании водорода. Одновременно с этим понятием распространен термин «водородная долина»<sup>1</sup>, который несет схожую смысловую нагрузку.

При последующей трансформации вышеописанных планов Министерство энергетики конкретизировало перечень территорий для развития водородной энергетики: Восточная Сибирь, Сахалин, Северо-Запад, Якутия и Ямал. Осенью 2021 г. Минпромторг РФ опубликовал «Атлас российских проектов по производству низкоуглеродного и безуглеродного водорода и аммиака»<sup>2</sup>, в котором рассмотрен 41 объект производства этих газов, находящиеся в разных стадиях готовности, на территории нашей страны. С 2022 г. основная часть планов заморожена; реализацию продолжает фактически только Восточный водородный кластер с центром на Сахалине<sup>3</sup>. Основными партнерами данного консорциума являются госкорпорации «Росатом» и «Газпром», Правительство Сахалинской области, Сахалинский государственный университет (СахГУ). Среди декларируемых целей при формировании этого кластера следует выделить:

— возведение производственного комплекса для получения водорода на основе технологий паровой конверсии метана с улавливанием и захоронением CO<sub>2</sub> (планируемая мощность завода до 100 тыс. т);

<sup>1</sup> *Российские университеты объединились в Технологическую водородную долину*. РБК+. (2020, 17 декабря). <https://plus.rbc.ru/pressrelease/5fd1f5897a8aa92debd40027> (дата обращения: 25.09.2024).

<sup>2</sup> *Атлас российских проектов по производству низкоуглеродного и безуглеродного водорода и аммиака* Официальный сайт Минпромторга РФ. <https://minpromtorg.gov.ru/storage/797ced43-043d-4b4e-b72b-3d36984adb7/documents/663f0df0-8439-4152-a8ea-2c4d0d36ffe4/008cee19-8ce0-4107-9013-74288ef21298.pdf> (дата обращения: 25.09.2024).

<sup>3</sup> Пресс-служба АО РАОС (2023, 11 сентября). *Росатом, Правительство Сахалинской области и Сахалинский государственный университет развивают сотрудничество по проекту «Восточный водородный кластер»*. Официальный сайт АО «Росатом Оверсиз». <https://rosatom-overseas.com/ru/media/news/rosatom-pravitelstvo-sakhalinskoy-oblasti-i-sakhalinskiy-gosudarstvennyy-universitet-razvivayut-sotr.html> (дата обращения: 25.09.2024).

— создание транспортной инфраструктуры: железнодорожный транспорт (проект водородного поезда совместно с ОАО «РЖД» и АО «Трансмашхолдинг»), автомобильный («водоробусы» и автомобили на водородных топливных элементах при участии Группы «ГАЗ», АО «Урал»), заправочные комплексы;

— открытие водородного полигона, базирующегося на территории Специального конструкторского бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения РАН, для апробации существующих решений и технологий и их последующего масштабирования на Дальнем Востоке и в других регионах РФ;

— поставка водорода в качестве перспективного ракетного топлива для ракет семейства «Ангара» на космодром Восточный;

— подготовка специалистов и формирование кадрового резерва для сектора водородной энергетики на базе СахГУ при поддержке Московского государственного технического университета.

Таким образом, несмотря на сворачивание ряда проектов и планов по формированию отечественного сектора водородной энергетики, часть из них все же реализуется. Это свидетельствует о том, что ключевые предприятия сектора, научно-исследовательские институты, профильные министерства обладают стратегическим видением формирующейся модели рынка, которое также переключается с авторским и базируется на следующих положениях.

1. Основное производство «зеленого» и «желтого» водорода методом электролиза воды ложится на госкорпорации «Росатом» и «Русгидро». За счет этого увеличивается продолжительность времени использования установленной мощности атомных (АЭС) и гидроэлектростанций (ГЭС), а также ВИЭ.

2. Ответственными за получение водорода по технологиям парового риформинга метана становятся ПАО «Газпром» и ПАО «НОВАТЭК», привлекающие и другие разнообразные компании, холдинги и агентства.

3. «Газпрому» также должна отводиться и роль основного экспортера водорода. Таким образом, находящиеся в зоне его ответственности вопросы транспортировки должны учитывать возможную модернизацию существующей газотранспортной системы для поставок метан-водородных смесей и чистого водорода.

Можно сделать вывод о том, что трансформация планов развития водородных проек-

тов РФ напрямую коррелирует с возможными рынками сбыта. Следовательно, ключевыми регионами, в которых сегодня целесообразно развивать данные проекты, являются регионы Дальнего Востока, граничащие со странами — возможными импортерами водорода, в том числе с Китаем.

### **Методический подход к оценке экономической эффективности проектов водородной энергетики**

В шестом разделе Концепции развития водородной энергетики дается разъяснение, что формирование рынка в РФ должно осуществляться в три этапа: до 2024, 2035 и 2050 годов — при этом в концепции отсутствует какая-либо методология оценки экономической эффективности водородных проектов и фигурируют только конечные прогнозируемые значения количества произведенного водорода.

В этой связи требуется комплексный подход с выработкой новых метрик, учитывающих специфику производства, хранения, транспортировки и потребления водорода, а также факторов, связанных с планами декарбонизации энергетики. Существующие разрозненные исследования в этом направлении предлагают осуществлять расчеты с помощью уже апробированных для объектов традиционной энергетики показателей с их последующим сравнением. Очевидно, что такой подход будет иметь прогнозируемый отрицательный результат в связи с «вторичностью» использования водорода в качестве энергоносителя. В то же время, уже используемые метрики и классические схемы оценки экономической эффективности в топливно-энергетическом комплексе базируются на количественном анализе затрат и выгод. На текущем этапе развития рынка водородных технологий корректное проведение такого анализа фактически не осуществимо, т. к. масштабы и темпы развития не поддаются оценке, а существующие прогнозы пересматриваются от года к году. В качестве примера преодоления такого рода подходов может служить специально разработанная Агентством энергетической информации Министерства энергетики США методика LACE (levelized avoided cost of electricity / оценка нормированных альтернативных затрат) для обоснования инвестиций в энергообъекты с участием ВИЭ (Черняховская, 2016).

На основании обобщения литературных публикаций (Макарян, Седов, 2021б; Henry et al., 2023; Penev et al., 2018) и экспертных мнений (специалистов топливно-энергетического ком-

плекса, сотрудников профильных научно-исследовательских институтов и преподавателей вузов) автором сформирован комплекс индикаторов для оценки экономической эффективности проектов водородной энергетики (табл. 4).

Стоит отметить, что в действующих технико-экономических моделях глобального и национальных энергетических рынков существуют разделы, прогнозирующие производство и потребление водорода, но используемые в них методики расчетов носят закрытый характер. В свою очередь, разработанные Министерством энергетики США и Национальной лабораторией по изучению возобновляемой энергетики модели H2A, H2FAST, HDSAM, позволяющие осуществлять финансово-экономический анализ и расчеты затрат на производство и доставку водорода в течение всего жизненного цикла, были рассчитаны для внутреннего рынка США. Использование этих метрик для отечественных проектов представляется весьма затруднительным. Ключевыми причинами этого являются специфика российского энергорынка и продолжающие действовать, а также вновь вводимые ограничения на сотрудничество в различных сферах, в том числе и энергетики. Для полноценного обсуждения дальнейших перспектив развития рынка водородных технологий требуется разработка и утверждение на официальном уровне соответствующей методологии применительно к проектам водородной энергетики России.

### **Дискуссия**

В «водородном» разделе Энергостратегии РФ до 2050 г. контрольные показатели нацелены на экспортную модель производства водорода, при этом большинство экспертов сходились во мнении, что Россия должна была стать основным экспортером водорода в Европейский Союз (Белов, 2020).

Однако из первоначально запланированных в Концепции четырех водородных кластеров на территории РФ сегодня реализуется только один — в восточной части страны с центром на о. Сахалин<sup>1</sup>. Данное направление еще раз подчеркивает ориентированную на экспорт модель отечественного рынка водородных технологий, но уже в страны Азии: Китай, Япония,

<sup>1</sup> Паршинова, П. (2023, 27 сентября). Водородный завод мощностью 30 тыс. т планируется ввести в эксплуатацию на Сахалине в 2026 г. Официальный сайт ИА Neftegaz. RU. <https://neftegaz.ru/news/dekarbonizatsiya/795638-vodorodnyy-zavod-moshchnostyu-30-tys-t-planiruetsya-vvesti-v-ekspluatatsiyu-v-2026-g-na-sakhaline/> (дата обращения: 08.07.2024).

Таблица 4

Классификация существующих экономических показателей для возможной оценки экономической эффективности проектов водородной энергетики

Table 4

Classification of economic metrics for hydrogen energy project assessment

| Классические показатели для инвестиций в объекты энергетики         | Дополнительные показатели для оценки стоимости проектов и структуры затрат                                       | Специфические индикаторы, применяемые в конкретных технологиях и/или проектах           |
|---|--|---|
| NPV – Net Present Value (чистая приведенная стоимость)              | LCOE – Levelized Cost of Energy (нормированная стоимость электроэнергии в привязке к углеродному следу)          | Специфика регионов и территорий опережающего развития в области инвестирования проектов |
| BCR – Benefit-Cost Ratio (соотношение выгод и затрат)               | FLCOH – Full Levelized Cost of Hydrogen (полная приведенная стоимость водорода)                                  | Показатели экономической активности и развития региона                                  |
| DPP – Discounted Payback Period (дисконтированный срок окупаемости) | LACE – levelized avoided cost of electricity (оценка нормированных альтернативных затрат)                        | Соотношение объемов эмиссии парниковых газов, в том числе CO <sub>2</sub>               |
| IRR – Internal Rate of Return (внутренняя норма доходности)         | LCA – Life-Cycle Assessment (оценка жизненного цикла)  | Климатические и географические особенности  |
| ROI – Return on Investment (коэффициент возврата инвестиций)        | Функция издержек с учетом сезонности   |   |
|   | H2FAST – Hydrogen Financial Analysis Scenario Tool (Модель финансово-экономического анализа водородных проектов) |   |
|   | HDSAM – Hydrogen Delivery Scenario Analysis Model (Модель анализа сценария доставки водорода)                    |   |

Источник: составлено автором на основании (Веселов, Соляник, 2022; Чеботарева, Двинянинов, 2021; Макарян, Седов, 2021).

Южная Корея. При этом, несмотря на имеющееся технико-экономическое обоснование проекта, остаются неразрешенными вопросы, связанные с возможным отказом вышеуказанных стран от сотрудничества по политическим или иным причинам. Не стоит забывать и о том, что если в случаях с природным газом наша страна обладает собственными технологиями и компетенциями, материальной базой и оборудованием, а глобальный рынок позволяет перенаправлять объемы в другие страны, то в случае с водородом такого рынка нет, как нет и связанных с ним технологий морских перевозок и хранения больших объемов водорода.

Косвенно положение гипотезы о необходимости выработки единого подхода к анализу экономической эффективности водородных проектов на федеральном уровне с соотношением технико-экономических возможностей регионов России подтверждается и тем фактом, что развитие данных проектов не находит своего продолжения в европейской части страны. Так, ключевым тезисом при заморозке планов о создании водородных кластеров в центральных, западных и юго-западных регионах стал отказ от сотрудничества со стороны ряда стран Европейского союза в ча-

сти поставок энергоносителей. При этом потенциал этих регионов в части формирования внутреннего рынка водорода, расположение в них большинства научных и проектных организаций, занятых в водородных проектах, концентрация объектов атомной энергетики, действующих в производстве «желтого» водорода, не являются достаточными условиями для формирования соответствующих консорциумов. Какие-либо экономические оценки несостоятельности данных регионов в формировании рынка водорода в открытых источниках отсутствуют.

Если рассматривать восточное направление развития водородных проектов, то, по мнению автора, Амурская область, расположенная на Дальнем Востоке России, обладает наибольшим потенциалом для создания водородной долины и сможет стать отправной точкой для экспорта водорода в страны Азии, в первую очередь в Китай (Aditiya & Aziz, 2021). Регион обладает протяженной границей с Китаем и уже действующими контрольно-пропускными пунктами грузового и грузопассажирского сообщения, с единственным в Дальневосточном федеральном округе газопроводом «Сила Сибири». При условии ис-

пользования данной газотранспортной инфраструктуры уже сегодня возникает возможность поставок метано-водородной смеси<sup>1</sup> в КНР, при этом наиболее целесообразно производство водорода за счет конверсии метана на мощностях уже существующего предприятия, к примеру, на мощностях Амурского газоперерабатывающего завода<sup>2</sup>.

Реализацию данной стратегической альтернативы и ее основных этапов схематично можно представить в виде блок-схемы (рис. 3). Схема составлена с учетом мнений представителей бизнес-сообщества и научной среды с фокусировкой на ключевых аспектах, оказывающих первостепенное влияние на зарождающийся рынок, а также с учетом реалий в данном секторе экономики.

Не стоит забывать и про внутренний рынок потребления водорода, который в случае реализации текущей инициативы возрастет более чем в 17 раз, если сравнивать в подушевом выражении Сахалинскую область и материковую часть Дальнего Востока. Следует упомянуть и про существенную близость одного из перспективных потребителей водорода в качестве ракетного топлива — космодрома «Восточный», а также возможности поставок сжиженного водорода по уже существующим транспортным коридорам в другие регионы страны.

Также необходимо учитывать, что, используя уже отработанные логистические решения и транспортную инфраструктуру, возможно повышение инвестиционной привлекательности за счет существенного снижения соответствующих затрат (Романова, 2018). Важными остаются и планы ПАО «Газпром» по освоению газовых ресурсов и формированию газотранспортной системы на Востоке России<sup>3</sup>, которая расширит экспортные возможности существующей инфраструктуры и увеличит внутренний потенциал сбыта. В контексте прогнозиру-

емого перехода с метана на метано-водородные смеси и последующей полной заменой его на чистый водород наличие полноценной газотранспортной системы является решающим фактором для развития водородных проектов на этом направлении страны.

Реализация такого масштабного проекта в области переработки природного газа в совокупности с перспективой создания разветвленной газотранспортной сети как внутри страны, так и за ее пределами не имеет аналогов в истории российской газовой отрасли. Целесообразной выглядит организация консорциумов с ведущими странами региона.

Для того, чтобы действительно начать переход к водородной энергетике и последующему формированию водородной экономики, уже сейчас требуется одновременная проработка следующих вопросов:

1. Утверждение методологии оценки экономической эффективности проектов производства, транспортировки и потребления водорода, учитывающей долгосрочные планы по декарбонизации энергетике.

2. Внедрение технологических решений на базе экспериментальных производств и локальной газотранспортной инфраструктуры с подтвержденной соответствующей экспертизой технической и экологической безопасности этих объектов.

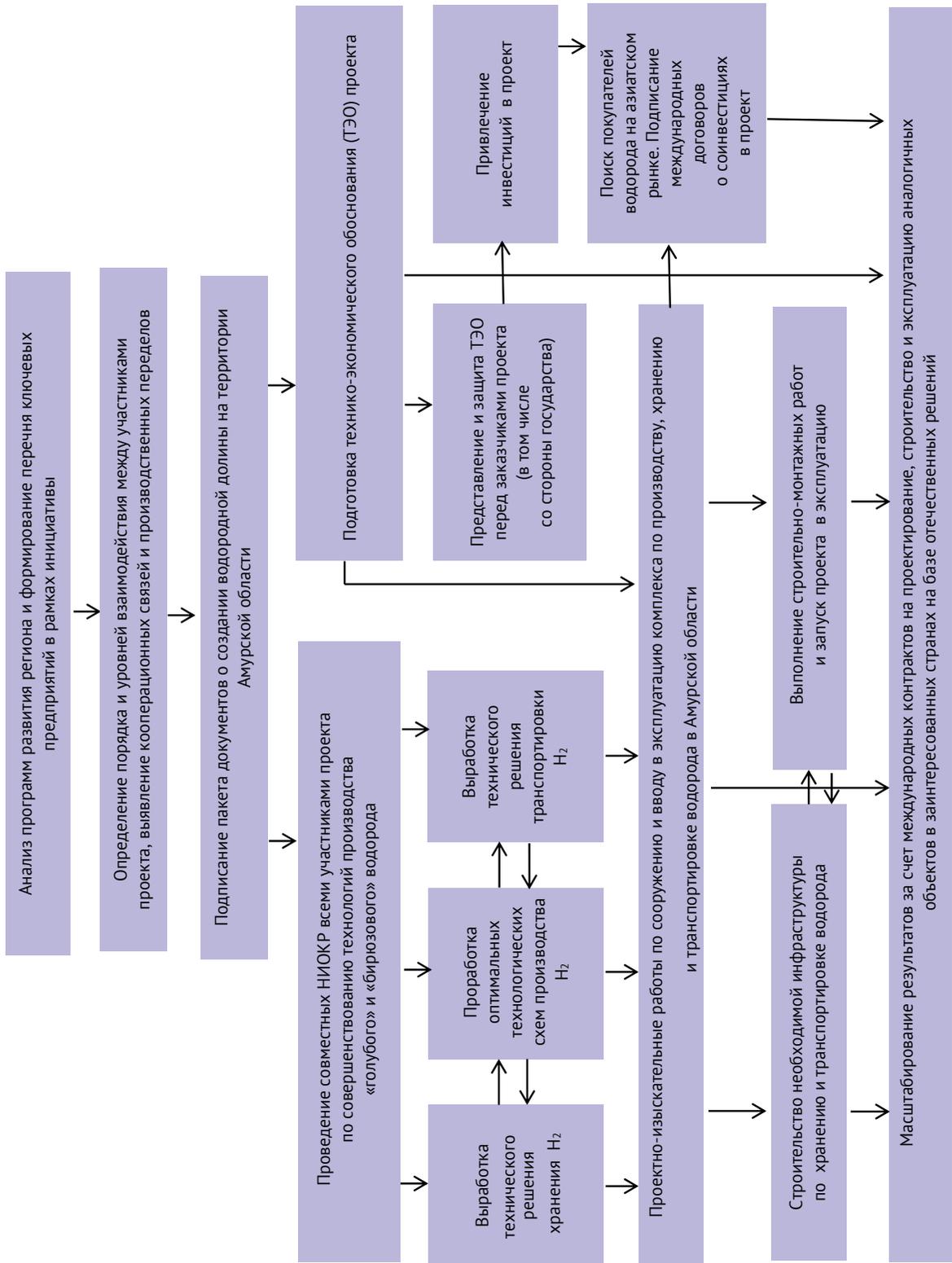
3. Выработка механизмов межгосударственной кооперации между заинтересованными в этом участниками для реализации произведенного внутри страны водорода, а также последующего вывода апробированных технологий его производства на внешние рынки (Дмитриевский и др., 2014; Жданев, 2022).

Следует учитывать, что развитие рынка водородной энергетике не будет происходить одномоментно, оно во многом зависит от спроса, который должен быть высоким и устойчивым. Согласно предлагаемой инициативе, первый этап развития рынка нацелен на покрытие весьма высокого спроса со стороны дружественных азиатских стран. В свою очередь, это позволит в краткосрочной перспективе привлечь инвестиции в проекты водородной энергетике в этом регионе. На втором этапе аккумулированные финансовые средства и рост технических компетенций позволят сформировать устойчивый спрос на рынке Дальнего Востока. На третьем этапе возможно масштабирование полученных результатов для формирования полноценного национального рынка водородной энергетике.

<sup>1</sup> Рыбаков, Б. А., Савитенко, М. А. (б. г.). *Сжигание водородсодержащего газа в водородных и паровых котлах*. Официальный сайт АНО «Центр исследований и научных разработок в области энергетике «Водородные технологические решения». <https://ww-h2.com/services/combustion-of-hydrogen-containing-gas-in-hydrogen-and-steam-boilers/> (дата обращения: 20.01.2025).

<sup>2</sup> Ланг, М., Шмид, Ф., Бауэр, Х. (2019). Техническая концепция и практическая реализация проекта амурского газоперерабатывающего завода. *Газовая промышленность*, (3(781)), 70. <https://neftegas.info/gasindustry/-03-2019/tekhnicheskaya-kontseptsiya-i-prakticheskaya-realizatsiya-proekta-amurskogo-gazoperegabatyvayushcheg/> (дата обращения: 11.07.2024).

<sup>3</sup> *Газопровод «Сила Сибири»*. Официальный сайт ПАО «Газпром». <https://www.gazprom.ru/projects/power-of-siberia/> (дата обращения: 20.01.2025).



**Рис. 3.** Этапы реализации стратегической альтернативы «Водородная долина в Амурской области» (источник: составлено автором)  
**Fig. 3.** Stages of implementation of the strategic alternative "Hydrogen Valley in the Amur Oblast"

### Выводы

В ходе проведенного исследования было определено, что, несмотря на сложившиеся предпосылки для формирования рынка водородных технологий в РФ, самого рынка пока не существует. Большинство экспертов сходятся во мнении, что этот рынок будет сформирован не раньше середины 2030-х гг., а по ряду консервативных оценок — только к середине этого столетия.

В сложившейся конъюнктуре у России появился уникальный шанс не только перераспределить поставки природного газа, но и, создавая новую газотранспортную систему на восточном направлении нашей страны, сразу предусмотреть необходимую инфраструктуру для последующего перехода к водородной энергетике и запустить процесс формирования внутреннего рынка производства и использования водорода.

В рамках проведенной работы на основе обобщения формулировок в различных источниках был уточнен понятийный аппарат и даны определения «водородная энергетика» и «водородная экономика». Предложен комплекс индикаторов для возможной оценки

экономической эффективности проектов водородной энергетики. Представлена авторская модель поэтапного формирования альтернативного кластера водородных технологий («водородной долины») на Дальнем Востоке РФ с возможностью локализации на мощностях Амурского газоперерабатывающего завода. Практическую значимость данное исследование может представлять для профильных министерств при внесении корректировок в существующие и разрабатываемые нормативные документы, связанные с формированием рынка водородных технологий в РФ.

Для России развитие водородной энергетики, базирующейся на отечественных решениях и компонентной базе, приобретает особую значимость в текущих геополитических условиях. В случае продолжения сворачивания экономического и технологического сотрудничества со странами — мировыми лидерами в этих технологиях и без развития собственной индустрии мы можем оказаться в ситуации полной зависимости от иностранных решений, и тогда при формировании глобального рынка нашей стране будет отводиться лишь роль поставщика сырья.

### Список источников

- Андриянов, Н. И., Засько, М. П., Долгова, В. Н. (2021). Оценка текущего состояния водородной энергетики в России. *Инноватика и экспертиза: научные труды*, (2(32)), 134–150. <https://doi.org/10.35264/1996-2274-2021-2-134-150>
- Белов, В. Б. (2020). Новые водородные стратегии ФРГ и ЕС: перспективы кооперации с Россией. *Современная Европа*, (5), 65–76. <http://dx.doi.org/10.15211/soveurope520206576>
- Веселов, Ф., Соляник, А. (2022). Экономика производства водорода с учетом экспорта и российского рынка. *Энергетическая политика*, (4(170)), 60–64. [https://doi.org/10.46920/2409-5516\\_2022\\_4170\\_58](https://doi.org/10.46920/2409-5516_2022_4170_58)
- Гительман, Л. Д., Кожевников, М. В. (2023). Концептуальное представление энергетического перехода в электроэнергетике региона в новых реалиях. *Экономика региона*, 19(3), 844–859. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2023-3-17>
- Гольцов, В. А., Везироглу, Т. Н., Гольцова, Л. Ф. (2002). От водородной экономики к водородной цивилизации: планетарные и региональные аспекты трансформации. *Альтернативная энергетика и экология*, (4), 9–10.
- Григорьев, С. А., Порембский, В. И., Фатеев, В. Н., Самсонов, Р. О., Козлов, С. И. (2008). Получение водорода электролизом воды: современное состояние, проблемы и перспективы. *Транспорт на альтернативном топливе*, (3(3)), 62–69.
- Дауди, Д., Рожнятовский, Г., Ишмурзин, А., Кодряну, Н., Попадько, Н. (2021). Перспективы «голубого» водорода в России. *Энергетическая политика*, (3(157)), 34–43. [https://doi.org/10.46920/2409-5516\\_2021\\_3157\\_34](https://doi.org/10.46920/2409-5516_2021_3157_34)
- Дегтярев, К. С., Березкин, М. Ю. (2021). О проблемах водородной экономики. *Окружающая среда и энергетика*, (1). <https://doi.org/10.5281/zenodo.4662942>
- Дмитриевский, А. Н., Мастепанов, А. М., Бушуев, В. В. (2014). Ресурсно-инновационная стратегия развития экономики России. *Вестник Российской академии наук*, 84(10), 867–873. <https://doi.org/10.7868/S0869587314100077>
- Жданев, О. В. (2022). Оценка уровня локализации продукции при импортозамещении в отраслях ТЭК. *Экономика региона*, 18(3), 770–786. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2022-3-11>
- Жук, А., Новиков, Н., Новиков, А., Фролов, В. (2021). Водородные и алюмоводородные накопители в электроэнергетике. *Энергетическая политика*, (5(159)), 64–79. [https://doi.org/10.46920/2409-5516\\_2021\\_5159\\_64](https://doi.org/10.46920/2409-5516_2021_5159_64)
- Литвиненко, В. С., Цветков, П. С., Двойников, М. В., Буслаев, Г. В. (2020). Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики. *Записки Горного института*, 244, 428–438. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.5>
- Макарян, И. А., Седов, И. В. (2021a). Оценка экономической эффективности масштабов получения водорода различными методами. *Российский химический журнал*, 65(1), 62–76. <https://doi.org/10.6060/rcj.2021651.7>
- Макарян, И. А., Седов, И. В. (2021b). Состояние и перспективы развития мировой водородной энергетики. *Российский химический журнал*, 65(2), 3–21. <https://doi.org/10.6060/rcj.2021652.1>

- Мастепанов, А. М. (2020). Водородная энергетика России: состояние и перспективы. *Энергетическая политика*, 12(154), 54–65. [https://doi.org/10.46920/2409-5516\\_2020\\_12154\\_54](https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_12154_54)
- Полякова, Т. В., (2012). Состояние и перспективы развития водородной энергетики. *Вестник МГИМО-Университета*, 1(22), 156–164. <https://doi.org/10.24833/2071-8160-2012-1-22-156-164>
- Родичкин, И. Г., Карасевич, В. А. (2022). Водородная экономика как драйвер энергетического перехода. *Экономические и социальные проблемы России*, 1(1), 26–45.
- Романова, О. А. (2018). Приоритеты промышленной политики России в контексте вызовов четвертой промышленной революции. Ч. 2. *Экономика региона*, 14(3), 806–819. <https://doi.org/10.17059/2018-3-9>
- Тарасов, Б. П., Лотоцкий, М. В. (2006). Водородная энергетика: прошлое, настоящее, виды на будущее. *Российский химический журнал*, 50(6), 5–18.
- Холкин, Д. (2021). Национальная водородная стратегия в контексте энергетического перехода. *Ежемесячное информационно-аналитическое издание Нефтегаз. Дайджест*, 20(27), 10.
- Чеботарева, Г. С., Двинанинов, А. А. (2021). Экономическая альтернатива замены централизованного газоснабжения автономными биогазовыми установками в городах России. *Journal of Applied Economic Research*, 20(3), 582–612. <https://doi.org/10.15826/vestnik.2021.20.3.023>
- Черняховская, Ю. В. (2016). Эволюция методологических подходов к оценке стоимости электроэнергии. Анализ зарубежного опыта. *Вестник ИГЭУ*, (4), 56–58. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2016.4.056-068>
- Шафиев, Д. Р., Трапезников, А. Н., Хохонов, А. А., Агарков, Д. А., Бредихин, С. И., Чичиров, А. А., Субчева, Е. Н. (2020). Методы получения водорода в промышленном масштабе. Сравнительный анализ. *Успехи в химии и химической технологии*, 34 (12), 53–57.
- Abe, J. O., Popoola, A. P. I., Ajenifuja, E., & Popoola, O. M. (2019). Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. *International journal of hydrogen energy*, 44(29), 15072–15086. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>
- Aditiya, H. B., & Aziz, M. (2021). Prospect of hydrogen energy in Asia-Pacific: A perspective review on techno-socio-economy nexus. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(71), 35027–35056. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.070>
- Henry, A., McStay, D., Rooney, D., Robertson, P., & Foley, A. (2023). Techno-economic analysis to identify the optimal conditions for green hydrogen production. *Energy conversion and management*, 291, 117230. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117230>
- Maghami, M. R., Hassani, R., Gomes, C., Hizam, H., Othman, M. L., & Behmanesh, M. (2020). Hybrid energy management with respect to a hydrogen energy system and demand response. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(3), 1499–1509. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.223>
- Noyan, O. F., Hasan, M. M., & Pala, N. (2023). A global review of the hydrogen energy eco-system. *Energies*, 16 (3), 1484. <http://dx.doi.org/10.3390/en16031484>
- Pareek, A., Dom, R., Gupta, J., Chandran, J., Adep, V., & Borse, P. H. (2020). Insights into renewable hydrogen energy: Recent advances and prospects. *Materials Science for Energy Technologies*, 3, 319–327. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mset.2019.12.002>
- Parkinson, B., Balcombe, P., Speirs, J. F., Hawkes, A. D., & Hellgardt, K. (2019) Levelized cost of CO<sub>2</sub> mitigation from hydrogen production routes. *Energy & Environmental Science*, 12(1), 19–40. <https://doi.org/10.1039/C8EE02079E>
- Patlolla, S. R., Katsu, K., Sharafian, A., Wei, K., Herrera, O. E., & Mérida, W. (2023). A review of methane pyrolysis technologies for hydrogen production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 181, 113323. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113323>
- Penev, M., Saur, G., Hunter, C., & Zuboy, J. (2018). *H<sub>2</sub>A: Hydrogen production model: Version 3.2018 user guide (draft)*. <https://www.nrel.gov/hydrogen/assets/pdfs/h2a-production-model-version-3-2018-user-guide-draft.pdf> (дата обращения: 30.10.2023)
- Ren, X., Dong, L., Xu, D., & Hu, B. (2020). Challenges towards hydrogen economy in China. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(59), 34326–34345. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.163>
- Rosen, M. A., & Koochi-Fayegh, S. (2016). The prospects for hydrogen as an energy carrier: an overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems. *Energy, Ecology and Environment*, 1, 10–29. <https://doi.org/10.1007/s40974-016-0005-z>
- Schneider, S., Bajohr, S., Graf, F., & Kolb, T. (2020). State of the art of hydrogen production via pyrolysis of natural gas. *ChemBioEng Reviews*, 7(5), 150–158. <http://dx.doi.org/10.1002/cben.202000014>
- Sharma, S., Basu, S., Shetti, N. P., & Aminabhavi, T. M. (2020). Waste-to-energy nexus for circular economy and environmental protection: Recent trends in hydrogen energy. *Science of the Total Environment*, 713, 136633. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136633>
- Yue, M., Lambert, H., Pahon, E., Roche, R., Jemei, S., & Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146(34), 111180. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.111180>
- Zhiznin, S. Z., Timokhov, V. M., & Gusev, A. L. (2020). Economic aspects of nuclear and hydrogen energy in the world and Russia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(56), 31353–31366. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.260>

## References

- Abe, J.O., Popoola, A.P.I., Ajenifuja, E., & Popoola, O.M. (2019). Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. *International journal of hydrogen energy*, 44(29), 15072–15086. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>
- Aditiya, H.B., & Aziz, M. (2021). Prospect of hydrogen energy in Asia-Pacific: A perspective review on techno-socio-economy nexus. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(71), 35027–35056. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.070>
- Andriyanov, N.I., Zasko, M.P., & Dolgova, V.N. (2021). Assessment of the current state of hydrogen energy in Russia. *Innovatika i ekspertiza: nauchnye trudy*, (2(32)), 134–150. <https://doi.org/10.35264/1996-2274-2021-2-134-150> (In Russ.)
- Belov, V.B. (2020). New Hydrogen Strategies of Germany and the EU and Prospects for Cooperation with Russia. *Sovremennaya Evropa [Contemporary Europe]*, (5), 65–76. <http://dx.doi.org/10.15211/soveurope520206576> (In Russ.)
- Chebotareva, G.S., & Dvinyaninov, A.A. (2021). An Economic Alternative to Replacing *Centralized Gas Supply* with Autonomous Biogas Facilities in Russian Cities. *Journal of Applied Economic Research*, 20(3), 582–612. <https://doi.org/10.15826/vestnik.2021.20.3.023> (In Russ.)
- Chernyakhovskaya, Yu.V. (2016). Evolution of methodological approaches to electricity cost assessment. Analysis of best foreign practices. *Vestnik IGEU [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University]*, (4), 56–58. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2016.4.056-068> (In Russ.)
- Daudi, D., Rozhiatovskii, G., Ishmurzin, A., Kodryanu, N., & Popadko, N. (2021). Horizons for the production of blue hydrogen in Russia. *Energeticheskaya politika [Energy Policy]*, (3(157)), 34–43. [https://doi.org/10.46920/2409-5516\\_2021\\_3157\\_34](https://doi.org/10.46920/2409-5516_2021_3157_34) (In Russ.)
- Degtyarev, K.S., & Berezkin, M.Yu. (2021). On the problems of hydrogen economy. *Okruzhayushaya sreda i energovedeniye [Journal of Environmental Earth and Energy Study]*, (1). <https://doi.org/10.5281/zenodo.4662942> (In Russ.)
- Dmitrievskii, A.N., Mastepanov, A.M., & Bushuev, V.V. (2014). Resource-innovative strategy of Russia's economic development. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 84(5), 329–334. <https://doi.org/10.1134/S1019331614050062> (In Russ.)
- Gitelman, L.D., & Kozhevnikov, M.V. (2023). Conceptual Vision of the Energy Transition in the Regional Electric Power System in New Realities. *Ekonomika regiona [Economy of regions]*, 19(3), 844–859. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2023-3-17> (In Russ.)
- Goltsov, V.A., Veziroglu, T.N., & Goltsova, L.F. (2002). From hydrogen economy to hydrogen civilization: planetary and regional aspects of transformation. *Alternativnaya energetika i ekologiya [International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology]*, (4), 9–10. (In Russ.)
- Grigoriev, S.A., Porembsky, V.I., Fateev, V.N., Samsonov, R.O., & Kozlov, S.I. (2008). Production of hydrogen by electrolysis of water: current state, problems and prospects. *Transport na al'ternativnom toplive [Alternative fuel transport]*, (3(3)), 62–69. (In Russ.)
- Henry, A., McStay, D., Rooney, D., Robertson, P., & Foley, A. (2023). Techno-economic analysis to identify the optimal conditions for green hydrogen production. *Energy conversion and management*, 291, 117230. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117230>
- Kholkin, D. (2021). National hydrogen strategy in the context of the energy transition. *Ezhemesyachnoe informatsionno-analiticheskoe izdanie Neftegaz. Daydzhest [Monthly information and analytical publication Neftegaz Digest]*, 20(27), 10. (In Russ.)
- Litvinenko, V.S., Tsvetkov, P.S., Dvoynikov, M.V., & Buslaev, G.V. (2020). Barriers to implementation of hydrogen initiatives in the context of global energy sustainable development. *Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]*, 244, 428–438. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.5> (In Russ.)
- Maghami, M.R., Hassani, R., Gomes, C., Hizam, H., Othman, M.L., & Behmanesh, M. (2020). Hybrid energy management with respect to a hydrogen energy system and demand response. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(3), 1499–1509. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.223>
- Makaryan, I.A., & Sedov, I.V. (2021). Cost-Effectiveness Assessment of the Scale of Hydrogen Production by Various Methods. *Russian Journal of General Chemistry*, 91(12), 2743–2757. <https://doi.org/10.1134/S1070363221120537>
- Makaryan, I.A., Sedov, I.V. (2021). The state and development prospects of the global hydrogen energy sector. *Russian Journal of General Chemistry*, 91(9), 1912–1928. <https://doi.org/10.1134/S1070363221090371> (In Russ.)
- Mastepanov, A.M. (2020). Hydrogen power engineering in Russia: state and prospects. *Energeticheskaya politika [Energy Policy]*, (12(154)), 54–65. [https://doi.org/10.46920/2409-5516\\_2020\\_12154\\_54](https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_12154_54)
- Noyan, O.F., Hasan, M.M., & Pala, N. (2023). A global review of the hydrogen energy eco-system. *Energies*, 16(3), 1484. <http://dx.doi.org/10.3390/en16031484>
- Pareek, A., Dom, R., Gupta, J., Chandran, J., Adepu, V., & Borse, P.H. (2020). Insights into renewable hydrogen energy: Recent advances and prospects. *Materials Science for Energy Technologies*, 3, 319–327. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mset.2019.12.002>
- Parkinson, B., Balcombe, P., Speirs, J.F., Hawkes, A.D., & Hellgardt, K. (2019) Levelized cost of CO<sub>2</sub> mitigation from hydrogen production routes. *Energy & Environmental Science*, 12(1), 19–40. <https://doi.org/10.1039/C8EE02079E>
- Patlolla, S.R., Katsu, K., Sharafian, A., Wei, K., Herrera, O.E., & Mérida, W. (2023). A review of methane pyrolysis technologies for hydrogen production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 181, 113323. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113323>
- Penev, M., Saur, G., Hunter, C., & Zuboy, J. (2018). *H<sub>2</sub>A: Hydrogen production model: Version 3.2018 user guide (draft)*. <https://www.nrel.gov/hydrogen/assets/pdfs/h2a-production-model-version-3-2018-user-guide-draft.pdf> (Date of access: 30.10.2023)

- Polyakova, T. V. (2012). State and Prospects of Hydrogen Energy Development. *Vestnik MGIMO-Universiteta [MGIMO Review of International Relations]*, (1(22)), 156–164. <https://doi.org/10.24833/2071-8160-2012-1-22-156-164> (In Russ.)
- Ren, X., Dong, L., Xu, D., & Hu, B. (2020). Challenges towards hydrogen economy in China. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(59), 34326–34345. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.163>
- Rodichkin, I. G., & Karasevich, V. A. (2022). Hydrogen economy as a driver for energy transition. *Ekonomicheskie i sotsial'nye problemy Rossii [Economic and Social Problems of Russia]*, (1), 26–45. (In Russ.)
- Romanova, O. A. (2018). Industrial policy priorities of Russia in the context of challenges of the fourth industrial revolution. Part 2. *Ekonomika regiona [Economy of region]*, 14(3), 806–819. <https://doi.org/10.17059/2018-3-9> (In Russ.)
- Rosen, M. A., & Koochi-Fayegh, S. (2016). The prospects for hydrogen as an energy carrier: an overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems. *Energy, Ecology and Environment*, 1, 10–29. <https://doi.org/10.1007/s40974-016-0005-z>
- Schneider, S., Bajohr, S., Graf, F., & Kolb, T. (2020). State of the art of hydrogen production via pyrolysis of natural gas. *ChemBioEng Reviews*, 7(5), 150–158. <http://dx.doi.org/10.1002/cben.202000014>
- Shafiev, D. R., Trapeznikov, A. N., Khokhonov, A. A., Agarkov, D. A., Bredikhin, S. I., Chichirov, A. A., & Subcheva, E. N. (2020). Methods for obtaining hydrogen on an industrial scale. Comparative analysis. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii [Advances in chemistry and chemical technology]*, 34(12), 53–57. (In Russ.)
- Sharma, S., Basu, S., Shetti, N. P., & Aminabhavi, T. M. (2020). Waste-to-energy nexus for circular economy and environmental protection: Recent trends in hydrogen energy. *Science of the Total Environment*, 713, 136633. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136633>
- Tarasov, B. P., & Lototskii, M. V. (2007). Hydrogen energetics: Past, present, prospects. *Russian Journal of General Chemistry*, 77, 660–675. <https://doi.org/10.1134/S1070363207040299> (In Russ.)
- Veselov, F., & Solyanik, A. (2022). Economics of hydrogen production, taking into account exports and the Russian market. *Energeticheskaya politika [Energy Policy]*, (4(170)), 60–64. [https://doi.org/10.46920/2409-5516\\_2022\\_4170\\_58](https://doi.org/10.46920/2409-5516_2022_4170_58) (In Russ.)
- Yue, M., Lambert, H., Pahon, E., Roche, R., Jemei, S., & Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146(34), 111180. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.111180>
- Zhdaneev, O. V. (2022). Assessment of Product Localization during the Import Substitution in the Fuel and Energy Sector. *Ekonomika regiona [Economy of regions]*, 18(3), 770–786. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2022-3-11> (In Russ.)
- Zhiznin, S. Z., Timokhov, V. M., & Gusev, A. L. (2020). Economic aspects of nuclear and hydrogen energy in the world and Russia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(56), 31353–31366. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.260>
- Zhuk, A., Novikov, N., Novikov, A., & Frolov, V. (2021). Hydrogen and aluminum-hydrogen storage in the power industry. *Energeticheskaya politika [Energy Policy]*, (5(159)), 64–79. [https://doi.org/10.46920/2409-5516\\_2021\\_5159\\_64](https://doi.org/10.46920/2409-5516_2021_5159_64) (In Russ.)

### Информация об авторе

**Двинанинов Артем Андреевич** — старший преподаватель, кафедра систем управления энергетикой и промышленными предприятиями, Институт экономики и управления УрФУ имени первого президента России Б. Н. Ельцина; <https://orcid.org/0000-0002-9852-1861> (Российская Федерация, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19); e-mail: aadvinianinov@urfu).

### About the author

**Artem A. Dvinianinov** — Senior Lecturer, Academic Department of Energy and Industrial Enterprises Management Systems, Institute of Economics and Management, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin; Scopus Author ID: 58247061500; <https://orcid.org/0000-0002-9852-1861> (19, Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation; e-mail: aadvinianinov@urfu.ru).

### Использование средств ИИ

Автор заявляет о том, что при написании этой статьи не применялись средства генеративного искусственного интеллекта.

### Use of AI tools declaration

The author declares that he has not used Artificial Intelligence (AI) tools for the creation of this article.

### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interests

The author declares no conflicts of interest.

Дата поступления рукописи: 10.06.2024.

Прошла рецензирование: 10.09.2024.

Принято решение о публикации: 26.03.2025.

Received: 10 Jun 2024.

Reviewed: 10 Sep 2024.

Accepted: 26 Mar 2025