

УДК 338.45:661.961 JEL L71, O14 DOI: <https://doi.org/10.26425/2309-3633-2022-10-4-26-37>
Получено: 22.09.2022 Статья доработана после рецензирования: 31.10.2022 Принято: 09.11.2022

Обзор мировых и российских тенденций развития водородной энергетики

Вечкинзова Елена Анатольевна

Канд. экон. наук, доц. каф. маркетинга

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2543-625X>, e-mail: kvin07@list.ru

Стеблякова Лариса Петровна

Д-р экон. наук, проф. каф. маркетинга услуг и бренд-менеджмента

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6074-5192>, e-mail: larissastkaz@mail.ru

Сумарокова Екатерина Викторовна

Канд. экон. наук, доц. каф. маркетинга

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8963-6774>, e-mail: sumarokova@bk.ru

Государственный университет управления, 109542, Рязанский пр-т, 99, г. Москва, Россия

Аннотация

В статье на основе сравнительного анализа и аналитического обобщения публикаций, программных и нормативных документов разных стран авторы рассматривают перспективы развития водородного рынка. Большинство публикаций в настоящее время сосредоточиваются на технико-технологических аспектах водородной энергетики, решая проблему повышения эффективности способов производства, транспортировки, распределения и хранения водородного топлива. Во всех странах мира технология производства высокоэкологичного «зеленого» водорода находится на начальной стадии, что обуславливает ее высокую зависимость от государственных инициатив по развитию водородных проектов и государственного финансирования как научных исследований в этой области, так и реализуемых проектов. Пики интереса к сфере водородной энергетики связаны с конъюнктурными изменениями на рынках ископаемых энергоносителей, что делает развитие этой технологии неустойчивым. Многие страны готовы вкладывать средства в развитие водородной энергетики, а также, с учетом роста спроса на водород, готовы к его экспорту по приемлемой цене. Полученные результаты исследования свидетельствуют о принципиальной сонаправленности тенденций развития водородной энергетики в России глобальным трендам. При этом высокий ресурсный и научно-технологический потенциал позволяет России в полной мере ориентировать свою стратегию на его реализацию, не только развивая внутренний рынок, но и выступая в качестве экспортера водорода и расширяя международное сотрудничество в данной области.

Ключевые слова: развитие водородной энергетики, водородные стратегии, водородные проекты, Россия, «зеленый» водород

Цитирование: Вечкинзова Е.А., Стеблякова Л.П., Сумарокова Е.В. Обзор мировых и российских тенденций развития водородной энергетики / Управление. 2022. Т. 10. № 4. С. 26–37. DOI: [10.26425/2309-3633-2022-10-4-26-37](https://doi.org/10.26425/2309-3633-2022-10-4-26-37)

© Вечкинзова Е.А., Стеблякова Л.П., Сумарокова Е.В., 2022.

Статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0. всемирная <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Received: 22.09.2022

Revised: 31.10.2022

Accepted: 09.11.2022

Review of global and Russian trends in the hydrogen energy development

Elena A. Vechkinzova

Cand. Sci. (Econ.), Assoc. Prof. at the Marketing Department,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2543-625X>, e-mail: kvin07@list.ru

Larissa P. Steblyakova

Dr. Sci. (Econ.), Prof. at the Service Marketing and Brand Management Department,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6074-5192>, e-mail: larissastkaz@mail.ru

Ekaterina V. Sumarokova

Cand. Sci. (Econ.), Assoc. Prof. at the Marketing Department,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8963-6774>, e-mail: sumarokova@bk.ru

State University of Management, 99, Ryazansky prospekt, Moscow 109542, Russia

Abstract

In the article, based on a comparative analysis and analytical generalization of publications, program and regulatory documents from different countries, the authors consider the prospects for the development of the hydrogen market. Most publications are currently focused on the technical and technological aspects of hydrogen energy, solving the problem of increasing the efficiency of methods for the production, transportation, distribution and storage of hydrogen fuel. In all countries of the world, the technology for the production of highly environmentally friendly “green” hydrogen is at an early stage, which makes it highly dependent on government initiatives to develop hydrogen projects and government funding of both scientific research in this area and ongoing projects. Peaks of interest in the field of hydrogen energy are associated with changes in the fossil energy markets, which makes the development of this technology unsustainable. Many countries are ready to invest in the development of hydrogen energy, and, given the growth in demand for hydrogen, are ready to export it at an affordable price. The results of the study indicate that the trends in the development of hydrogen energy in Russia are fundamentally aligned with global trends. At the same time, the high resource and scientific and technological potential allows Russia to fully focus its strategy on its implementation, not only developing the domestic market, but also acting as an exporter of hydrogen and expanding international cooperation in this area.

Keywords: development of hydrogen energy, hydrogen strategies, hydrogen projects, Russia, “green” hydrogen

For citation: Vechkinzova E.A., Steblyakova L.P., Sumarokova E.V. (2022) Review of global and Russian trends in the hydrogen energy development. *Upravlenie / Management (Russia)*, 10 (4), pp. 26–37. DOI: 10.26425/2309-3633-2022-10-4-26-37



Введение / Introduction

В настоящее время водородная энергетика находится на начальном этапе развития не только в России, но и во всем мире. Новшества в этой сфере появляются пока в основном на уровне идей, и они не всегда успешно проходят стадию эксперимента в компаниях и исследовательских центрах, использующих различные источники финансирования.

С одной стороны, мощный импульс развитию водородной энергетике во всем мире дает проводимая не только на экономическом, но и на политическом уровне «зеленая» повестка, связанная с обеспечением энергоперехода на возобновляемые источники энергии. Она стала особенно актуальной на фоне текущих энергетических проблем и беспрецедентного роста цен на углеводородные ресурсы. Как следствие, государственные и международные организации активизировали процессы принятия и реализации стимулирующих мер, в том числе финансовых, налоговых и других, нацеленных на обеспечение не только декарбонизации энергетике, но и на бесперебойное снабжение национальных энергетических систем надежными источниками энергии.

С другой стороны, технические возможности развития водородной энергетике пока сопряжены с высокими производственными издержками, проблемами хранения и доставки водорода потребителям. Именно поэтому акцент разработчиков технологий водородной энергетике делается не только на более дешевых с точки зрения текущих и инвестиционных издержек проектах, но и на тех, которые в лучшей степени будут решать проблемы потребителей, в том числе в отношении внедрения в производство и использования возможностей имеющейся инфраструктуры.

Решение производственных проблем в сфере водородной энергетике, а также обеспечение транспортировки водородного сырья с минимальными потерями позволят в обозримом будущем преодолеть локальные масштабы ее возможностей и вывести водородную энергетике на международный уровень, в том числе замещая традиционный газ или используя его как ресурс.

Оставив за рамками исследования технологические и технические вопросы производства, транспортировки и использования водорода, авторы сосредоточились на обзоре публикаций, освещающих вопросы мировых тенденций, страновых стратегий и проектов, направленных на развитие водородной энергетике.

Обзор основных направлений развития глобального рынка водородной энергетике / Overview of the main directions of the global hydrogen energy market development

Сейчас во многих странах мира уже существуют серьезные научные и практические заделы в виде реализованных водородных проектов. Большое количество зарубежных работ, относимых к тематике развития водородной энергетике в отдельных регионах, посвящены вопросам изучения ключевых ограничений широкомасштабного использования водородной энергии, в том числе имеющимся технико-технологическим проблемам, вопросам применения новых материалов, хранения и транспортировки водорода, а также перспективным направлениям развития водородной энергетике на основе применения гибридных систем. Приводятся различные примеры использования ресурсов солнечной и ветряной энергии для производства водорода. Например, T. Ayodele и соавторы оценивают перспективы использования солнечной энергии при производстве водорода для питания водородных транспортных средств на заправочной станции в Южной Африке [Ayodele et al., 2021].

R.N. Sarma и соавторы представили тематическое исследование оценки потенциала ветроэнергетике для семи населенных пунктов в Индии. При этом авторы сделали акцент на небольших ветряных турбинах, работающих в дополнительном гибридном режиме с системой выработки водорода. Они могут генерировать энергию при более низких скоростях включения для максимального использования потенциала ветроэнергетике, а водород, получаемый из энергии ветра путем электролиза, может храниться и использоваться для удовлетворения пиковых потребностей в электроэнергии [Sarma et al., 2022].

Z. Li и соавторы изучают технологии многоэнергетического дополнения водородной энергетической системы, а также стратегии скоординированного управления, накопления энергии и распределения мощностей, управления энергопотреблением и технологии производства водорода с помощью электролиза воды. Авторы рассматривают тенденции развития многоэнергетической комплементарной системы и производственной цепочки водородной энергетике, которая служит ориентиром для развития технологии производства водорода и использования водородной энергии в системе комплементарной возобновляемой энергии [Li Z. et al., 2020].

J. Li и соавторы, говоря о перспективах развития и повышения эффективности применяемых в настоящее

время проектов, связанных с получением водородного топлива, также делают акцент на использовании гибридных систем как более продуктивных и экономически целесообразных. Гибридные системы настраиваются таким образом, что могут производить водородное топливо, а также тепловую и электрическую энергию [Li J. et al., 2022].

Интерес к использованию гибридных энергетических систем наблюдается у многих исследователей. Это связано с необходимостью нивелирования стохастической природы возобновляемых источников энергии. Применяя методы математического моделирования, аналитики доказывают, что гибридизация энергетических систем позволяет повысить их производительность и эффективность, обеспечить бесперебойность работы и сократить удельные выбросы [Jani et al., 2022]. А.А. Бельский и соавторы изучают использование гибридных накопителей энергии для балансировки профиля электрической нагрузки предприятий [Бельский и др., 2020].

Ряд ученых сосредоточились на решениях по размещению, распределению, а также по обеспечению безопасности водородных энергетических сетей. О. Derse и соавторы посвятили свое исследование проблеме оптимизации расположения установки по производству водорода из возобновляемых источников энергии на основе разработки математической программной модели, объединяющей решения, связанные с производством, хранением, транспортировкой, обеспечением безопасности, оптимальным месторасположением и распределением персонала с учетом минимизации затрат [Derse et al., 2022].

Можно выделить работы ученых, концентрирующих внимание на роли государства в обеспечении перехода к чистой энергетике. Так, Е. Thurbon и соавторы предлагают новый подход к анализу стратегической роли государства на основе синтеза шumpетерианского понимания «созидательного разрушения» и технико-экономических изменений с переломной теорией государства развития, сосредоточенной на «экологизме» этого развития. Этот подход позволяет объяснить неоднозначные результаты перехода на экологически чистую энергетику в последние 10–12 лет, а также проявление более последовательных шагов в направлении экологизации национальных экономик [Thurbon et al., 2021].

Согласно данным Исследовательского центра Bloomberg New Energy Finance (далее – BNEF), реализуемые в настоящее время проекты, связанные с водородной энергетикой, составляют более 90 млрд долл. США. В 2021 г. BNEF составил энергетический прогноз, представляющий собой долгосрочный анализ сценариев будущего энерге-

тической экономики¹. Были представлены три климатических сценария, соответствующих Парижскому соглашению 2015 г. и обеспечивающих нулевые выбросы к 2050 г.²

Согласно «зеленому сценарию», спрос на водород в мировом масштабе в 2050 г. может составить 1 310 млн т, то есть 22 % от общего конечного потребления энергии (на сегодняшний день этот показатель составляет 0,002 %). При этом ставка делается на «зеленый» водород как наиболее экологически чистый. «Серый сценарий» предполагает спрос на водород на уровне 190 млн т. «Красный сценарий» не предусматривает широкого распространения водородной энергетики. Кроме того, в этом направлении предполагается эксплуатация специальных атомных электростанций, которые будут производить так называемый «красный (или оранжевый)» водород.

«Красный (оранжевый)» водород, как и «зеленый», получается путем электролиза. При этом источником энергии являются атомные станции. Выбросы углеводорода отсутствуют, однако данный метод нельзя назвать абсолютно экологичным³.

Согласно Базе данных водородных проектов (Hydrogen Projects Database) Международного энергетического агентства (International Energy Agency, IEA), в 2020 г. количество заявленных водородных проектов составило 990⁴. Однако реально действующих проектов всего 202. В развитых странах мира было объявлено о всего 50 жизнеспособных проектах по производству «зеленого» водорода. Их реализация позволит производить до 4 млн т водорода в год. При этом мощность возобновляемой водородной энергетики составит 50 ГВт. Требуемый объем капитальных вложений составит 75 млрд долл. США⁵. Лидерами среди стран по количеству водородных проектов

¹ Bloomberg New Energy Finance (2021). New Energy Outlook 2021. Режим доступа: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/> (дата обращения: 20.09.2022).

² United Nations (2015). Paris agreement. Режим доступа: https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf (дата обращения: 20.09.2022).

³ Техническая библиотека Neftegaz.ru. Классификация водорода по цвету. Режим доступа: <https://neftgaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/672526-klassifikatsiya-vodoroda-po-tsvetu> (дата обращения: 20.09.2022).

⁴ International Energy Agency (2021). Hydrogen Projects Database. Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/hydrogen-projects-database> (дата обращения: 20.09.2022).

⁵ Yong-Liang Por (Saturday 1 August 2020). Great Expectations Asia, Australia and Europe Leading Emerging Green Hydrogen Economy, but Project Delays Likely // Institute for Energy Economics and Financial Analysis. Режим доступа: <https://ieefa.org/wp-content/uploads/2020/08/>

в 2020 г. стали Германия (139 проектов), Испания (82 проекта), США (74 проекта), Австралия и Нидерланды (по 65 проектов), Великобритания (53 проекта), Франция (50 проектов), Китай (48 проектов).

Большинство заявленных проектов (604 из 990) еще находятся на стадии заключения меморандумов, поэтому их реализация начнется в лучшем случае в ближайшие 5 лет. Некоторые проекты и вовсе могут быть не осуществлены вследствие неблагоприятной мировой экономической ситуации либо из-за проблем с финансированием. Для их успешной реализации требуется расширить производство электролизеров и другого специального оборудования, существенно снизить затраты на транспортировку водорода, в том числе морским путем. Как было отмечено выше, технические возможности развития водородной энергетики пока связаны с высокими производственными издержками, проблемами хранения и доставки водорода потребителям.

Теоретически любая страна может производить водород. Проблема заключается в стоимости его производства и обеспечения хранения. Поэтому для некоторых стран экономически целесообразнее водород закупать, нежели производить самостоятельно. И здесь уже проблема будет заключаться в стоимости транспортировки водорода на значительные расстояния. Ожидается, что к 2050 г. в целом в мире водород составит не менее 12 % конечного спроса на энергию (а если принять во внимание так называемый «зеленый» сценарий, то и в два раза больше). При этом 25 % мирового спроса будет удовлетворяться за счет торговли⁶. В связи с этим актуальность приобретают проблемы, связанные со снижением стоимости транспортировки водорода, развитием соответствующей инфраструктуры, а также решением вопросов нормативно-правового регулирования и сертификации в области водородной энергетики.

Импорт водорода может быть привлекательным в том случае, если закупочная цена и стоимость транспортировки окажутся ниже затрат на внутреннее производство. Поэтому по мере совершенствования транспортных технологий (перевозка сжиженного водорода, аммиака, перегонка водорода в газообразном состоянии по трубопроводам) и развития глобальных логистических цепочек, а также вследствие снижения затрат на производство, рынок

водорода будет расширяться. По расчетным данным Института энергетических исследований Российской академии наук за 2019 г. можно судить об издержках на производство водорода с применением различных технологий в странах мира (табл. 1).

Таблица 1

Издержки на производство водорода различными технологиями по странам в 2019 г.

Table 1. **Costs of hydrogen production by different technologies by country in 2019**

Страна	Издержки на производство водорода по видам, долл. США/кг / Hydrogen production costs by type, USD/kg	
	«зеленый» водород / green hydrogen	«голубой» водород / blue hydrogen
Россия / Russia	6,7	0,4
Великобритания / United Kingdom	5,0	1,5
Республика Корея / Republic of Korea	5,0	2,3
Германия / Germany	4,3	1,6
Франция / France	4,0	2,2
Италия / Italy	3,6	2,0
США / USA	3,3	0,7

Источник⁷ / Source⁷

Несмотря на то что рынок водорода как энергоносителя в настоящее время еще не сформировался, можно утверждать, что это дело обозримого будущего. В то же время пока сложно говорить о перспективных масштабах рынка. Будет ли это крупный международный рынок по аналогии с рынками нефти и газа, или же он будет носить более локальный характер, ограничиваясь некоторыми странами и отдельными регионами.

На барьеры на пути реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики обращают внимание многие исследователи, например, В.С. Литвиненко и соавторы [Литвиненко и др., 2020]. Тем не менее, как отмечают эксперты, многое указывает на то, что рынок водорода рано или поздно превратится в глобальный, поскольку далеко не все страны, заинтересованные в водороде, обладают достаточным потенциалом для его производства, в том числе с помощью возобновляемых источников энергии, а также для удовлетворения все возрастающих потребностей в данном виде топлива.

Asia_Australia_Europe-Lead-Green-Hydrogen-Economy_August-2020.pdf (дата обращения: 20.09.2022).

⁶ Blanco H. (Monday 25 July 2022). What will an International Marketplace for Hydrogen Look Like? // Energypost.eu. Режим доступа: <https://energypost.eu/what-will-an-international-marketplace-for-hydrogen-look-like/> (дата обращения: 20.09.2022).

⁷ Группа «Деловой профиль» (2021). Развитие водородной энергетики в России: новая энергополитика. Аналитическое исследование. Режим доступа: https://delprof.ru/upload/iblock/eef/DelProf_Analitika_Vodorodnaya-energetika.pdf (дата обращения: 20.09.2022).

Страновые водородные стратегии / Country hydrogen strategies

По данным IEA, в 2021 г. 9 стран сформулировали свою водородную стратегию. А в 2022 г. уже 26 стран намерены использовать водород в качестве источника чистой энергии в своей энергетической системе. Национальные цели по разворачиванию электролизных мощностей составляют 145–190 ГВт, что вдвое превышает показатель в 74 ГВт в 2021 г.⁸

Амбициозные планы по развитию водородной энергетики имеют, прежде всего, страны Европейского союза (далее – ЕС). Как известно, 8 июля 2020 г. Европейская комиссия представила новую стратегию, предусматривающую расширение проектов по производству «зеленого» водорода, которая будет реализована в три этапа⁹:

- 1-й этап – 2020–2024 гг.: установка в ЕС водородных электролизных установок мощностью не менее 6 ГВт с производством до 1 млн т экологически чистого водорода;
- 2-й этап – 2025–2030 гг.: установка водородных электролизных установок мощностью не менее 40 ГВт с производством до 10 млн т «зеленого» водорода;
- 3-й этап – 2030–2050 гг.: широкомасштабное внедрение технологий возобновляемого водорода во всех секторах, трудно поддающихся обезуглероживанию.

Согласно прогнозным оценкам Института экономики энергетики и финансового анализа (Institute for Energy Economics and Financial Analysis, IEEFA), реализация стратегии потребует от ЕС инвестиций в экологически чистый водород на уровне 430 млрд евро до 2030 г. При этом потребуются поддержка в виде грантов и субсидий на уровне 145 млрд евро¹⁰.

По данным IEEFA, план ЕС по развитию водородной энергетики ориентирован на экологически чистый водород, чего не скажешь о других странах. Так, Китай ставит целью к 2050 г. довести долю водородной энергии до 10 % от всей энергии страны (около 60 млн т водорода в год), а также обес-

печить строительство 10 000 водородных заправочных станций.

Однако этот план базируется в основном на «сером» водороде, получаемом из природного газа. Как известно, при получении «серого» водорода в ходе химической реакции выделяется углекислота практически в тех же объемах, что и при сгорании природного газа, а также расходуется энергия на конверсию.

Согласно Дорожной карте водородной экономики Республики Корея до 2040 г., основную часть поставок водорода будет составлять «голубой» водород, получаемый путем паровой конверсии метана¹¹. При этом происходит улавливание и хранение углерода, что обеспечивает двукратное сокращение его выбросов.

Использование «голубого» водорода остается экономически более целесообразным, чем использование сжиженного «зеленого». Последний считается самым экологичным, так как его получают с помощью электролиза. А если при этом электричество поступает от возобновляемых источников энергии, то выбросы углекислого газа полностью отсутствуют. Однако, по оценкам экспертов, по стоимости «зеленый» водород не будет конкурентоспособным вплоть до 2050 г.

Целью правительства Республики Корея является увеличение к 2040 г. количества автомобилей, работающих на водороде до 6,2 млн, установка 1 200 водородных зарядных станций, введение в эксплуатацию 40 000 автобусов, работающих на водородном топливе, 80 000 такси и 30 000 грузовых автомобилей, а также развитие местного производства соответствующих автозапчастей. Планируется оказывать поддержку разработкам кораблей, поездов и прочих механизмов на водородном топливе. Будет поощряться производство топливных элементов или производство электроэнергии для достижения к 2040 г. совокупной мощности в 15 ГВт. За счет этого электроэнергией будет обеспечено 940 000 домохозяйств¹².

Япония одной из первых среди стран мира еще в 2017 г. представила национальную водородную стратегию. В 2020 г. Японией была принята стратегия экологических инноваций, направленных

⁸ International Energy Agency (2021). Hydrogen. Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/hydrogen> (дата обращения: 20.09.2022).

⁹ European Commission (2020). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. A hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe. Режим доступа: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0301> (дата обращения: 20.09.2022).

¹⁰ Hydrogen Europe (2020). Green Hydrogen Investment and Support Report. Режим доступа: https://profadvanwijk.com/wp-content/uploads/2020/05/Hydrogen-Europe_Green-Hydrogen-Recovery-Report_final.pdf (дата обращения: 20.09.2022).

¹¹ 대한민국 산업통상자원부 [Министерство торговли, промышленности и энергетики (Республика Корея)] (2019). 수소경제 활성화 로드맵 [Дорожная карта возрождения водородной экономики]. Режим доступа: http://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=161262&bbs_cd_n=81¤tPage=1&search_key_n=&cate_n=&dept_v=&search_val_v= (дата обращения: 20.09.2022).

¹² International Energy Agency (2020). Korea Hydrogen Economy Roadmap 2040. Режим доступа: <https://www.iea.org/policies/6566-korea-hydrogen-economy-roadmap-2040> (дата обращения: 20.09.2022).

на достижение к 2050 г. углеродной нейтральности¹³. Чтобы водород стал полноценным источником энергии, планируется создание повсеместной водородной экосистемы. А чтобы он стал доступным по цене, сформирована инициатива по созданию глобальной цепочки поставок и строительству глобальных водородных хранилищ. К 2030 г. планируется снижение стоимости водорода до 3 долл. США/кг за счет постоянного совершенствования технологий производства, транспортировки и хранения водорода. Речь идет о высокоэффективном электролизе воды, искусственном фотосинтезе, высокоэффективных сжижителях водорода, энергоносителях и протон-проводящих твердоокислородных топливных элементах. Однако в ближайшей перспективе акцент будет сделан опять же на «синий» водород.

В 2021 г. в США были утверждены национальная стратегия и дорожная карта по развитию водородной энергетики. На реализацию национальной стратегии выделяют 550 млрд долл. США. Из них 9,5 млрд долл. США будут потрачены на развитие «зеленого» водорода, включая ряд мероприятий с обеспечением снижения его стоимости до 2 долл. США/кг к 2026 г. Планируется создание четырех региональных центров, связанных с производством и применением «зеленого», «синего» и «красного» водорода¹⁴. По оценкам компании McKinsey, к 2050 г. доля водорода в энергобалансе США должна достичь 14 % [Мамедов, 2021].

Развитие водородного рынка России / Development of the Russian hydrogen market

Ориентируясь на мировые тренды декарбонизации, Российская Федерация также достаточно активно проводит исследования и разработки в области водородной энергетики, учитывая, что у нее имеется значительный опыт в сфере водородных энергетических технологий. Заведующий Аналитическим центром энергетической политики и безопасности Института проблем нефти и газа Российской академии наук А. Мастепанов, проводя обзор развития водородной энергетики в России, со ссылкой

на источники^{15,16} отмечает, что, по сути, исследования начались еще в 1930-е гг. (исследовалось влияние на автомобильные двигатели добавок водорода к бензину). Отмечены примеры использования водорода в качестве моторного топлива в годы Второй мировой войны. Более масштабные исследования в области развития и применения водородных технологий осуществлялись в 1970-е гг. в рамках реализации государственной программы «Водородная энергетика». При этом акцент делался на использование атомной энергии для производства водорода. Значительные государственные вложения в водородную энергетику в советский период позволили создать в этой области основательный научно-технический задел, который, однако, во многом был утрачен после распада Советского Союза [Мастепанов, 2020].

Новый этап развития энергетики начался в начале 2000-х гг. Так, в 2003 г. была создана некоммерческая Национальная ассоциация водородной энергетики, в задачи которой входят исследования в сфере развития индустрии топливных элементов. Подобно зарубежным партнерам, Российская Федерация достигла определенных результатов: в стране появились водородные автомобили, трамваи и первые водородные заправочные станции. Проводятся разработки по использованию водорода на атомных электростанциях (далее – АЭС) как накопителях энергии. Водород используется при производстве аммиака, метана, в нефтепереработке и т.д. В настоящее время выпуск водорода в России составляет порядка 5 млн т в год.

В июне 2020 г. в России принята Энергетическая стратегия на период до 2035 г., целью которой является развитие производства и потребления водорода в стране и обеспечение вхождения России в число мировых лидеров по его производству и экспорту¹⁷. К основным задачам Стратегии можно отнести:

- создание инфраструктуры для транспортировки и потребления чистого водорода и в составе смесей;

¹³ Ministry of Economy, Trade and Industry (2017). Japan's Roadmap to "Beyond-Zero" Carbon. Режим доступа: https://www.meti.go.jp/english/policy/energy_environment/global_warming/roadmap/innovation/thep.html (дата обращения: 20.09.2022).

¹⁴ U.S. Department of Energy (2021). DOE National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap. Режим доступа: https://www.meti.go.jp/english/policy/energy_environment/global_warming/roadmap/innovation/thep.html (дата обращения: 20.09.2022).

¹⁵ Атомный эксперт. Водород — новый ключевой продукт Росатома. Режим доступа: https://atomicexpert.com/hydrogen_project_rosatom (дата обращения: 20.09.2022).

¹⁶ Дятел Т. (Четверг 8 окт. 2020). Водород у ворот. Как Россия пытается выйти на новый рынок // Коммерсантъ. № 184. Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/4521376> (дата обращения: 20.09.2022).

¹⁷ Министерство энергетики Российской Федерации. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения: 20.09.2022).

- расширение масштабов производства водорода из природного газа, а также с помощью возобновляемых источников энергии и АЭС;
- дальнейшая разработка низкоуглеродных технологий производства водорода;
- расширение внутреннего рынка;
- совершенствование нормативно-правовой базы в области водородной энергетики;
- развитие международного сотрудничества и выход на зарубежные рынки.

При этом планируется расширение экспорта водорода от 0,2 млн т в 2024 г. до 2 млн т в 2035 г. Общемировой целевой показатель – обеспечить к 2030 г. затраты на производство «зеленого» водорода на уровне не выше 2 долл. США/кг.

Предполагается, что потенциально к 2030 г. Россия сможет удовлетворять внутренний и внешний спрос потребителей в водороде в размере 10,5 млн т. При этом отмечается необходимость развития возобновляемых источников энергии именно для наращивания производства «зеленого» водорода, который будет отправляться на экспорт, поскольку из-за высоких затрат на его производство доля экологически чистого водорода остается крайне небольшой.

В октябре 2020 г. Правительство Российской Федерации утвердило план мероприятий «Развитие водородной энергетики в России до 2024 г.» (далее – План мероприятий), целью которого заявлена организация работ по формированию в стране высокопроизводительной экспортноориентированной области водородной энергетики, развивающейся на основе современных технологий и обеспеченной высококвалифицированными кадрами¹⁸.

Для достижения поставленной цели, согласно Плану мероприятий, необходимо совершенствовать нормативно-правовую базу, обеспечить государственную поддержку проектов в сфере производства, хранения, транспортировки и использования водорода и укрепления позиций российских компаний на водородных рынках, активизировать научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в сфере водородной энергетики.

В августе 2021 г. был утвержден еще один основополагающий документ в сфере развития водородной энергетики в России – «Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации», которая разработана в соответствии

с Планом мероприятий. Концепция определяет цели, задачи, стратегические инициативы и ключевые меры по развитию водородной энергетики на среднесрочный период до 2024 г., долгосрочный период до 2035 г., а также основные ориентиры на перспективу до 2050 г.¹⁹

В рамках первого (среднесрочного) этапа концепции в России должны быть созданы профильные водородные кластеры, реализованы пилотные проекты по производству и применению водородных энергоносителей на российском рынке, а также по экспорту водорода. Три территориальных кластера по производству водорода и продуктов конечного использования из водорода уже определены:

- Северо-западный кластер (Санкт-Петербург и Ленинградская область, расположенные на Балтийском побережье России) будет экспортировать водород в европейские страны и специализироваться на реализации мер по снижению углеродного следа экспортноориентированных предприятий;
- Восточный кластер (Сахалинская область, остров на Дальнем Востоке России) будет экспортировать водород в страны Азиатско-Тихоокеанского региона, а также он будет специализироваться на развитии водородной инфраструктуры в сфере транспорта и энергетики;
- Арктический кластер (Ямало-Ненецкий автономный округ, на Северо-Западе Сибири) будет заниматься обеспечением низкоуглеродного электроснабжения российского Заполярья.

В перспективе рассматривается создание Южного кластера, расположенного вблизи крупных экспортных портов. Южный кластер будет ориентирован на производство водорода с использованием возобновляемых источников энергии²⁰.

В рамках трех утвержденных профильных кластеров к реализации запланирован 41 проект²¹. Утвержденные проекты делятся по технологии производства водорода следующим образом: «зеленый»

¹⁸ Министерство энергетики Российской Федерации. План мероприятий «Развитие водородной энергетики в России до 2024 года». Утвержден постановлением Правительства Российской Федерации от 12 октября 2020 г. Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/19194> (дата обращения: 20.09.2022).

¹⁹ Министерство энергетики Российской Федерации. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации. Утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 5 августа 2021 г. Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqcVsexl.pdf> (дата обращения: 20.09.2022).

²⁰ Global Energy (Thursday 12 August 2021). Russia's concepts for developing hydrogen. Режим доступа: <https://globalenergyprize.org/en/2021/08/12/russias-concepts-for-developing-hydrogen/> (дата обращения: 20.09.2022).

²¹ Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. Атлас российских водородных проектов. Режим доступа: <https://minpromtorg.gov.ru/common/upload/docVersions/6169a90492dde/actual/atlas.pdf> (дата обращения: 20.09.2022).

водород – 30 проектов, «голубой» водород / аммиак – 8 проектов, «бирюзовый» водород – 1 проект, низкоуглеродный водород – 2 проекта. Примечательно, что в Базе данных водородных проектов IEA у России числится только один проект – Kola Nuclear Power Plant – Кольская АЭС.

Затраты, связанные с производством водорода, напрямую зависят от эффективности применяемых технологий. В таблице 2 приведены данные, отражающие приведенную стоимость производства водорода в России. Расчеты приведенной стоимости производства водорода опираются на формулу из трех составляющих, дисконтированных на всем жизненном горизонте технологии: капитальных затрат, затрат на входящий энергоноситель и условно-постоянных операционных затрат. Экономический смысл показателя приведенных затрат заключается в том, что он отражает минимальный уровень цены водорода, который гарантирует безубыточность инвестиций в «водородную фабрику» [Веселов, Соляник, 2022]. Показатели приведенной стоимости выше простых издержек на производство водорода, отраженных в таблице 1.

Таблица 2

Приведенная стоимость производства водорода в России на основе электроэнергии от различных источников и метана

Table 2. Present value of hydrogen production in Russia based on electricity from various sources and methane

Применяемая технология / Applied technology	Приведенная стоимость производства водорода по годам, долл. США/кг / Present value of hydrogen production by years, USD/kg	
	2020–2025 гг.	2030–2035 гг.
На основе электроэнергии от: Based on electricity from: • солнечных электростанций / photovoltaic power stations	12,2	5,6
• ветряных электростанций / wind farms	6,7	4,0
• гидроэлектростанций / hydroelectric stations	3,5	3,0
• атомных электростанций / nuclear power plants	3,2	2,3
Паровая конверсия метана плюс улавливание и захоронение углекислого газа / Steam reforming of methane plus carbon dioxide capture and storage	1,7	1,6

Составлено авторами по материалам источника [Веселов, Соляник, 2022] / Compiled by the authors on the materials of the source [Veselov, Solyanik, 2022]

Большие экономические перспективы симбиоза атомной и водородной энергетики в сочетании с возобновляемой энергетикой для России рассматриваются в исследовании С.З. Жизнина и соавторов [Zhiznin et al., 2020]. Авторы считают, что реализация этих

технологических направлений в России позволит сформировать новую устойчивую глобальную энергетическую систему – альтернативную энергетику.

Активность по освоению российской арктической зоны повысила спрос на проекты автономного водородного энергоснабжения. Перспективы и особенности рассмотрены подробно в исследовании А.А. Коломейцевой и соавторов [Kolomeyeva et al., 2022]. Решению проблем энергоснабжения изолированных районов Крайнего Севера и Дальнего Востока, в том числе с помощью водородной энергетики, рассматривают А. Коптева и соавторы [Kopteva et al., 2021], Н.Ю. Кирсанова и соавторы [Kirsanova et al., 2018], А.С. Березиков [2019].

В качестве потенциальных зарубежных партнеров могут выступать европейские страны, прежде всего Германия, а также страны Азиатско-Тихоокеанского региона, такие как Республика Корея, Китай, Япония.

Оценивая перспективы международного сотрудничества в рамках водородных проектов России, немецкие авторы в своем исследовании пишут: «Несмотря на то что Россия по-прежнему несколько скептически относится к восхваляемому преобразовательному потенциалу водорода, она заинтересована в том, чтобы использовать свои богатства природного газа, чтобы стать ведущим экспортером этого нового энергоносителя и рассматривает Германию в качестве ключевого партнера в этих усилиях» [Zabanova, Westphal, 2021].

В декабре 2020 г. вице-премьер России по энергетике А. Новак заявил о разработке российско-германской дорожной карты по водороду и возможной реализации пилотных поставок водорода в Германию²². В апреле 2021 г. Российская Федерация и Германия подписали Декларацию о сотрудничестве в сфере устойчивой энергетики, одним из направлений которой является водородная энергетика²³. Предполагалось, что Декларация станет основой сотрудничества в сфере водородной энергетики, развития инновационных технологий и проведения научно-исследовательских работ в данной области, содействия технико-экономическому сотрудничеству заинтересованных организаций, оказания помощи

²² Baker McKenzie (2021). Russia Taking a Stand in Global Hydrogen Race. Режим доступа: <https://www.bakermckenzie.com/en/insight/publications/2021/02/russia-taking-a-stand-in-global-hydrogen-race> (дата обращения: 20.09.2022).

²³ Министерство энергетики Российской Федерации. Минэнерго России и Министерство экономики и энергетики Германии подписали Совместную декларацию о намерениях по сотрудничеству в области устойчивой энергетики. Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/20562> (дата обращения: 20.09.2022).

по привлечению инвесторов, однако сложная геополитическая обстановка и введение множественных санкций против России в 2022 г. препятствуют намеченным планам.

Также подробно изучаются возможности пилотного проекта поставки российского водорода в Японию: японский институт развития NEDO ориентирован на тестовую реализацию цепочек импортной поставки водорода в рамках «дорожной карты» — программы построения водородного общества²⁴.

Компания Research and Markets подробно рассматривает рынок основных акторов водородных проектов в России²⁵. Эксперты отмечают, что при выходе на мировой водородный рынок Россия может воспользоваться своими конкурентными преимуществами, такими как:

- значительная энергетическая база (большие запасы газа, угля, потенциал атомных электростанций, а также возобновляемых источников энергии);
- развитая нефтеперерабатывающая и химическая промышленность, в которой применяется паровая конверсия метана и электролиз;
- географическая близость к потенциальным потребителям водорода (Европа и страны Азиатско-Тихоокеанского региона);
- имеющийся научный задел;
- действующая транспортная инфраструктура.

У России есть реальные возможности создания экспортоориентированных производств низкоуглеродного («голубого») водорода из природного газа, а также экологически чистого («оранжевого» и «зеленого») водорода на базе электролиза воды с использованием атомных электростанций и возобновляемых источников энергии²⁶.

Помимо преимуществ (близость к потенциальным рынкам сбыта и наличие значительных ресурсов пресной воды) имеются и серьезные ограничения, среди которых можно выделить высокую стоимость экологически чистого водорода, отсутствие технологий улавливания, хранения и транспортировки углерода, проблемы с нормативно-правовым

регулированием водородной энергетики, неадекватность системы стандартизации и сертификации, низкий уровень инвестиционной активности в данной сфере, а также недостаточность государственной поддержки и, конечно, сложная геополитическая ситуация и мощное санкционное давление.

Еще одна «ловушка», которая может поджидать Россию как экспортера водорода, заключается в том, что модель водородного рынка отличается от модели, например, нефтегазового рынка, которую, зачастую, предлагают брать за образец. Особенно это касается «зеленого» водорода. Основное отличие состоит в том, что, благодаря возобновляемым источникам энергии, производство «зеленого» водорода не привязано к источникам сырья. Централизованное производство водорода хотя и может обеспечить снижение себестоимости, однако это снижение может быть перекрыто затратами на транспортировку, особенно на большие расстояния. Поэтому сложно сказать, какая структура водородной энергетики — централизованная или децентрализованная — будет преобладать. От этого зависит, сможет ли Россия реализовать свои преимущества или не они будут определяющими.

Заключение / Conclusion

На основе проведенного обзора можно сделать ряд выводов. Необходимо отметить, что развитие водородной энергетики является одним из перспективных векторов углеродно-нейтрального экономического развития, нашедших отражение в стратегических документах, «дорожных картах» и множестве принимаемых и реализуемых программ и проектов наиболее развитых стран мира. В этом направлении проводится серьезная научно-исследовательская работа. Выделяются значительные суммы бюджетных средств на поддержание развития отрасли. В то же время перспективы глобального водородного рынка остаются достаточно туманными. Нет однозначного ответа, будут ли страны-потенциальные импортеры водорода покупать его за рубежом или, возможно, будут производить и потреблять его внутри своей страны. Остается открытым вопрос относительно экологичности потребляемого водорода. Будет ли востребован только «зеленый» водород, или «голубой» и «оранжевый» также будут иметь сильные позиции на рынке. Какой будет конструкция водородного рынка и на каком уровне установится равновесная цена через 10, 15 и более лет. Также сильно разнятся в зависимости от сценария прогнозные оценки емкости рынка.

²⁴ *Инфраструктурный центр EnergyNet*. Перспективы России на глобальном рынке водородного топлива. Экспертно-аналитический отчет. Режим доступа: <https://www.eprussia.ru/upload/iblock/ede/ede334adeb4c282549a71d6fec727d64.pdf> (дата обращения: 20.09.2022).

²⁵ *CISION PR Newswire* (2021). Russia Hydrogen Market Report 2021. Режим доступа: <https://www.prnewswire.com/news-releases/russia-hydrogen-market-report-2021-301335507.html> (дата обращения: 20.09.2022).

²⁶ *Совместный проект Национального нефтегазового форума и выставки «Нефтегаз»*. Водородная энергетика: точки роста. Дайджест. № 20. Режим доступа: http://oilandgasforum.ru/data/files/20_web.pdf (дата обращения: 20.09.2022).

В условиях высокой неопределенности ждать прояснения ситуации не является выходом, поскольку зачастую именно тот, кто активно действует, разрабатывая проекты, заключая международные соглашения и участвуя в мировой кооперации, встраиваясь в имеющиеся и создавая новые цепочки «производство—потребление», формирует будущий рынок, определяя его конструкцию.

Анализ перспектив развития и имеющегося потенциала России в сфере водородной энергетики позволяет сделать вывод о ее преимущественно экспортной ориентации. Однако экономическая целесообразность экспорта водорода для Российской Федерации зависит от разницы между стоимостью производства водорода внутри страны и в потенциальных странах-импортерах, а также от стоимости транспортировки водорода от производителя до потребителя. Опираясь на расчетные данные Института энергетических исследований Российской академии наук, можно заключить, что в перспективе до 2035 г. наиболее привлекательным для России будет экспорт «голубого» водорода, полученного на основе паровой конверсии метана с улавливанием и захоронением углекислого газа, а также «оранжевого» водорода, производимого с использованием электроэнергии АЭС. Однако остается открытым вопрос относительно приемлемости атомной генерации с точки

зрения политики декарбонизации. Также необходимо обратить внимание на оценку транспортных затрат для экспорта водорода, которая в настоящее время пока остается неопределенной из-за наличия нерешенных технологических проблем в этой области. Тем не менее для обеспечения устойчивой конкурентоспособности российского водорода экспортная маржа должна превышать величину транспортных издержек. В противном случае теряется экономическая целесообразность экспорта водорода. В целом же можно отметить, что для России маржинальность экспорта водорода на восточном направлении заметно выше, чем на западном, вне зависимости от выбора технологии производства водорода. Более того, большие перспективные объемы потребления также являются фактором, стимулирующим ориентацию российского экспортного потенциала на Азиатско-Тихоокеанский регион.

Развитие водородной энергетики и водородного рынка — перспективный тренд обозримого будущего, который России ни в коем случае нельзя игнорировать. Напротив, нужно активно встраиваться в формирующиеся международные структуры, оказывая влияние на создаваемую архитектуру новой отрасли в отношении ее производственно-технологического устройства, территориального размещения мощностей и конструирования модели зарождающегося рынка.

Список литературы

- Бельский А.А., Скамыин А.Н., Васильков О. С. (2020). Применение гибридных накопителей электроэнергии для выравнивания графика нагрузки предприятий // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. № 63(3). С. 212–222. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-212-222>
- Березиков С.А. (2019). Структурные изменения и инновационное развитие экономики Арктических регионов России // Записки Горного института, № 240, С. 716. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.6.716>
- Веселов Ф., Соляник А. (2022) Экономика производства водорода с учетом экспорта и российского рынка // Энергетическая политика: общественно-деловой научный журнал. № 4(170). С. 58–67. https://doi.org/10.21122/10.46920/2409-5516_2022_4170_58
- Литвиненко В.С., Цветков П.С., Двойников М.В., Буслеев Г.В. (2020). Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики // Записки Горного института. № 244, С. 428–438. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.4.5>
- Мамедов О.М. (2021). Стратегии развития водородной энергетики. Мировые достижения и планы России // Энергосбережение. № 3, С. 54.
- Мастепанов А. (2020). Водородная энергетика России: состояние и перспективы // Энергетическая политика. № 12 (154). С. 54–65. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_12154_54

References

- Ayodele T., Yusuff A., Moseithe T., Ntombela M. (2021), “Hydrogen production using solar energy resources for the South African transport sector”, *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 14, no. 6, pp. 1843–1857, <https://doi.org/10.1080/19397038.2021.1970276>
- Belsky A.A., Skamyin A.N., Vasilkov O.S. (2020), “The Use of Hybrid Energy Storage Devices for Balancing the Electricity Load Profile of Enterprises”, *ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, no. 63(3), pp. 212–22, <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-212-222>
- Berezikov S.A. (2019), “Structural changes and innovation economic development of the Arctic regions of Russia”, *Journal of Mining Institute*, no. 240, p. 716, <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.6.716>
- Derse O., Göçmen E., Yılmaz E., Erol R. (2020), “A mathematical programming model for facility location optimization of hydrogen production from renewable energy sources”, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 44, no. 3, pp. 6648–6659, <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1812769>
- Jani H.K., Kachhwaha S.S., Nagababu G., Das A., Ehyaei M. (2022), “Energy, exergy, economic, environmental, advanced exergy and exergoeconomic (extended exergy) analysis of hybrid wind-solar power plant”, *Energy & Environment*, no. 7, <https://doi.org/10.1177/0958305X221115095>
- Kirsanova N.Y., Lenkovets O.M., Nikulina A.Y. (2018), “Renewable energy sources (RES) as a factor determining the social and economic

- Ayodele T., Yusuff A., Mosele T., Ntombela M. (2021). Hydrogen production using solar energy resources for the South African transport sector // *International Journal of Sustainable Engineering*. V. 14, no. 6. Pp. 1843–1857. <https://doi.org/10.1080/19397038.2021.1970276>
- Derse O., Göçmen E., Yılmaz E., Erol R. (2020). A mathematical programming model for facility location optimization of hydrogen production from renewable energy sources // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. V. 44, no. 3. Pp. 6648–6659. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1812769>
- Jani H.K., Kachhwaha S.S., Nagababu G., Das A., Ehyaei M. (2022). Energy, exergy, economic, environmental, advanced exergy and exergoeconomic (extended exergy) analysis of hybrid wind-solar power plant // *Energy & Environment*. No. 7. <https://doi.org/10.1177/0958305X221115095>
- Kirsanova N.Y., Lenkovets O.M., Nikulina, A.Y. (2018). Renewable energy sources (RES) as a factor determining the social and economic development of the arctic zone of the Russian Federation // *Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2018, Albena, Bulgaria, 2–8 July 2018*. Sofia: STEF92 Technology OOD. V. 18. Pp. 679–686. <https://doi.org/10.5593/sgem2018/5.3/S28.087>
- Kolomeytseva A.A., Finger M.P., Krivorotov A.K. (2022). Nuclear and Hydrogen Prospects for the Russian Arctic // Salygin V.I. (ed.) *Energy of the Russian Arctic*. Pp. 459–476. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2817-8_24
- Kopteva A., Kalimullin, L., Tsvetkov, P., Soares, A. (2021). Prospects and Obstacles for Green Hydrogen Production in Russia // *Energies*. V. 14, no. 3. Pp. 718. <https://doi.org/10.3390/en14030718>
- Li J., Gao C., Lu X., Hoseyni A. (2022). A Combined Energy System Consisting of Fuel Cell, Water Electrolyzer and Solar Technologies to Produce Hydrogen Fuel and Electricity // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 44, no. 1, pp. 1173–1188. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2055680>
- Li Z., Zhang W., Zhang R., Sun H. (2020). “Development of renewable energy multi-energy complementary hydrogen energy system (A Case Study in China): A review”, *Energy Exploration & Exploitation*, vol. 38, no. 6, pp. 2099–2127. <https://doi.org/10.1177/0144598720953512>
- 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”, *Journal of Mining Institute*, no. 244, pp. 428–438. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.4.5>
- Mamedov O.M. (2021). “Hydrogen Power Development Strategies. Global achievements and Russia’s plans”, *Energoberezhnie*, no. 3, p. 54.
- Mastepanov A. (2020). “Hydrogen power engineering in Russia: state and prospects”, *Energy policy*, no. 12(154), pp. 54–65. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_12154_54
- Sarma R.N., Kumar V., Lal SR S., Reghunath M., Jayan A., Suryan A. (2022). “Wind power resource assessment and wind-hydrogen generation potential: a case study”, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2026537>
- Thurbon E., Kim S.-Y., Mathews J., Tan H. (2021). “More ‘Creative’ Than ‘Destructive’? Synthesizing Schumpeterian and Developmental State Perspectives to Explain Mixed Results in Korea’s Clean Energy Shift // *The Journal of Environment & Development*. V. 30, no. 3. Pp. 265–290. <https://doi.org/10.1177/10704965211013491>
- Zabanova Ya., Westphal K. (2021). Russia in the global hydrogen race: Advancing German-Russian hydrogen cooperation in a strained political climate // *SWP Comment*. No. 34. <https://doi.org/10.18449/2021C34>
- 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*. No. 45(56). Pp. 31353–31366. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.260>
- development of the arctic zone of the Russian Federation”, In: *Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2018, Albena, Bulgaria, 2–8 July 2018*, STEF92 Technology OOD, Sofia, Bulgaria, vol. 18, pp. 679–686. <https://doi.org/10.5593/sgem2018/5.3/S28.087>
- Kolomeytseva A.A., Finger M.P., Krivorotov A.K. (2022). “Nuclear and Hydrogen Prospects for the Russian Arctic”, In: Salygin V.I. (ed.) *Energy of the Russian Arctic*. Pp. 459–476. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2817-8_24
- Kopteva A., Kalimullin L., Tsvetkov P., Soares A. (2021). “Prospects and Obstacles for Green Hydrogen Production in Russia”, *Energies*, vol. 14, no. 3, pp. 718. <https://doi.org/10.3390/en14030718>
- Li J., Gao C., Lu X., Hoseyni A. (2022). “A Combined Energy System Consisting of Fuel Cell, Water Electrolyzer and Solar Technologies to Produce Hydrogen Fuel and Electricity”, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 44, no. 1, pp. 1173–1188. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2055680>
- Li Z., Zhang W., Zhang R., Sun H. (2020). “Development of renewable energy multi-energy complementary hydrogen energy system (A Case Study in China): A review”, *Energy Exploration & Exploitation*, vol. 38, no. 6, pp. 2099–2127. <https://doi.org/10.1177/0144598720953512>
- 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”, *Journal of Mining Institute*, no. 244, pp. 428–438. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.4.5>
- Mamedov O.M. (2021). “Hydrogen Power Development Strategies. Global achievements and Russia’s plans”, *Energoberezhnie*, no. 3, p. 54.
- Mastepanov A. (2020). “Hydrogen power engineering in Russia: state and prospects”, *Energy policy*, no. 12(154), pp. 54–65. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_12154_54
- Sarma R.N., Kumar V., Lal SR S., Reghunath M., Jayan A., Suryan A. (2022). “Wind power resource assessment and wind-hydrogen generation potential: a case study”, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2026537>
- Thurbon E., Kim S.-Y., Mathews J., Tan H. (2021). “More ‘Creative’ Than ‘Destructive’? Synthesizing Schumpeterian and Developmental State Perspectives to Explain Mixed Results in Korea’s Clean Energy Shift”, *The Journal of Environment & Development*, vol. 30, no. 3, pp. 265–290. <https://doi.org/10.1177/10704965211013491>
- Veselov F., Solyanik A. (2022). “The Economics of Hydrogen Production, Considering Exports and the Russian Market”, *Energy Policy: A Social and Business scientific journal*, no. 4(170), pp. 58–67. https://doi.org/10.21122/10.46920/2409-5516_2022_4170_58
- Zabanova Ya., Westphal K., (2021). “Russia in the global hydrogen race: Advancing German-Russian hydrogen cooperation in a strained political climate”, *SWP Comment*, no. 34. <https://doi.org/10.18449/2021C34>
- 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*, no. 45(56), pp. 31353–31366. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.260>