

Перспективы развития водородной энергетики в Российской Федерации

С.В. Разманова

Филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта, Ухта, Россия
e-mail: s.razmanova@sng.vniigaz.gazprom.ru

В настоящее время в энергетических стратегиях, представленных Японией, Республикой Южная Корея, Российской Федерацией и странами Европейского союза, водород рассматривается в качестве перспективного энергоносителя, который должен заменить ископаемое топливо (нефть, газ, уголь) и использоваться для накопления, хранения и доставки энергии в разные регионы мира. Совершенствованию водородных энергетических технологий отводится особая роль в низкоуглеродном развитии мировой экономики. Основными преимуществами водорода являются возможность его получения из различных источников и отсутствие выбросов углекислого газа при его использовании в качестве энергоносителя, что особенно актуально на фоне текущей климатической повестки. Этот энергоноситель является искусственно созданным, поскольку в природе местоорождения свободного водорода отсутствуют, поэтому водород следует воспринимать именно как «носитель» энергии, а не топливо. В работе дано обоснование целесообразности строительства приливных электростанций, развития водородных технологий и промышленных комплексов в РФ.

Ключевые слова: водород, возобновляемые источники энергии, водородная энергетика, метод электролиза воды, приливные электростанции

Для цитирования: Разманова С.В. (2023). Перспективы развития водородной энергетики в Российской Федерации. *Георесурсы*, 25(3), с. 216–226. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.3.25>

Введение

В последнем десятилетии климатическая повестка стала значимым фактором изменений в мировой экономике и энергетике. В качестве одного из ориентиров для развития отраслей мировой экономики является низкий уровень выбросов парниковых газов. Для достижения целей Парижского соглашения Российская Федерация (РФ) осуществляет «государственную политику в области климата, направленную на сокращение и предотвращение антропогенных выбросов парниковых газов, в том числе за счет расширения сфер применения энергоносителей с низким углеродным следом и внедрения наилучших доступных технологий» (Концепция, 2021). Задача формирования в РФ новой климатической политики является одним из приоритетов современного этапа социально-экономического развития страны (Жигалов и др., 2018). С учетом усиления риска глобальных климатических изменений, а также новых законодательных инициатив в отношении политики декарбонизации, принимаемых на национальном и международном уровнях, государству необходимо осуществлять проактивную упреждающую политику для достижения устойчивой долговременной конкурентоспособности и успешной интеграции отечественного бизнеса в мировой экономике (Пахомова и др., 2022).

К актуальным низкоуглеродным технологиям, продвигаемым на международную арену, относятся водородные энергетические технологии. Считается при этом,

что в перспективе роль энергоносителя сможет выполнять водород, задействованный на текущий момент в химической и нефтехимической промышленности, замещая углеводородные энергоносители. Многие мировые страны выбрали переход на водородную энергетику как наиболее эффективное средство достижения климатической нейтральности к 2050 г. Продвижению европейских стратегий в области климата и энергетической безопасности способствует созданный в 2015 г. Энергетический союз¹. В 2019 г. принят «Зеленый пакт для Европы»², который охватывал комплекс стратегий, целей и инициатив в области борьбы с изменением климата и анонсировал в качестве ориентира на 2050 г. переход европейских стран к нулевому углеродному балансу. С июля 2021 г. значительное влияние на энергетическую политику Европейского союза (ЕС) оказывает «Зеленый курс Евросоюза»³, согласно которому в качестве обязательных целей Климатического закона закреплены углеродная нейтральность ЕС к 2050 г., а также снижение выбросов парниковых газов к 2030 г. на 55%

¹Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee, the Committee of the Regions and the European Investment Bank. A Framework Strategy for a Resilient Energy Union with a Forward-Looking Climate Change Policy. EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52015DC0080>

²Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal. EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>

³Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law'). EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A32021R1119>

по отношению к уровню 1990 г. Курс на водородную энергетику зафиксирован в Национальной стратегии развития водородной энергетики Федеративной Республики Германии (ФРГ) (июнь 2020 г.). В качестве долгосрочной цели заявлено создание нейтральной с точки зрения влияния на климат экономики с сокращением выбросов CO₂ на 95% от уровня 1990 г.

В базовой водородной стратегии Японии (2017 г.) отмечается, что водород может стать ключевым энергоресурсом в обеспечении энергетической безопасности и предотвращении дальнейшего изменения климата. Стратегический энергетический план Японии на 2030 год (4th Strategic Energy Plan for 2030), утвержденный в 2020 г., кроме перехода на возобновляемые источники энергии предусматривает создание так называемого «водородного общества» (Корнев, 2021; Мастепанов, Хирофуми, 2020а; Мастепанов, Хирофуми, 2020б).

Ученые отмечают, что роль возобновляемых источников энергии, таких как солнечная энергия, энергия ветра, энергия волн и приливов, в течение следующих нескольких десятилетий будет возрастать. Вполне закономерно, что спрос на водородное топливо, производимое на основе энергии ВИЭ, также будет увеличиваться (Chun et al., 2014; Chung et al., 2014; El-Shafie et al., 2019; Fazelpour et al., 2016; Iordache et al., 2013; Stygar, Brylewski, 2013).

Считается, что концепция «водородной экономики» возникла в начале 70-х годов XX в. в ответ на первый нефтяной кризис (Мастепанов, 2020; Moliner et al., 2016). Нет никаких сомнений в том, что водород будет играть важную роль в энергетическом сценарии будущего, но данный энергоресурс следует рассматривать не с точки зрения доминирования, а скорее в конкуренции и взаимодополняемости с другими видами энергоносителей (Мастепанов, 2020; Moliner et al., 2016; Гриб, 2019; Литвиненко и др., 2020; Мастепанов, 2022). В Энергетической стратегии РФ обозначено, что «задачей водородной энергетики является развитие производства и потребления водорода, а также вхождение Российской Федерации в число мировых лидеров по его производству и экспорту»⁴. Адаптированные к условиям отечественного бизнеса цели развития тысячелетия в рамках стратегии устойчивого развития человечества Организации объединенных наций (ООН) предполагают, что во всех аспектах экономики РФ должны превалировать такие принципы устойчивого развития, как экономика замкнутого цикла и эффективное использование ресурсов. РФ также на протяжении последних 80 лет развивает водородные технологии, имеет большой опыт многолетних исследований и серьезный потенциал в этой области (Мастепанов, 2022; Тимофеев, 2019; Филиппов и др., 2020; Кантюков и др., 2021). Еще в 70-е годы XX в. в рамках государственной программы СССР «Водородная энергетика» была разработана концепция водородной энергетики, основанная на производстве газа за счет энергии, вырабатываемой на атомных электростанциях (АЭС) (Колбанцев и др., 2021; Мастепанов, 2020). В ряде работ рассмотрены и проанализированы различные технологии производства водорода с сопоставлением себестоимости

и эффективности различных методов его получения (Веселов, Соляник, 2022; Холкин, Чаусов, 2021; Dincer, 2018; Badgett et al., 2022; Ball, Weeda, 2016; Kayfeci et al., 2019; Sojoudi et al., 2021).

Необходимо также отметить, что в современном мире чрезвычайно сильно влияние на мировую экономику оказывает геополитическая ситуация. В основу развития мировой энергетики заложен целый комплекс меняющихся факторов, большая часть которого находится вне энергетической отрасли и относится к сферам политики, экономики и социальной динамики. Более ста лет обеспечение доступа к углеводородам является краеугольным камнем мировой политики. По мнению американского политолога Д. Ергина, нефтяной бизнес включает «90 процентов политики и 10 процентов нефти» (Ергин, 2022).

Еще в начале XX в. развитие технологий в части использования ископаемых природных ресурсов при непосредственном лоббировании компаний, которые сегодня относятся к так называемым супермейджорам (Shell, BP, Chevron, ExxonMobile и Royal Dutch Shell), привело в массовому использованию углеводородов для получения энергии. В качестве альтернативных идей рассматривались источники ветровой и солнечной энергии, но эти идеи не получили должного развития. К примеру, солнечные батареи впервые нашли свое применение в рамках космических программ США и СССР в конце 50-х годов прошлого века. Только при снижении себестоимости технология стала использоваться на Земле, однако ее применение имеет определенные ограничения. Наиболее очевидным недостатком солнечной и ветровой энергии является прерывистый характер генерации энергии, вследствие которого энергосети подвергаются повышенному риску отклонения частоты тока. «Зеленая энергетика» в том виде, в каком она преподносится сейчас, представляет собой тупиковое направление в энергоснабжении. К сожалению, к уже имеющемуся списку стран, сделавших ставку на «зеленую энергетику» и получивших негативный опыт (Гана и Шри Ланка), активно пытаются присоединиться европейские страны (Чернова, Разманова, 2022а; Чернова, Разманова, 2022б).

Цель настоящей работы состоит в обосновании целесообразности развития в РФ центров по производству «зеленого» водорода на базе строительства приливных электростанций (ПЭС). Сквозными для проводимого исследования стали следующие базовые вопросы: во-первых, каков основной драйвер развития водородной энергетики в РФ, во-вторых, должно ли производство водорода из возобновляемых источников располагаться в непосредственной близости от рынков сбыта.

Методы

В работе использовались данные статистической отчетности по Европейскому союзу, статистические книги Китайской Народной Республики (КНР) (1991–2020 гг.), отчеты энергетических корпораций, международных консалтинговых компаний. Анализу подлежало значительное количество научных работ и интернет-источников. Информационной базой исследования стали научные труды как отечественных, так и зарубежных ученых по обозначенной проблематике.

⁴Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года»

Методика исследования состоит из следующих этапов.

Этап 1. Рассмотреть существующий терминологический аппарат в области технологий производства водорода.

Этап 2. Оценить текущую и перспективную себестоимость различных способов производства водорода.

Этап 3. Обозначить перспективы глобального водородного рынка и выявить проблемные аспекты.

Этап 4. Проанализировать преимущества создания центров по производству «зеленого» водорода в РФ.

Водородная экономика: терминология, сравнительная оценка

Под термином «водородная экономика» понимают экономику, основанную на использовании в качестве главного источника энергии «чистого» водорода, производство которого не сопровождается выбросами углекислого газа (Макроэкономический обзор..., 2019). Несмотря на то, что термин «водородная экономика» трактуется сегодня как «образ будущего для глобальной экономики, в которой водород становится новым глобальным энергоносителем» (Митрова и др., 2019), поскольку начинает выполнять роль, сопоставимую со значением ископаемых нефти, газа, угля, а также энергии, вырабатываемой за счет гидроэлектростанций (ГЭС), АЭС, ВИЭ и биоэнергетики, автор настоящей статьи не склонен полагать, что подобная роль водорода когда-либо будет реализована в полной мере. Скорее следует говорить о «водородной энергетике», предполагающей развитие производства и потребления водорода. Сегодня водородная энергетика рассматривается как ключевое решение для борьбы с глобальным изменением климата.

Эксперты в области водородной энергетики (из их оценок складывается впечатление, что десятилетием ранее они были экспертами по сланцевому и сжиженному природному газу) активно используют понятия «зеленого», «бирюзового» водорода и других, не менее красочных терминов применительно к потенциальному энергоносителю, который в реальности является бесцветным и ничего общего с предлагаемой палитрой не имеет.

В табл. 1 приведена наиболее распространенная «цветовая» терминология, применяемая сегодня экспертами в области водородной энергетики для обозначения соответствующей градации водорода в зависимости от типа производства. Отметим, что официально опубликованные энергетические стратегии ЕС и ФРГ «цветовой» классификации не содержат, но подразделяются на типы по степени влияния процесса производства на окружающую среду.

Скорее всего, подобная классификация водорода по типам производства со временем будет скорректирована. Однако ее содержательная часть останется прежней – нацеленность на производство «зеленого», чистого и возобновляемого водорода.

В России, согласно Концепции развития водородной энергетики (Концепция, 2021), до 2024 г. предполагается создание водородных кластеров и реализация пилотных проектов для достижения экспорта водорода в размере 0,2 млн т к 2024 г., а также производство метано-водородных смесей, турбоагрегатов, способных работать на водороде, и водородного транспорта. ПАО «Газпром» разрабатывает технологию производства «голубого» и «бирюзового» водорода, тогда как АО «Росатом» совершенствует

технологию производства «оранжевого/желтого» водорода. На VI Восточном экономическом форуме ПАО «Газпром», АО «Росатом» и власти Сахалина (после успешного технико-экономического исследования проекта) заключили соглашение о взаимодействии при строительстве завода по производству водорода из природного газа. Корпорации «НОВАТЕК», «Роснефть», «Ростех», институты Российской академии наук также активизировали разработку технологических решений и маркетинговые исследования в области производства и экспорта водорода (Мастепанов, 2020; Мастепанов, 2022).

Отечественные и зарубежные ученые отмечают, что электролиз как средство преобразования избыточной электроэнергии из возобновляемых источников в водород (с подземным хранилищем или без него) в современных условиях является очень дорогостоящим процессом. Это связано с тем, что «зеленый» водород, получаемый при электролизе, не может конкурировать по стоимости с другими способами производства водорода (Badgett et al., 2022; Ball, Weeda, 2016). Для более точного определения различий в себестоимости производства водорода в зависимости от типа его производства необходимо оценить различия в стоимости капитальных и эксплуатационных затрат. При этом общие финансовые допущения, такие как внутренние нормы доходности, налоговые ставки и коэффициенты амортизации, остаются одинаковыми для всех рассмотренных технологий.

Анализ затрат на производство водорода в США показывает, что себестоимость электролитически генерируемого водорода значительно выше за счет высокой доли сторонней электроэнергии, потребляемой при его производстве (Sojoudi et al., 2021). В частности, при производстве водорода путем электролиза за счет ВИЭ формируются самые высокие производственные затраты на килограмм водорода: при ветровых ВИЭ – от 5,89 до 6,03 долл./кг, при солнечных ВИЭ – от 5,78 до 23,27 долл./кг (Kayfeci et al., 2019). Сравнение выбранных вариантов производства водорода позволило исследователям (Dincer, 2018) сделать вывод о том, что с точки зрения энергетической эффективности варианты, работающие на ископаемом топливе и биомассе, наиболее близки к идеальным характеристикам.

Сотрудниками Института энергетических исследований РАН (Веселов, Соляник, 2022) проведен расчет себестоимости производства водорода с применением различных технологий в России. Результаты представлены в табл. 2.

Согласно оценкам экспертов ИНЭИ РАН, на текущий момент наименее затратным способом производства водорода является паровая конверсия метана (1,7 долл./кг). Электролиз от ветровой и солнечной генерации существенно уступает остальным способам производства по экономической эффективности. В перспективе по данной категории ожидается двукратное снижение себестоимости (за счет удешевления электролизеров и ВИЭ-установок). Однако удельная дисконтированная стоимость 1 кг «зеленого» водорода останется в 2,5–3,5 раза выше, чем для «голубого» водорода (Веселов, Соляник, 2022).

⁵Statista – 2021. <https://www.statista.com/statistics/1086695/green-hydrogen-cost-development-by-country>

Классификационный признак	Тип производства	Характеристики	Терминология, применяемая в Европейской классификации водорода по способу производства
Зеленый	Метод электролиза воды, с использованием электроэнергии от любых возобновляемых источников энергии	При производстве «зеленого» водорода отсутствует углеродный след, а остальные экологические издержки сведены до минимума	Возобновляемый водород (<i>Renewable hydrogen</i>). Термин равнозначен термину «зеленый водород» Чистый водород (<i>Clean hydrogen</i>). Термин является равнозначным термину «возобновляемый водород» Электролизный водород (<i>Electricity-based hydrogen</i>) – водород, полученный при помощи электролиза без привязки к источнику электроэнергии Низкоуглеродный водород (<i>Low-carbon hydrogen</i>)
Розовый/красный/оранжевый/желтый	Метод электролиза воды, однако, в качестве источника электроэнергии для обеспечения процесса выступает атомная электростанция	При производстве «оранжевого/желтого» водорода отсутствует углеродный след, но создается тепловое загрязнение окружающей среды, которое требует утилизации радиоактивных отходов	Низкоуглеродный водород (<i>Low-carbon hydrogen</i>) представляет собой водород, произведенный со значительно сниженными выбросами парниковых газов в течение всего жизненного цикла по сравнению с существующим производством ископаемого водорода. В данную категорию включается как ископаемый водород с улавливанием углерода, так и электролизный водород
Бирюзовый	Метод пиролиза путем разложения метана на водород и твердый углерод	При производстве «бирюзового» водорода выбросы в атмосферу отсутствуют, поскольку углерод получается не в виде углекислого газа, а в практически чистом твердом виде (сажа), в связи с чем может быть либо утилизирован, либо использован как сырье для промышленности	Низкоуглеродный водород (<i>Low-carbon hydrogen</i>)
Серый	Метод паровой конверсии метана, где исходным сырьем является природный газ	При производстве «серого» водорода в ходе химической реакции выделяется углекислый газ в тех же объемах, что и при сгорании природного газа, плюс расходы энергии на конверсию	Ископаемый водород (<i>Fossil-based hydrogen</i>) представляет собой водород, произведенный из ископаемого топлива по классической технологии Низкоуглеродный водород (<i>Low-carbon hydrogen</i>)
Голубой	Метод паровой конверсии метана при условии, что углерод улавливается	При производстве «голубого» водорода наблюдается двукратное сокращение выбросов углерода по отношению к традиционным способам («серый» и «коричневый» водород)	Ископаемый водород с улавливанием углерода (<i>Fossil-based hydrogen with carbon capture</i>) представляет собой водород, произведенный из ископаемого топлива по классической технологии, с условием выполнения мероприятий по улавливанию углерода и его соединений Низкоуглеродный водород (<i>Low-carbon hydrogen</i>)
Коричневый	В качестве исходного сырья в производстве используется бурый уголь	При производстве «коричневого» водорода образуется синтез-газ – смесь углекислого газа, окиси углерода, водорода, метана и этилена, а также небольшое количество других попутных газов. Отнесен к наиболее неэкологичным	Ископаемый водород (<i>Fossil-based hydrogen</i>)

Табл. 1. Классификация водорода по типам производства

В целом ожидаемое значение удельной себестоимости «зеленого» водорода к 2050 г., по оценке Statista⁵, будет находиться в диапазоне 1,25–2,75 долл./кг (рис. 1).

Согласно докладу Мирового Энергетического Агентства (МЭА), к 2050 г. мировой спрос на водород должен достичь 528 млн т (в 2020 г. объем составил 87 млн т). Доля потребления водорода в структуре мирового рынка ожидается в размере 18%, включая потребление «зеленого» водорода, на который прогнозируется 10% мирового рынка.

Сегодня основным сырьем для водорода преимущественно являются углеводороды. Более 68% водорода вырабатывают за счет природного газа, 16% – за счет нефти, 11% приходится на уголь и 5% получают из воды способом электролиза (Розенцвейг, 2022).

В настоящее время сфера использования водорода охватывает химическую промышленность (63%), нефтепереработку (31%), обрабатывающую промышленность (5%). И только менее 1% водорода используется в качестве топлива и в полупроводниковой промышленности

Классификационный признак (способ производства)	Значение удельных дисконтированных затрат на производство водорода, долл./кг	
	2020–2025	2030–2035
Зеленый (солнечные ВИЭ)	> 12,0	> 6,0
Зеленый (ветровые ВИЭ)	7,8	9,5
Красный (АЭС)	3,2	2,3
Оранжевый (ГЭС)	3,5	3,0
Голубой (паровая конверсия метана)	1,7	1,6

Табл. 2. Сравнение себестоимости отечественных технологий производства водорода

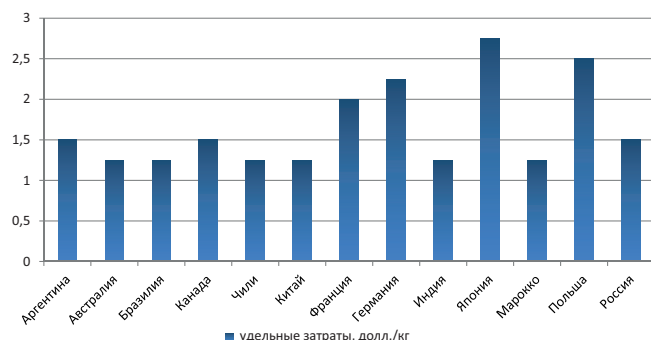


Рис. 1. Прогноз себестоимости «зеленого» водорода к 2050 г. Источники: Statista (Statista – 2021. <https://www.statista.com/statistics/1086695/green-hydrogen-cost-development-by-country>)

(Розенцвиг, 2022). В Национальной стратегии развития водородной энергетики ФРГ указано, что водороду, на который будут переведены транспортная, металлургическая и нефтехимическая отрасли, в будущем этих отраслей будет отведена ведущая роль. Водород активно пытаются использовать в транспортной отрасли Японии, Республика Южная Корея, ФРГ (легковые автомобили), Французская Республика (железнодорожный транспорт). Однако водород остается крайне неудобным для использования на транспорте газом, поскольку его невозможно хранить продолжительное время, он просачивается в атмосферу и, соответственно, приносит убытки владельцам, использующим такой транспорт.

Эксперты также отмечают, что перспективы глобального водородного рынка явно не прослеживаются и оценить будущие объемы производства и потребления водорода в мировой экономике сегодня достаточно проблематично (Гриб, 2019; Литвиненко и др., 2020).

Предварительный анализ объемов мирового водородного рынка и ожидаемого прироста импорта водорода был проведен экспертами ACIL ALLEN Consulting и Инфраструктурного центра «Энерджинет» (Холкин, Чаусов, 2021) (рис. 2, 3). Было также отмечено, что мировая архитектура будущего рынка водорода находится под сомнением, поскольку участие в нем европейских стран в качестве импортеров вызывает вопросы. Причина состоит в продвижении проектов производства «зеленого» водорода методом электролиза в основных потенциальных центрах потребления водорода – Германии, Нидерландах, Великобритании. В то же время оперативная реакция руководства РФ и отечественных частных инвесторов в области дальнейших перспектив этого рынка также

представляется своевременной, поскольку сегодня этот рынок формируют его потенциальные участники, число которых в последние годы существенно возросло.

Отметим, что ряд вопросов до сих пор остается без ответа. Обозначим ключевые проблемные аспекты развития глобального водородного рынка:

- каковы будут объемы мировых импортных поставок водорода на перспективу 10 или 15 лет;
- при каком уровне цен на водород установится равновесие на рынке и какова будет в перспективе конструкция водородного рынка;
- проявится ли тенденция производства водорода странами исключительно для внутреннего потребления;
- каким будет доминирующий способ производства для выработки водорода;
- сохранит ли «желтый» и «голубой» водород сильные позиции на рынке или же рынок будет отдавать предпочтение только «зеленому» водороду?

От ответов на эти вопросы будет зависеть будущая архитектура мировой водородной энергетики.

Российская водородная стратегия, в рамках которой предполагается развивать отечественные водородные технологии и осуществлять мегапроекты по строительству объектов для получения «зеленого» и «бирюзового» водорода, в первую очередь должна быть ориентирована на внутренний рынок и дружественные внешние рынки. Перспективы отраслевой водородной структуры пока неясны, существует высокая вероятность копирования модели газовой отрасли. Существенную опасность при реализации водородной стратегии представляет длительное

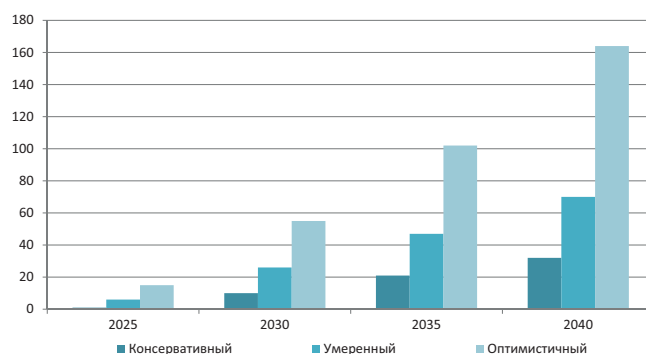


Рис. 2. Прогноз мирового рынка водородного топлива, млрд долл. в год. Источники: ACIL ALLEN Consulting, анализ ИЦ «Энерджинет» (Холкин, Чаусов, 2021)

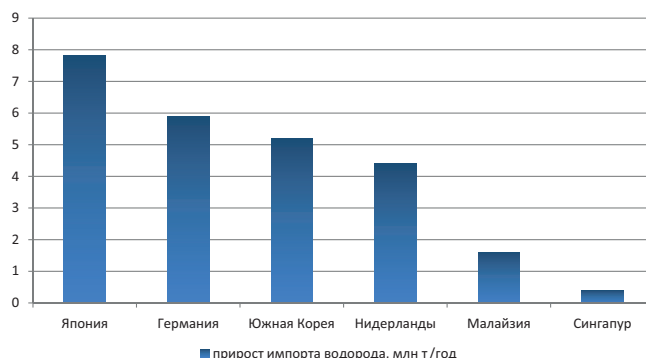


Рис. 3. Ожидаемый годовой прирост импорта водорода к 2040 г. (к показателям 2020 г.), млн т. Источник: анализ ИЦ «Энерджинет» (Холкин, Чаусов, 2021)

планирование стратегического действия, оценки инвестиционных возможностей и их последующей реализации (по аналогии с рынком сжиженного природного газа, на который РФ вышла со значительным опозданием), поскольку в таком случае будет возникать эффект отложенного действия от применения водородных технологий.

От «серого» к «голубому» и «зеленому» водороду: российские перспективы

В предыдущем разделе мы отметили способы генерации водорода, начиная от газификации угля, паровой конверсии и пиролиза метана до электролиза воды. В принципе можно получать его из водорослей или твердых бытовых отходов. Однако технология газификации угля связана с большим количеством вредных выбросов в атмосферу. На данный момент это один из наиболее проверенных способов, с помощью которого в мире производится порядка 25% водорода. Твердые бытовые отходы и водоросли в качестве сырья не совсем подходят для развития водородных производств, поэтому в качестве источников сырья для производства водорода остаются метан и вода.

На метан, являющийся товарным продуктом переработки углеводородов, приходится 75% выработки аммиака. На нефтеперерабатывающих заводах метан используется в качестве топлива и источника водорода для каталитического крекинга и гидроочистки бензина и дизеля; на газоперерабатывающих заводах – для синтеза метанола, применяемого в качестве реагента гидратообразования и в химической промышленности; в газохимии – в синтезе аммиака, необходимого для выпуска азотных удобрений и карбамида.

Основным преимуществом водорода, получаемого из метана, можно назвать его себестоимость – 1,7 долл./кг (табл. 2), тогда как водород, получаемый при электролизе воды, относится к наиболее дорогим, его удельная себестоимость находится в диапазоне 3,5–12 долл./кг. Однако, как показывают недавние события в мире, многое зависит от того, какой источник для производства электроэнергии будет использован (традиционный или ВИЭ) и сколько на региональных рынках будет стоить природный газ.

Сегодня РФ в большей степени ориентирована на производство водорода из природного газа или на базе АЭС, поэтому отечественные корпорации пока не проявляют особого интереса к производству «зеленого», «бирюзового» или «голубого» водорода. Хотя государственная стратегия развития водородной энергетики уже обозначила создание центров по производству «зеленого» водорода и аммиака с использованием энергии, вырабатываемой ПЭС в Арктическом регионе и на Дальнем Востоке.

Следует также отметить, что РФ делает упор именно на расширение потенциальных источников энергоресурсов. В новой реальности есть место как возобновляемым, так и ископаемым источникам энергии, поскольку это позволяет поддерживать энергетическую безопасность и устойчивость экономики России и стран, в которые она поставляет энергоресурсы. Таким образом, Россия, располагающая огромными запасами углеводородов, сохраняет привлекательность как источник этих ресурсов, но вместе с тем планирует участвовать в производстве водорода в масштабах мировой экономики.

Ключевое условие экономической целесообразности строительства приливных электростанций заключается в том, что перепад уровней воды должен составлять не менее 4 м, поэтому ПЭС строятся в местах самого большого повышения уровня моря. Крупнейшая в мире ПЭС, введенная в эксплуатацию в 2011 г., находится в Республике Южная Корея и обладает установленной мощностью 254 МВт. Приливными ЭС располагают также КНР, Французская Республика и Канада.

В России самые высокие приливы наблюдаются в районе Пенжинской Губы (Охотское море), на побережье Мезенского залива (Белое и Баренцево моря) и доходят до отметок до 13 и 10 м соответственно.

В настоящее время в РФ насчитывается несколько приливных электростанций, находящихся на стадии эксплуатации или проектирования: Кислогубская ПЭС, Малая Мезенская ПЭС, Северная ПЭС, Пенжинская ПЭС, Тугурская ПЭС (табл. 3). Все перечисленные станции находятся в северных широтах: на территории Арктической зоны РФ (Белое и Баренцево море), а также на п-ове Камчатка и в Хабаровском крае (Охотское море).

Получение электричества с использованием энергии приливов в РФ не приняло массовый характер из-за экономической нецелесообразности, обусловленной устаревшими техническими решениями. К примеру, действующая в РФ с 1968 г. Кислогубская ПЭС не обеспечивает энергией даже процесс собственной эксплуатации и состоит на государственном учете только как памятник науки и техники. В то же время экспериментальная установка «Малая Мезенская ПЭС» (2007 г.) при проведении

Название ПЭС	Основные характеристики
1. Действующие	
1.1. Кислогубская	
Электрическая мощность	1,7 МВт
Тип турбин	ортогональные
Количество турбин	2 комплекта
Количество генераторов	2 ед.
Открытое распределительное устройство (ОРУ)	35 кВ
1.2. Малая Мезенская	
Электрическая мощность	1,5 МВт
Тип турбин	ортогональные
Количество турбин	1 комплект
Количество генераторов	1 ед.
2. Перспективные	
2.1. Северная	
Проектная мощность	12,0 МВт
Годовая выработка электроэнергии	23,8 млн кВт*ч
2.2. Пенжинская	
Проектная мощность	21,4 ГВт
Годовая выработка электроэнергии	50,0–240 млрд кВт*ч
2.3. Тугурская	
Проектная мощность	8,0 ГВт
Годовая выработка электроэнергии	20,0 млрд кВт*ч

Табл. 3. Основные технические характеристики действующих и перспективных приливных электростанций РФ

испытаний подтвердила КПД энергоблока в размере 70%.

Эксперты Инфраструктурного центра «Энерджинет» отмечают, что «накопление энергии ВИЭ в виде водорода позволит существенно (на 15–20%) снизить затраты на энергоснабжение на множестве изолированных территорий страны, особенно – в Арктике, на Камчатке, Курилах, в Иркутской и Томской областях, в Якутии» (Холкин, Чаусов, 2021).

Электроэнергию ПЭС можно использовать для преобразования угля в горючие углеводороды (синтетическую нефть, метанол); строительства линий электропередач в Хабаровском и Приморском краях; передачи электроэнергии в КНР, США, Японию и другие страны; производства водорода на п-ове Камчатка. Наиболее перспективным представляется производство водорода в Камчатском крае. Строительство ПЭС позволит организовать экономически эффективное производство водорода, который затем будет связан углеродсодержащим веществом с целью получения жидкого топлива (Шамин, Шевелева, 2021). В будущем при развитии и совершенствовании технологий водородной энергетики водород может быть использован в чистом виде.

Таким образом, Пенжинская и Тугурская ПЭС должны выступать в качестве самостоятельных энергосистем, ориентированных на производство электроэнергии:

- для обеспечения энергетической безопасности (в том числе за счет роста внутреннего потребления) Дальневосточного региона;
- для экспорта электроэнергии в энергодефицитные страны, граничащие с РФ (в первую очередь в КНР);
- для производства водорода посредством электролиза воды и реализации его на внутреннем и внешнем рынках.

Новые ПЭС будут иметь особое значение для социально-экономического развития регионов, так в перспективе это:

- создание новых рабочих мест на территориях Хабаровского края и п-ова Камчатка за счет строительства и ввода в эксплуатацию промышленных комплексов ПЭС, производств водорода и аммиака, а также развития рынка жилья, соответствующей социальной и транспортной инфраструктуры;
- повышение инвестиционной привлекательности региона;
- расширение внутреннего и внешнего туризма в Дальневосточном регионе (ДВО).

В 2021 г. КНР, крупнейший источник парниковых газов, вызывающих потепление климата, принял на себя обязательства по углеродной нейтральности, обозначив двойные цели по выбросам CO_2 – достигнуть пика к 2030 г. и нейтралитета к 2060 г. (Steblyanskaya et al., 2022). Опубликованные данные Национального бюро статистики КНР свидетельствуют о прогрессе страны в области перехода на низкоуглеродные технологии. КНР стремится к тому, чтобы к 2025 г. общее потребление возобновляемой энергии в стране достигло 1 млрд т условного угольного эквивалента. Уже к 2030 г. КНР рассчитывает увеличить общую ветровую и солнечную мощность электростанций до 1200 ГВт, что практически в два раза больше текущих значений, за счет строительства крупных баз возобновляемой энергии в северо-западных пустынных

регионах (Qin et al., 2021). Национальная комиссия по развитию и реформам КНР (National Development and Reform Commission, NDRC) заявила, что на возобновляемые источники энергии будет приходиться более половины нового роста потребления энергии в период 2021–2025 гг., однако у КНР в течение этого периода есть возможность построить электростанции, работающие на ископаемом топливе, поскольку Китайская Народная Республика сосредоточена на усилении собственной энергетической безопасности (Niu et al., 2021).

КНР потенциально заинтересована в приобретении электроэнергии и водорода в ДВО (Erokhin, Tianming, 2022). Но КНР рассматривает приобретение водорода в ДВО на конкурентных условиях, наравне с вариантами его приобретения в других странах. Расширяя перспективное сотрудничество по линии водородной энергетики, КНР будет решать комплекс задач в части энергичного развития экологически чистых отраслей промышленности и охраны окружающей среды, расширения масштабов экологически чистых отраслей промышленности, развития отраслей энергосбережения, экологически чистого производства и экологически чистой энергетики. К примеру, провинция Хэйлунцзян, расположенная на северо-востоке КНР, сегодня является ее старопромышленным регионом, она генерирует выбросы углекислого газа, сокращение которых позитивно отразится на достижении целей КНР в области изменения климата. К естественным экономическим преимуществам провинции относятся прямое железнодорожное и автомобильное сообщение с российскими приграничными регионами Дальнего Востока и Забайкалья, а также значительный по масштабу и структуре природно-ресурсный потенциал. Польза сотрудничества КНР и РФ в области водородной энергетики объясняется не только укреплением экологической составляющей в энергетической системе КНР, но и достаточно удачной логистикой в части будущих экспортных поставок водорода с относительно небольшим транспортным «плечом». Эксперты ИНЭИ РАН прогнозируют, что маржинальность экспорта водорода в восточном направлении окажется заметно выше, чем в западном, независимо от технологии производства водорода (Холкин, Чаусов, 2021). Для водорода, полученного на основе электролиза с использованием ВИЭ, диапазон убытков/прибыли составляет –0,5...0,2 долл./кг при экспорте в Европу и около 0,8–2,1 долл./кг при экспорте в Японию (границы диапазонов определяются стоимостью производства водорода от разных технологий ВИЭ). Отметим, что в настоящее время оценка транспортных затрат для экспорта водорода остается неопределенной из-за наличия технологических барьеров в этой сфере.

Обсуждение результатов

Проведенный анализ показал, что на текущий момент основными факторами роста мирового спроса на водород является развитие химической, нефтегазоперерабатывающей, обрабатывающей и транспортной отраслей. Достичь существенного снижения выбросов CO_2 в рамках существующих технологий пока представляется невозможным, поэтому в настоящее время перспективные проекты реализуются по двум направлениям: замена углеводородного сырья водородом и применение технологий улавливания

CO₂ («бирюзовый» и «голубой» водород). Большинство способов производства водорода к настоящему времени не достигло технологической зрелости, но соответствующие технические и технологические решения будут найдены, когда в обществе произойдет понимание того, как в действительности следует разумно применять водород в качестве источника энергии.

Будущая архитектура мировой водородной энергетики пока не имеет четких очертаний, что, безусловно, несет с собой высокие риски для инвесторов. Сложно в полной мере определить мировой объем потребления водорода на перспективу, уровень себестоимости товарной продукции. Если механизм ценообразования будет определяться по аналогии с ценами на углеводороды и прочие энергоносители, то для конечного потребителя водорода цена может оказаться чрезвычайно высокой. И это, несмотря на совершенствование и удешевление технологий производства, хранения и транспорта водорода, которое, по обещаниям экспертов, обязательно произойдет в перспективе.

Ключевым катализатором развития водородной энергетики в РФ должен стать внутренний рынок. Для этого необходимо определить перспективы развития водородной энергетики в российских регионах и потребности страны в водороде с учетом государственной энергетической безопасности, чтобы впоследствии обеспечить надежность поставок на внешние рынки.

Строительство заводов по производству водорода в РФ необходимо осуществлять в потенциально крупных центрах его потребления с возможностью установок паровой конверсии и пиролиза на существующих нефтеперерабатывающих предприятиях, комплексов электролиза воды на атомных и гидроэлектростанциях, которые изначально расположены вблизи крупных городов. К примеру, АО «Росатом» планирует к 2025 г. создать и запустить испытательный комплекс электролиза воды на Кольской атомной электростанции. В рамках проекта компанией проектируется ядерный реактор для синтеза водорода без эмиссии CO₂ в атмосферу.

Российским нефтегазовым компаниям необходимо подготовиться к производству водорода из возобновляемых источников в непосредственной близости от рынков сбыта, в первую очередь для стран, имеющих с РФ общую границу. Растущие потребности КНР в электроэнергии можно будет удовлетворять за счет не только экспорта электроэнергии, но и поставок водорода в качестве экологичного энергоносителя. В среднесрочной перспективе основным ограничением для расширения поставок газа в КНР является отсутствие технологий хранения и транспортировки водорода.

По мере развития внутреннего рынка российский бизнес должен реализовывать международные проекты в части создания водородной инфраструктуры (к примеру, пиролизные установки, сети водородных заправочных станций), разрабатывать отраслевые стандарты, принципы конкурентного ценообразования, предлагать концепции сбыта водорода и продуктов его производства (углерод, аммиак).

Таким образом, у РФ есть существенный потенциал для производства «зеленого» водорода с помощью возобновляемых источников энергии. Ученые полагают, что протяженная береговая линия и оффшорный потенциал

позволят производить «зеленый» водород не только для внутреннего, но и для внешнего рынка (Пахомова и др., 2022). При этом объем «зеленого» водорода на экспорт к 2035 г. может составить от 2 до 12 млн т.

Заключение

Политика в области климата и снижения углеродных выбросов в атмосферу, продвигаемая развитыми странами, представляет водород в качестве энергоносителя, способного в перспективе занять собственную нишу в мировой структуре энергоресурсов. Сегодня водород является оптимальным рычагом декарбонизации для многих отраслей, если принимать во внимание тот факт, что рано или поздно все промышленные компании попадут под углеродный налог. Для разработки и внедрения отечественных технологий водородной энергетики требуется развитие научно-технологической инфраструктуры, объединяющей носителей компетенций в области водородной энергетики, и создание на их основе лучших технологий производства, хранения и транспортировки водорода. Строительство ПЭС на Камчатке и развитие водородного кластера на Сахалине, как ожидается, к 2050 г. могут обеспечить ежегодный экспорт из России экологически чистых видов водорода на 100 млрд долл. Эксперты отмечают, что, построив только Пенжинскую ПЭС, «российские власти получают столько углеродных кредитов, что все поставки ископаемого топлива из России сразу станут углеродно-нейтральными...» (Бахтина, 2022). Предпосылки для перехода на водородную энергетику в РФ достаточно очевидны. Это огромная минерально-сырьевая база углеводородного сырья, наличие атомных электростанций, гидроэлектростанций, а в перспективе и ПЭС, квалифицированные научные и инженерные кадры, а также серьезная институциональная поддержка.

Дальнейшими направлениями развития настоящего исследования является сравнительный анализ эффективности технологий производства «голубого» и «бирюзового» водорода, наиболее перспективных в отечественной газовой отрасли.

Финансирование/Благодарность

Исследование выполнено в рамках проекта Министерства науки и технологий КНР «Потенциальное сотрудничество между Китаем и Россией в области энергетики в рамках цели «Углеродная нейтральность»: новые методы, новые горизонты и новые стратегии» (№ DL2021180001L).

Автор выражает благодарность рецензентам за ценные замечания, позволившие улучшить статью.

Литература

- Бахтина О. (2022). Оговорочка по Фрейду В. Путина или Пенжинская приливная электростанция. *Neftegaz.RU*. URL: <https://neftegaz.ru/news/energy/700447-ogovorochka-po-freydu-v-putina-ili-penzhinskaya-prilivnaya-elektrostantsiya>
- Веселов Ф., Соляник А. (2022). Экономика производства водорода с учетом экспорта и российского рынка. *Энергетическая политика*, (4), с. 58–67. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2022_4170_58
- Гриб Н. (2019). Водородная энергетика: мифы и реальность. *Нефтегазовая вертикаль*, 19, с. 61–69.
- Ергин Д. (2022). Добыча: Всемирная история борьбы за нефть, деньги и власть. М.: Альпина Паблшер, 960 с.
- Жигалов В.М., Подкорытова О.А., Пахомова Н.В., Малова А.С. (2018). Взаимосвязь энергетической и климатической политики:

- экономико-математическое обоснование рекомендаций для регулятора. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика*, 34(3), с. 345–368. <https://doi.org/10.21638/spbu05.2018.301>
- Кантюков Р.Р., Запечалов Д.Н., Вагапов Р.К. (2021). Анализ применения и воздействия углекислотных сред на коррозионное состояние нефтегазовых объектов. *Записки Горного института*, 250, с. 578–856. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.11>
- Колбанцев Ю.А., Коношин М.В., Калютник А.А. (2021). Применение методики вероятностной оценки для стоимостного расчета вовлечения АЭС в процесс промышленного производства водорода. *Известия вузов. Проблемы энергетики*, 23(2), с. 14–26. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-2-14-26>
- Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 5 августа 2021 г. № 2162-р). 22 с.
- Корнев К.А. (2021). «Зеленый водород» в Восточной Азии. *Геоэкономика энергетики*, 15(3), с. 98–115. https://doi.org/10.48137/2687-0703_2021_15_3_98
- 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, с. 428–438. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.4.5>
- Мастепанов А.М. (2020). Водородная энергетика России: состояние и перспективы. *Энергетическая политика*, (12), с. 54–65. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_12154_54
- Мастепанов А. (2022). Россия на пути к углеродной нейтральности. *Энергетическая политика*, (1), с. 94–108. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2022_1167_94
- Мастепанов А.М., Хирофуми А. (2020а). Водородная стратегия Японии. *Энергетическая политика*, (11), с. 62–73. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_11153_62
- Мастепанов А.М., Хирофуми А. (2020б). Основные проекты водородной стратегии Японии и их потенциальное влияние на перспективы развития нефтегазовой отрасли России. *Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом*, (12), с. 45–54. [https://doi.org/10.33285/1999-6942-2020-12\(192\)-45-54](https://doi.org/10.33285/1999-6942-2020-12(192)-45-54)
- Митрова Т., Мельников Ю., Чугунов Д., Глаголева А. (2019). Водородная экономика – путь к низкоуглеродному развитию. М.: Центр энергетики Моск. шк. управления «Сколково», 62 с.
- Розенцвиг А. (2022). «Водородная лихорадка». *Национальное рейтинговое агентство*. <https://emcr.io/reports/385>
- Пахомова Н., Рихтер К.К., Ветрова М. (2022). Глобальные климатические вызовы, структурные сдвиги в экономике и разработка бизнесом проактивных стратегий достижения углеродной нейтральности. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика*, 38(3), с. 331–364. <https://doi.org/10.21638/spbu05.2022.301>
- Тимофеев Д.И. (2019). Водородный переход в локальной энергетике: зарубежный опыт и российские перспективы. *Энергетическая политика*, (4), с. 86–95.
- Филиппов С.П., Голодницкий А.Э., Кашин А.П. (2020). Топливные элементы и водородная энергетика. *Энергетическая политика*, (11), с. 28–39. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_11153_28
- Холкин Д., Чаусов И. (2021). Три ловушки российской водородной стратегии. *Энергетическая политика*, (3), с. 44–57. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2021_3157_44
- Макроэкономический обзор: «Водородная экономика» – перспективы перехода к альтернативным энергоносителям и возможности экспорта для России. (2019). *Центр экономического прогнозирования Газпромбанка*. <https://investvitrina.ru/articles/makroekonomicheskii-obzor-vodorodnaya-ekonomika-perspektivy-perehoda-k-alternativnym-energionositeliam-i-vozmozhnosti-eksporta-dlya-rossii/>
- Чернова Е.Г., Разманова С.В. (2022а). Европейский газовый рынок: поиск баланса спроса и предложения в условиях энергетического кризиса. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика*, 38(4), с. 497–514. <https://doi.org/10.21638/spbu05.2022.401>
- Чернова Е.Г., Разманова С.В. (2022б). Газовый кризис на европейском сырьевом рынке: причины возникновения и возможности преодоления. *Экономика региона*, 18(4), с. 1194–1208. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2022-4-16>
- Шамин В.С., Шевелева Л.И. (2021). Перспективы Пенжинской приливной электростанции. *Молодой ученый*, (4), с. 51–56.
- Badgett A., Ruth M., Pivovarov B. (2022). Chapter 10 – Economic considerations for hydrogen production with a focus on polymer electrolyte membrane electrolysis. Smolinka T., Garche J. (eds.) *Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications*. Elsevier, pp. 327–364. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819424-9.00005-7>
- Ball M., Weeda M. (2016). 11 – The hydrogen economy – Vision or reality? Ball M., Basile A., Veziroglu T.N. (eds.) *Compendium of Hydrogen Energy, Woodhead Publishing Series in Energy*. Woodhead Publishing, pp. 237–266. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-364-5.00011-7>
- Chun D., Woo C., Seo H., Chung Y., Hong S., Kim J. (2014). The role of hydrogen energy development in the Korean economy: An input-output analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(15), p. 7627–7633. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.058>
- Chung Y., Hong S., Kim J. (2014). Which of the technologies for producing hydrogen is the most prospective in Korea?: Evaluating the competitive priority of those in near-, mid-, and long-term. *Energy Policy*, 65, pp. 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.020>
- Dincer I. (Ed.) (2018). *Comprehensive Energy Systems*. Elsevier, 5540 p.
- El-Shafie M., Kambara S., Hayakawa Y. (2019). Hydrogen Production Technologies Overview. *Journal of Power and Energy Engineering*, 7(1), pp. 107–154. <https://doi.org/10.4236/jpee.2019.71007>
- Erokhin V., Tianming G. (2022). Renewable Energy as a Promising Venue for China-Russia Collaboration. Khan S.A.R., Panait M., Puime Guillen F., Raimi L. (Eds.) *Energy Transition. Industrial Ecology*. Singapore: Springer, pp. 73–101. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3540-4_3
- Fazelpour F., Soltani N., Rosen M.A. (2016). Economic analysis of standalone hybrid energy systems for application in Tehran, Iran. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(19), pp. 7732–7743. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.113>
- Iordache I., Gheorghe A.V., Iordache M. (2013). Towards a hydrogen economy in Romania: Statistics, technical and scientific general aspects. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(28), pp. 12231–12240. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.07.034>
- Kayfeci M., Kecebas A., Bayat M. (2019). Chapter 3 – Hydrogen production. Calise F., D'Accadia M.D., Santarelli M., Lanzini A., Ferrero D. (Eds.) *Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies*. Acad. Press, p. 45–83. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00003-5>
- Moliner R., Lázaro M.J., Suelves I. (2016). Analysis of the strategies for bridging the gap towards the hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(43), pp. 19500–19508. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.202>
- Niu D., Wu G., Ji Z., Wang D., Li Y., Gao T. (2021). Evaluation of Provincial Carbon Neutrality Capacity of China Based on Combined Weight and Improved TOPSIS Model. *Sustainability*, 13(5), 2777. <https://doi.org/10.3390/su13052777>
- Qin Z., Deng X., Griscom B., Huang Y., Li T., Smith P., Yuan W., Zhang W. (2021). Natural climate solutions for China: The last mile to carbon neutrality. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38(6), pp. 889–895. <https://doi.org/10.1007/s00376-021-1031-0>
- Sojoudi A., Sefidan A.M., Alam K.C.A., Saha S.C. (2021). Chapter 6 – Hydrogen production via electrolysis: Mathematical modeling approach. Azad A.K., Khan M.M.K. (Eds.) *Bioenergy Resources and Technologies*, Acad. Press, pp. 199–235. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822525-7.00012-3>
- Steblyanskaya A., Ai M., Denisov A., Efimova O., Rybachuk M. (2022). Carbon dioxide emissions reduction efficiency and growth potential: Case of China. *PSU Research Review*. <https://doi.org/10.1108/PRR-12-2021-0066>
- Stygur M., Brylewski T. (2013). Towards a hydrogen economy in Poland. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(1), pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.10.056>

Сведения об авторе

Светлана Валерьевна Разманова – доктор экон. наук, доцент, начальник отдела геологии и разработки месторождений

Филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта
Россия, 169314, Ухта, ул. Севастопольская, д. 1А
e-mail: s.razmanova@sng.vniigaz.gazprom.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3865-8508>

Статья поступила в редакцию 07.03.2023;
Принята к публикации 14.07.2023;
Опубликована 30.09.2023

Prospects for the development of hydrogen energy in the Russian Federation

S.V. Razmanova

Ukhta Branch of Gazprom VNIIGAZ, Ukhta, Russian Federation

e-mail: s.razmanova@sng.vniigaz.gazprom.ru

Abstract. Currently, in the energy strategies presented by Japan, the Republic of South Korea, the Russian Federation and the countries of the European Union, hydrogen is considered as a promising energy carrier that should replace fossil fuels (oil, gas, coal) and be used for accumulation, storage and delivery of energy to different regions of the world. The improvement of hydrogen energy technologies plays a special role in the low-carbon development of the world economy. The main advantages of hydrogen are the possibility of obtaining it from various sources and the absence of carbon dioxide emissions when it is used as an energy carrier, which is especially important against the backdrop of the current climate agenda. In the meantime, this energy carrier is artificially created, since there are no deposits of free hydrogen in nature. Therefore, hydrogen should be perceived precisely as a “carrier” of energy, and not as a fuel. The purpose of this study is to substantiate the feasibility of building tidal power plants, the development of hydrogen technologies and industrial complexes in the Russian Federation.

Keywords: hydrogen, renewable energy sources, hydrogen energy, water electrolysis method, tidal power plants

Recommended citation: Razmanova S.V. (2023). Prospects for the development of hydrogen energy in the Russian Federation. *Georesursy = Georesources*, 25(3), pp. 216–226. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.3.25>

Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China with the title “Potential cooperation between China and Russia in the field of energy within the framework of the “Carbon neutrality” goal: new methods, new horizons and new strategies” (The Project Number: DL2021180001L).

References

- Badgett A., Ruth M., Pivovar B. (2022). Chapter 10 – Economic considerations for hydrogen production with a focus on polymer electrolyte membrane electrolysis. Smolinka T., Garche J. (eds.) *Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications*. Elsevier, pp. 327–364. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819424-9.00005-7>
- Bakhtina O. (2022). V. Putin's Freudian slip or the Penzhina tidal power plant. *Neftegaz.RU*. (In Russ.) <https://neftegaz.ru/news/energy/700447-ogovorochka-po-freydu-v-putina-ili-penzhinskaya-prilivnaya-elektrostantsiya>
- Ball M., Weeda M. (2016). 11 – The hydrogen economy – Vision or reality? Ball M., Basile A., Veziroğlu T.N. (eds.) *Compendium of Hydrogen Energy*. Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead Publishing, pp. 237–266. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-364-5.00011-7>
- Chernova E.G., Razmanova S.V. (2022a). European gas market: finding a balance between supply and demand in the context of the energy crisis.

Vestnik Sankt-Petersburgskogo universiteta. Ekonomika = Bulletin of St. Petersburg University. Economics, 38(4), pp. 497–514. (In Russ.) <https://doi.org/10.21638/spbu05.2022.401>

Chernova E.G., Razmanova S.V. (2022b). Gas crisis on the European commodity market: causes and possibilities of overcoming. *Ekonomika regiona = Regional Economics*, 18(4), pp. 1194–1208. (In Russ.) <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2022-4-16>

Chun D., Woo C., Seo H., Chung Y., Hong S., Kim J. (2014). The role of hydrogen energy development in the Korean economy: An input–output analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(15), p. 7627–7633. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.058>

Chung Y., Hong S., Kim J. (2014). Which of the technologies for producing hydrogen is the most prospective in Korea?: Evaluating the competitive priority of those in near-, mid-, and long-term. *Energy Policy*, 65, pp. 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.020>

Dincer I. (Ed.) (2018). *Comprehensive Energy Systems*. Elsevier, 5540 p.

El-Shafie M., Kambara S., Hayakawa Y. (2019). Hydrogen Production Technologies Overview. *Journal of Power and Energy Engineering*, 7(1), pp. 107–154. <https://doi.org/10.4236/jpee.2019.71007>

Ergin D. (2022). *Extraction: A World History of the Struggle for Oil, Money and Power*. Moscow: Al'pina Publisher, 960 p. (In Russ.)

Erokhin V., Tianming G. (2022). Renewable Energy as a Promising Venue for China-Russia Collaboration. Khan S.A.R., Panait M., Puime Guillen F., Raimi L. (Eds.) *Energy Transition. Industrial Ecology*. Singapore: Springer, pp. 73–101. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3540-4_3

Fazelpour F., Soltani N., Rosen M.A. (2016). Economic analysis of standalone hybrid energy systems for application in Tehran, Iran. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(19), pp. 7732–7743. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.113>

Filippov S.P., Golodnitskii A.E., Kashin A.P. (2020). Fuel cells and hydrogen energy. *Energeticheskaya politika = Energy Policy*, (11), pp. 28–39. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_11153_28

Grib N. (2019). Hydrogen energy: myths and reality. *Neftegazovaya vertikal*, 19, pp. 61–69. (In Russ.)

Iordache I., Gheorghe A.V., Iordache M. (2013). Towards a hydrogen economy in Romania: Statistics, technical and scientific general aspects. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(28), pp. 12231–12240. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.07.034>

Kantyukov R.R., Zapevalov D.N., Vagapov R.K. (2021). Analysis of the use and impact of carbon dioxide environments on the corrosion state of oil and gas facilities. *Journal of Mining Institute*, (250), pp. 578–856. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.11>

Kayfeci M., Keçebaş A., Bayat M. (2019). Chapter 3 – Hydrogen production. Calise F., D'Accadia M.D., Santarelli M., Lanzini A., Ferrero D. (Eds.) *Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies*. Acad. Press, p. 45–83. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00003-5>

Kholkin D., Chausov I. (2021). Three pitfalls of the Russian hydrogen strategy. *Energeticheskaya politika = Energy Policy*, (3), pp. 44–57. (In Russ.) https://doi.org/10.46920/2409-5516_2021_3157_44

Kolbantsev Yu.A., Konyushin M.V., Kalyutik A.A. (2021). Application of a probabilistic assessment technique for cost calculation of the involvement of nuclear power plants in the process of industrial hydrogen production. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki = Power engineering: research, equipment, technology*, 23(2), pp. 14–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-2-14-26>

Kornev K.A. (2021). Green hydrogen in East Asia. *Geoekonomika energetiki = Geoeconomics of Energy*, 15(3), pp. 98–115. (In Russ.) https://doi.org/10.48137/2687-0703_2021_15_3_98

Litvinenko V.S., Tsvetkov P.S., Dvoynikov M.V., Buslaev G.V. (2020). Barriers to the implementation of hydrogen initiatives in the context of

sustainable development of global energy. *Journal of Mining Institute*, (244), pp. 428–438. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.4.5>

Macroeconomic review: “Hydrogen economy” – prospects for the transition to alternative energy sources and export opportunities for Russia. (2019). Center for Economic Forecasting of Gazprombank. (In Russ.) <https://investvitrina.ru/articles/makroekonomicheskii-obzor-vodorodnaya-ekonomika-perspektivy-perehoda-k-alternativnym-energonositelyam-i-vozmozhnosti-eksporta-dlya-rossii/>

Mastepanov A. (2022). Russia is on the way to carbon neutrality. *Energeticheskaya politika = Energy Policy*, (1), pp. 94–108. (In Russ.) https://doi.org/10.46920/2409-5516_2022_1167_94

Mastepanov A.M. (2020). Hydrogen energy in Russia: status and prospects. *Energeticheskaya politika = Energy Policy*, (12), pp. 54–65. (In Russ.) https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_12154_54

Mastepanov A.M., Khirifumi A. (2020a). Japan’s hydrogen strategy. *Energeticheskaya politika = Energy Policy*, (11), pp. 62–73. (In Russ.) https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_11153_62

Mastepanov A.M., Khirifumi A. (2020b). The main projects of Japan’s hydrogen strategy and their potential impact on the prospects for the development of the Russian oil and gas industry. *Problemy ekonomiki i upravleniya neftegazovym kompleksom*, (12), pp. 45–54. (In Russ.) [https://doi.org/10.33285/1999-6942-2020-12\(12\)-45-54](https://doi.org/10.33285/1999-6942-2020-12(12)-45-54)

Mitrova T., Mel’nikov Yu., Chugunov D., Glagoleva A. (2019). The hydrogen economy is the path to low-carbon development. Moscow: Skolkovo, 62 p. (In Russ.)

Moliner R., Lázaro M.J., Suelves I. (2016). Analysis of the strategies for bridging the gap towards the hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(43), pp. 19500–19508. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.202>

Niu D., Wu G., Ji Z., Wang D., Li Y., Gao T. (2021). Evaluation of Provincial Carbon Neutrality Capacity of China Based on Combined Weight and Improved TOPSIS Model. *Sustainability*, 13(5), 2777, <https://doi.org/10.3390/su13052777>

Pakhomova N., Rikhter K.K., Vetrova M. (2022). Global climate challenges, structural shifts in the economy and business development of proactive strategies to achieve carbon neutrality. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ekonomika = St Petersburg University Journal of Economic Studies*, 38(3), pp. 331–364. (In Russ.) <https://doi.org/10.21638/spbu05.2022.301>

Qin Z., Deng X., Griscom B., Huang Y., Li T., Smith P., Yuan W., Zhang W. (2021). Natural climate solutions for China: The last mile to carbon neutrality. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38(6), pp. 889–895. <https://doi.org/10.1007/s00376-021-1031-0>

Rozentsvet A. (2022.). “Hydrogen fever.” National rating agency. (In Russ.) <https://emcr.io/reports/385>

Shamin V.S., Sheveleva L.I. (2021). Prospects for the Penzhin tidal power station. *Molodoi uchenyi*, (4), pp. 51–56. (In Russ.)

Sojoudi A., Sefidan A.M., Alam K.C.A., Saha S.C. (2021). Chapter 6 – Hydrogen production via electrolysis: Mathematical modeling approach. *Azad A.K., Khan M.M.K. (Eds.) Bioenergy Resources and Technologies*, Acad. Press, pp. 199–235. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822525-7.00012-3>

Steblyanskaya A., Ai M., Denisov A., Efimova O., Rybachuk M. (2022). Carbon dioxide emissions reduction efficiency and growth potential: Case of China. *PSU Research Review*. <https://doi.org/10.1108/PRR-12-2021-0066>

Stygar M., Brylewski T. (2013). Towards a hydrogen economy in Poland. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(1), pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.10.056>

The concept for the development of hydrogen energy in the Russian Federation (2021). No. 2162-r. Approved by Decree of the Government of the Russian Federation. 22 p. (In Russ.)

Timofeev D.I. (2019). Hydrogen transition in local energy: foreign experience and Russian prospects. *Energeticheskaya politika = Energy Policy*, (4), pp. 86–95. (In Russ.)

Veselov F., Solyanik A. (2022). Economics of hydrogen production, taking into account exports and the Russian market. *Energeticheskaya politika = Energy Policy*, (4), pp. 58–67. (In Russ.) https://doi.org/10.46920/2409-5516_2022_4170_58

Zhigalov V.M., Podkorytova O.A., Pakhomova N.V., Malova A.S. (2018). The relationship between energy and climate policy: economic and mathematical substantiation of recommendations for the regulator. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ekonomika = St Petersburg University Journal of Economic Studies*, 34(3), pp. 345–368. (In Russ.) <https://doi.org/10.21638/spbu05.2018.301>

About the Author

Svetlana V. Razmanova – Dr. Sci. (Economics), Associate Professor, Head of the Geology and Field Development Department, Ukhta Branch of Gazprom VNIIGAZ

1A Sevastopolskaya st., 169314, Ukhta, Russian Federation
e-mail: s.razmanova@sng.vniigaz.gazprom.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3865-8508>

Manuscript received 7 March 2023;

Accepted 14 July 2023; Published 30 September 2023