

Современные тенденции и перспективы развития водородной энергетики в ФРГ

УДК: 338.45:620.9(430);
ББК: 65.30(4Гем); Jel: Q42
DOI: 10.24412/2072-8042-2023-11-73-87

Наталья Юрьевна РОДЫГИНА,
доктор экономических наук, профессор,
Всероссийская академия внешней торговли
(119285, Москва, Воробьевское шоссе, 6А),
профессор кафедры международной торговли
и внешней торговли РФ,
e-mail: rodygina.natalia@yandex.ru;

Владислав Игоревич МУСИХИН,
Всероссийская академия внешней торговли
(119285, Москва, Воробьевское шоссе, 6А), кафедра
мировой и национальной экономики - аспирант;
ООО «ТранснефтьЭлектросетьСервис» -
ведущий специалист службы ценообразования,
e-mail: musikhinvladislav@gmail.com;

Андрей Викторович СОТНИКОВ,
доктор экономических наук, профессор,
Всероссийская академия внешней торговли
(119285, Москва, Воробьевское шоссе, 6А),
профессор кафедры международной торговли и
внешней торговли РФ,
e-mail: Sotnikov_av1954@mail.ru

Аннотация

Настоящее исследование посвящено оценке перспективности реализации концепции водородной энергетики с учетом таких факторов, как ожидаемый спрос, доступность энергоносителей и их ценовые параметры, наличие потребительского спроса и реализация концепции глобальной декарбонизации в целях реализации концепции устойчивого развития на примере Германии. С увеличением потребности в водороде, который рассматривается как промышленная альтернатива для декарбонизации энергетического комплекса и сокращения выбросов парниковых газов, возникает актуальный вопрос о необходимости замены водорода, производимого с использованием традиционных энергетических ресурсов, на полностью экологически чистый водород. Важно отметить, что на данный момент производство зеленого водорода обходится дороже по сравнению с альтернативными энергетическими источниками, и его конкурентоспособность зависит от колебаний стоимости выбросов CO₂ и объема производства электролизных установок. Следующее десятилетие представит возможность определить степень влияния мирового роста рынка зеленого водорода на энергетический сектор.

Ключевые слова: зеленая энергетика, водородная энергетика, декарбонизация, устойчивое развитие.



Germany's Current Trends and Prospects for Hydrogen Energy Development

Natalya Yuryevna RODYGINA,

Doctor of Economic Sciences, Professor, Russian Foreign Trade Academy (119285, Moscow, Vorob'evskoe shosse, 6A), Professor of the Department of the International and Foreign Trade of the Russian Federation, e-mail: rodygina.natalia@yandex.ru;

Vladislav Igorevich MUSIKHIN,

Russian Foreign Trade Academy (119285, Moscow, Vorob'evskoe shosse, 6A), Postgraduate student of the Department of World and National Economy; Transneft ElektrosetServis LLC - Leading Specialist, Price Formation Department, e-mail: musikhinvladislav@gmail.com;

Andrey Viktorovich SOTNIKOV,

Doctor of Economic Sciences, Professor, Russian Foreign Trade Academy (119285, Moscow, Vorob'evskoe shosse, 6A), Professor of the Department of the International and Foreign Trade of the Russian Federation, e-mail: Sotnikov_av1954@mail.ru

Abstract

The purpose of this study is to assess the prospects for the implementation of the hydrogen energy concept taking into account such factors as expected demand, availability of fossil fuels and their price determinants, consumer demand, and implementation of the concept of global decarbonization in order to fulfill the sustainable development concept using Germany as an example. With rising demand for hydrogen, which is seen as an industrial alternative for decarbonizing the energy sector and lowering greenhouse gas emissions, an urgent question about the need to replace hydrogen produced using traditional energy resources with completely environmentally friendly hydrogen arises. It is important to note that the production of green hydrogen is now more expensive than alternative energy sources, and its competitiveness depends on changes in the cost of CO₂ emissions and the output of electrolytic plants. The coming decade will provide an opportunity to assess the extent to which the global expansion of the green hydrogen industry will impact the energy sector.

Keywords: green energy, hydrogen energy, decarbonization, sustainable development.

Значение водорода на пути к углеродной нейтральности будет значительно возрастать, и можно предположить, что спрос на него в обозримом будущем значительно увеличится. В настоящее время водород в основном производится из ископаемого топлива, поэтому технологии производства с низким содержанием углерода становятся все более важными: к ним, помимо прочего, относится, прежде всего зеленый водород, полученный за счет возобновляемых источников энергии. В перспективе зеленый водород призван заменить водород, производимый на основе ископаемых источников, однако это обуславливает его конкурентоспособность в производстве. Отмечается, что «возникший в 2018-2019 гг. тренд на развитие водородной отрасли рассматривается странами мира как одно из ключевых направлений декарбонизации промышленности и энергетики».¹

В настоящее время водород используется почти исключительно в качестве сырья в объеме около 94 мегатонн (Мт) по всему миру по 2021 году, что эквивалентно примерно 3 000 ТВтч энергии. Основными покупателями являются химическая промышленность, особенно для производства аммиака (около 50% рынка), нефтеперерабатывающие заводы, особенно для очистки и переработки нефти (около 40% рынка) и производство жидкого топлива, такого как метанол (около 10% рынка), а также в сталелитейной промышленности.²

Интересен опыт развития водородной энергетики Германии, поскольку, как отмечают Симонин П.В., Капустина Н.В., Кузьмина А.А., Шамалова Е.В., Анохин С.А., Костромина Е.А., Курбацкая Т.Б., Курбацкий Н.В., «в Германии исследования в области национального и глобального использования водорода имеют законодательную основу <...> водород и другие продукты его синтеза будут играть центральную роль в обеспечении нейтральности к выбросам парниковых газов во всех секторах, потребляющих энергию».³

Доля Германии в мировом потреблении составила чуть менее 2% (1,65-1,85 млн тонн). Ожидается, что спрос в Германии к 2050 году вырастет до 11-21 млн тонн.⁴ Водород в настоящее время производится преимущественно из ископаемого топлива (в основном из природного газа, около 80%), а также как побочный продукт химических процессов (около 18%). Только около 0,04% водорода в мире получают с помощью электролиза.⁵ Международное энергетическое агентство ожидает, что важность водорода значительно возрастет на пути к углеродной нейтральности. При этом будущий спрос на водород подвержен многочисленным неопределенностям, и соответствующие оценки могут отличаться. Международное энергетическое агентство прогнозирует, что к 2050 году потребность в водороде достигнет 530 Мтн, что в шесть раз превысит сегодняшний уровень.⁶ Технологии производства водорода с низким содержанием углерода приобретут все большее значение, особенно с точки зрения ожидаемого увеличения спроса и достижения климатических целей: к ним относятся, помимо голубого водорода, который в основном основан на современной переработке пара природного газа с последующим улавливанием (и хранением) CO₂, в первую очередь, так называемый зеленый водород с использованием возобновляемых источников энергии. При этом извлечение может происходить тремя способами: термолиз, фотолиз и электролиз. Первые два вида все еще находятся на очень ранних стадиях развития в лабораторных масштабах. С другой стороны, технологии электролиза коммерчески доступны и имеют технологическую зрелость.⁷ Потребность в энергии для производства экологически чистого водорода с помощью электролиза должна удовлетворяться за счет электроэнергии, получаемой из возобновляемых источников энергии, в частности, от ветроэнергетических и фотоэлектрических систем. Для проведения электролиза и получения 1 кг водорода требуется электрическая энергия порядка (в зависимости от эффективности установки) от 40 до 60 кВтч.



Соответственно, например, получение в Германии количества используемого в настоящее время водорода (около 1,7 тыс. тонн) путем электролиза означало бы дополнительную потребность в электроэнергии в размере от 70 до 90 ТВтч. Для сравнения, в 2022 году в Германии было произведено 233,9 ТВтч электроэнергии из возобновляемых источников энергии.⁸ Помимо электроэнергии, для производства зеленого водорода с помощью электролиза требуется вода (около 9-15 литров на килограмм водорода, в зависимости от того, какая часть охлаждающей воды может быть восстановлена). Чтобы обеспечить потребляемое в настоящее время количество водорода, потребность в воде для производства водорода методом электролиза составила бы от 14,7 до 25 млрд литров воды в год, что составляет порядка сегодняшних потребностей в 13 млрд литров воды для охлаждения производственных и электрогенерирующих установок в Германии, или около 10% соответствующей потребности завода Tesla в Грюнхайде.⁹ И ЕС, и Германия разработали водородные стратегии для стимулирования роста зеленой водородной экономики в качестве вклада в достижение климатических целей. Таким образом, Германия ставит перед собой цель ввести в эксплуатацию 10 ГВт электролизных мощностей к 2030 году.¹⁰ Несмотря на запланированное масштабное расширение мощностей на 60 МВт (при производственной мощности около 9,9 килотонн), ожидается, что спрос на водород значительно превысит предложение по мере достижения целей по защите климата. Так, согласно прогнозам Всемирного совета по энергетике, доля Германии в импорте в 2030 году составит 72-74%.¹¹ До энергетического кризиса затраты на производство водорода составляли от 25 до 65 EUR / МВтч (от 0,8 до 2 EUR / кг), причем цена на природный газ является основным фактором, влияющим на производственные затраты.

В перспективе зеленый водород призван заменить водород, производимый на основе ископаемых источников. Однако это обуславливает конкурентоспособность производства экологически чистого водорода. Производственные затраты в значительной степени зависят от затрат на электроэнергию и/или от инвестиций в оборудование (производственные мощности).

Известны следующие технологии электролиза: щелочной электролиз (AEL), протонно-обменный мембранный электролиз (PEM или PEMEL), анионообменный мембранный электролиз (AEM) и твердооксидный электролиз (SOEC). Щелочной электролиз – старейшая из технологий, первые коммерческие реализации которой появились в начале XX-го века, доля рынка составляет порядка 70%. В качестве электролита используется щелочь, что позволяет использовать недорогие материалы для электродов.¹² Протонно-обменный мембранный электролиз был разработан в 1960-х годах компанией General Electric и в настоящее время занимает около 25% рынка.¹³ Как и щелочной электролиз, он работает при низких температурах от 50 до 80 °С, однако реакции протекают в кислой среде, при этом заряд переносится ионами водорода.¹⁴ Основные работы по разработке направле-

ны на снижение затрат и увеличение срока службы. Обе эти проблемы связаны с кислой средой, которая делает необходимым использование очень дорогих драгоценных металлов с ограниченной доступностью.¹⁵ Анионообменный мембранный электролиз является наименее развитой технологией электролиза и все еще находится на стадии исследований. Технология представляет собой комбинацию АЕЛ и РЕМ и работает при температурах от 40 до 80 °С. Твердооксидный электролиз отличается от других технологий высокими рабочими температурами (750 - 1000 °С) и до сих пор практически не использовался.¹⁶ В отличие от других технологий, происходит расщепление не воды, а водяного пара. При этом для получения желаемых температур необходим внешний источник тепла.¹⁷ Первые три технологии (АЕЛ, РЕМ и АЕМ) можно отнести к группе низкотемпературных электролизеров, поскольку все они работают при температуре ниже 100 °С.

В то время как АЕЛ имеет высокий срок службы и отличается использованием более дешевых материалов, он ограничен по плотности тока и характеризуется плохим динамическим поведением, а также сложной конструкцией системы. Соответственно, использование АЕЛ при прямом подключении к зависящему от условий внешней среды возобновляемому источнику энергии является сложной задачей, поскольку его динамическая работа ограничена. С другой стороны, РЕМ характеризуется более высокой плотностью тока, хорошими динамическими характеристиками и простой конструкцией системы. Однако по сравнению с АЕЛ требуемые материалы делают его значительно более дорогим, а более короткий срок службы порождает дополнительную проблему. Электролиз твердых оксидов особенно привлекателен при наличии (достаточного) количества отработанного тепла, поскольку часть электрической энергии может быть заменена тепловой, и, следовательно, КПД может быть значительно выше. Из-за различий в характеристиках технологий на сегодняшний день трудно оценить, в каких случаях какая технология будет использоваться.

Основными факторами, влияющими на затраты на производство водорода из экологически чистого водорода, являются затраты на закупку электроэнергии, конкретные инвестиции в агрегат для электролиза, его эффективность и время работы. Затраты на закупку электроэнергии и часы работы во многом зависят от концепции использования установок. При этом можно принципиально различать две концепции использования электролизных установок.

Использование может быть ориентировано, с одной стороны, на доступность дешевой электроэнергии или, с другой стороны, на высокую продукцию газа.¹⁸

Концепция энергосбережения использует избыточную электроэнергию в энергосистеме и, таким образом, способствует интеграции возобновляемых источников энергии. Преимущество концепции заключается в том, что избыточная электроэнергия используется для производства водорода и поэтому доступна по низким ценам. Недостатки заключаются в том, что эти излишки в системе в целом



возникают только в течение нескольких часов в году, но в перспективе они будут несколько увеличиваться с увеличением доли возобновляемых источников энергии. В соответствии с этой концепцией использования агрегат может работать исключительно непродолжительное время. Хотя биржевая цена может быть очень низкой (возможно, даже отрицательной) в периоды избытка возобновляемых источников энергии, в дополнение к биржевой цене электроэнергии в конечном итоге добавляются сборы, что может сделать работу агрегатов нерентабельной.

В концепции использования газа установка используется непосредственно для производства водорода с минимальными затратами. Для этого принимаются попытки оптимизировать взаимодействие установки (установок), агрегата (агрегатов) и любых буферных хранилищ. Соответственно, электроэнергия используется непосредственно на местах из возобновляемых источников, поэтому (по крайней мере, частично) подключение к электросети общего пользования не предусмотрено. Преимущество такого подхода заключается в том, что можно увеличить часы работы электролизных установок при полной нагрузке, что снижает затраты на производство водорода, и что за счет непосредственного производства водорода не взимается дополнительная плата конечного потребителя за используемую электроэнергию. Это применение особенно интересно в системах подачи возобновляемых источников энергии, которые требуют высоких часов полной нагрузки и где подключение к сети сопряжено с большими затратами, например, в морских ветряных турбинах.

В дополнение к двум операционным концепциям возможны также (балансовые и физически несвязанные) операционные концепции, например, «о подтверждении возобновляемого происхождения», что приводит к значительному увеличению часов работы агрегатов и, следовательно, является привлекательным вариантом для электролизных операций. Недостатком, однако, является то, что эти концепции обычно учитывают только энергию в среднегодовом исчислении и, следовательно, не учитывают физическую реальность.

На рисунке 1 показаны затраты на производство водорода в EUR/МВтч в зависимости от часов работы установок при условии инвестиций в агрегаты для электролиза от 750 до 1 800 EUR/кВт и затраты на закупку электроэнергии от 35 до 70 EUR/МВтч и 1800 EUR/кВт/ч соответственно:

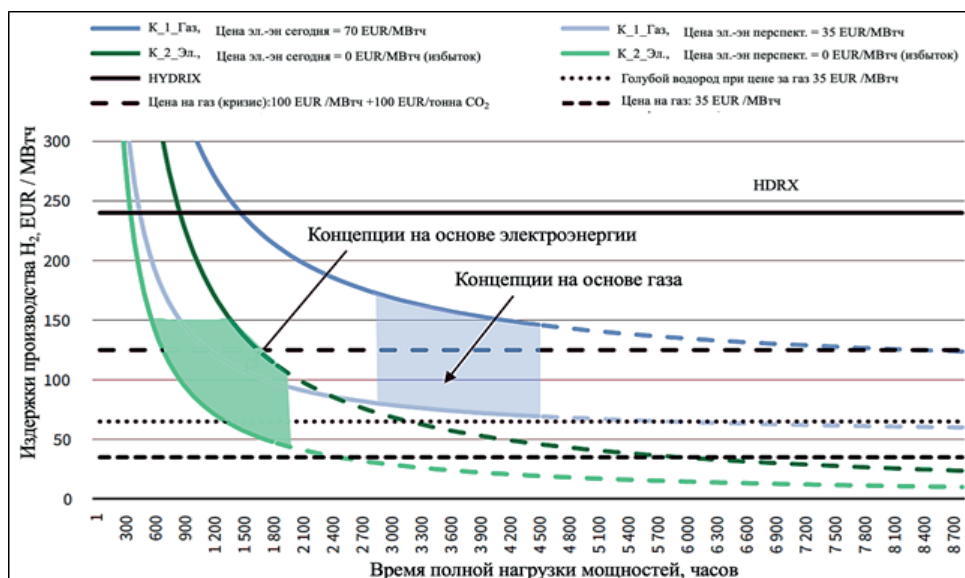


Рис. 1 – Сравнительный анализ затрат на производство водорода.
 Fig. 1 – Comparative analysis of the costs of hydrogen production.

Источник: составлено авторами

Принято, что в случае избытка электроэнергии предоставляется бесплатная электроэнергия (0 EUR/МВтч). Допустим, что инвестиции в размере 1 800 EUR/кВт, необходимы сегодня, в то время как инвестиции в размере 750 EUR/кВт ожидаются к 2035 году.¹⁹ Различные затраты на закупку электроэнергии должны в общих чертах иллюстрировать диапазон текущих затрат на электроэнергию в Германии в рамках современных проектов. При использовании нескольких (централизованных) установок можно ожидать, что рабочее время составит до 4 500 часов; при использовании на шельфе, возможно, даже значительно больше.

Заштрихованные участки показывают вероятную стоимость генерации по вертикали для часов использования, реалистичных для каждой из двух концепций: серая заштрихованная область для концепции, предполагающей использование газа, зеленая заштрихованная – для концепции, предполагающей использование электричества. В зависимости от вышеуказанных допущений затраты на производство водорода в рамках газовой концепции составляют от 80 до 175 EUR/МВтч. Концепция на основе электроэнергии предполагает наличие бесплатной избыточной электроэнергии свыше 1 000 часов в году, но при этом несколько более высокие затраты на производство водорода в диапазоне от 90 до 210 EUR/МВтч из-за



сокращения времени работы. Однако этот расчет предполагает, что за используемую электроэнергию не взимаются дополнительные сборы (включая сетевые), за что взимается дополнительная плата в размере от 89 до 220 EUR/МВтч. Для классификации затрат на производство по сравнению с ценами на водород можно использовать эталонное значение HDRX – здесь цена индекса с самого начала колеблется от 225 до 260 EUR/МВтч. Этот порядок величины можно вполне обоснованно трактовать по рисунку: с одной стороны, кривые в верхней части описывают текущие конкретные инвестиции в установки для электролиза и, следовательно, в зависимости от количества часов полной нагрузки составляют порядка 200 EUR/МВтч. С другой стороны, HDRX отображает цены на водород, а не затраты на производство водорода. Соответственно, следует ожидать увеличения себестоимости производства чистого водорода в зависимости от наличия спроса и его состояния. Конкурентоспособность экологически чистого водорода может быть оценена с помощью цены на газ и себестоимости производства водорода. При чрезвычайно высоких ценах на газ в 2022 году затраты на получение водорода из зеленого водорода были примерно такими же, как и затраты на производство серого водорода, при учете цен на газ и CO₂ в виде сертификатов (квот на выбросы) в размере 100 EUR/МВтч газа и 100 EUR/т CO₂. Цены на сертификаты CO₂ учитываются с коэффициентом (упрощенно округленным) около 0,25 (из-за коэффициента выбросов CO₂ около 279 г CO₂/кВтч), так что при цене сертификата CO₂ 100 EUR/т к цене на газ добавляется около 25 EUR/МВтч.

Таким образом, экологически чистый водород был бы конкурентоспособным при условии инвестиций в размере 750 EUR/кВт в электролизные установки и предполагаемых базовых затрат на электроэнергию в размере 35 EUR/МВтч. Однако важно отметить, что эти дополнительные установки с площадями для возобновляемых источников энергии конкурируют с установками, используемыми для подачи электроэнергии в энергосистему. В частности, в настоящее время (при более высоких ценах на газ) имеются высокие цены на электроэнергию, поэтому предположение о затратах на закупку электроэнергии в размере 35 EUR/МВтч для работы агрегатов можно рассматривать скорее, как оптимистичное. Для сопоставимости, цены на газ в настоящее время составляют порядка 35 EUR/МВтч, что соответственно снижает конкурентоспособность экологически чистого водорода в текущих условиях. Однако, поскольку водород, полученный из природного газа, не содержит CO₂, производство голубого водорода также является достойной альтернативой. Голубой водород, как и серый, получают из природного газа путем восстановления пара. Однако, в отличие от серого водорода, образующийся углекислый газ осаждается и сохраняется. Даже если часть CO₂ выделяется, производство голубого водорода считается низкоуглеродистым или почти не содержащим CO₂. Соответственно, голубой водород представляет непосредственную конкуренцию зеленому водороду, особенно в фазе трансформации в течение следующих

нескольких десятилетий. Сравнительный анализ показывает, что зеленый водород, исходя из положительных рамочных допущений, может быть на порядок дешевле голубого водорода и, соответственно, может быть конкурентоспособным при благоприятных условиях размещения мощностей (наличие ветра/ солнечного излучения).

Помимо поставок и сопутствующих затрат на производство, возникает вопрос о потребности в водороде в ближайшие несколько лет.

По оценкам²⁰, спрос на водород в Германии в среднем будет составлять в 2030 году 40 ТВтч, в то время как к 2050 году диапазон от 200 до 690 ТВтч будет зависеть от фактических результатов по достижению углеродной нейтральности. В настоящее время водород в основном используется в качестве реагента в химической промышленности, а также для переработки сырой нефти.²¹ Для производства аммиака и метанола требуется примерно 29 ТВтч водорода, из которых еще 22,8 ТВтч приходится на переработку сырой нефти. При этом паровой риформинг природного газа, как правило, осуществляется на территории соответствующего промышленного предприятия.²² Будущее вероятное применения водорода, в частности, в промышленном секторе ожидается при производстве первичной стали с низким содержанием CO_2 .²³ В зависимости от динамики цен на энергоносители и CO_2 , обеспечение высокотемпературного тепла водородом или его производными также может иметь экономический смысл. Соответственно, большинство исследований энергетических систем показывают низкий спрос на водород в строительном секторе.²⁴

Кроме того, отмечается, что водород или его производные, несмотря на более низкую эффективность по сравнению с прямой электрификацией, могут быть подходящим вариантом для предотвращения выбросов CO_2 в тяжелых условиях, а также на судах и самолетах.²⁵ Исследования предполагают значительное увеличение использования водорода в транспортном секторе после 2030 года и в среднем до 85 ТВтч в год к 2045 году. Очень немногие из рассмотренных исследований показывают, что потребность в водороде в транспортном секторе превысит 100 ТВтч в 2045 году. Водород также подходит для длительного хранения^{26,27}. Хотя батареи имеют более высокую эффективность, затраты на единицу емкости для хранения водорода значительно ниже.²⁸ В исследовании Линника Ю.Н., Фаляховой Е.Д. отмечается, что «пока рано говорить о быстрой переориентировке на водород, поскольку одним из главных условий для его широкого внедрения как энергоресурса является оптимальное сочетание экологической чистоты водорода и его относительной дешевизны, а это еще не достигнуто».²⁹ Данный вывод не опровергается настоящим исследованием.

Таким образом, ожидается, что потребность в водороде продолжит расти в ближайшие несколько лет, поскольку он рассматривается как многообещающий вариант для декарбонизации энергетического сектора и сокращения выбросов



парниковых газов. Однако для того, чтобы внести свой вклад в защиту климата, современный водород, практически производимый на основе обычных энергоносителей, должен быть заменен водородом с низким содержанием CO_2 или с нулевым CO_2 . В какой степени экологически чистый водород является экономически привлекательным вариантом, не в последнюю очередь зависит от цен на него, а также на энергию и выбросы CO_2 . В настоящее время зеленый водород в несколько раз дороже, чем другие используемые виды энергии. Цена на CO_2 будет иметь важное значение для экономической эффективности зеленого (и синего) водорода. С дальнейшим расширением производства электролизных установок можно ожидать снижения инвестиций в производственные мощности в долгосрочном периоде. Это ожидаемое сокращение инвестиций за счет масштабирования в сочетании с высокими ценами на CO_2 также будет необходимо для обеспечения конкурентоспособности зеленого водорода с голубым водородом (и другими энергоносителями). Помимо инвестиций, существенную роль в экономической эффективности использования экологически чистого водорода играют затраты на закупку электроэнергии, которые зависят, в частности, от условий на местах. Необходимо учитывать, что в Германии возможности для развития возобновляемых источников энергии ограничены. Одновременно для достижения поставленных электроэнергетических целей в ближайшем десятилетии потребуются значительное увеличение расширение мощностей в сравнении с предыдущим десятилетием. Конкуренция за пригодные территории, более доступные регионы с потенциалом возобновляемых источников энергии, а также существующий спрос на импорт энергии указывают на возможную необходимость увеличения импорта водорода в случае роста спроса на него. В этом контексте можно сказать, что национальные стратегии могут оказаться несостоятельными. Предстоящее десятилетие покажет, как важен мировой рост рынка экологически чистого водорода для энергетической отрасли.

ПРИМЕЧАНИЯ:

¹ Куликов Д.В. ВОЗМОЖНОСТИ СОТРУДНИЧЕСТВА РОССИИ И СТРАН АЗИИ ПО РАЗВИТИЮ ВОДОРОДНЫХ ПРОЕКТОВ // Известия СПбГЭУ. 2023. №3-2 (141). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-sotrudnichestva-rossii-i-stran-azii-po-razvitiyu-vodorodnyh-proektov> (дата обращения: 25.10.2023).

² Michaelis J. Modellgestützte Wirtschaftlichkeitsbewertung von Betriebskonzepten für Elektrolyseure in einem Energiesystem mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien, 2018. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/328497818_Modellgestutzte_Wirtschaftlichkeitsbewertung_von_Betriebskonzepten_fur_Elektrolyseure_in_einem_Energiesystem_mit_hohen_Anteilen_erneuerbarer_Energien (дата обращения: 25.10.2023).

³ Симонин П.В., Капустина Н.В., Кузьмина А.А., Шамалова Е.В., Анохин С.А., Костромина Е.А., Курбацкая Т.Б., Курбацкий Н.В. Формирование инклюзивной архитектуры водородной экономики и потребления угля // Уголь. 2023. №9 (1171). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-inklyuzivnoy-arhitektury-vodorodnoy-ekonomiki-i-potrebleniya-uglya> (дата обращения: 25.10.2023).

⁴ ENERGIE FÜR DEUTSCHLAND. Fakten, Perspektiven und Positionen im globalen Kontext 2023 // Weltenergieat Deutschland. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.weltenergieat.de/energie-fuer-deutschland-2023/?cn-reloaded=1> (дата обращения: 25.10.2023).

⁵ Global Hydrogen Review 2022. Источник: International Energy Agency (IEA). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022> (дата обращения: 25.10.2023).

⁶ Global Hydrogen Review 2021. Источник: International Energy Agency (IEA). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021> (дата обращения: 25.10.2023).

⁷ Horng P., Kalis M. Wasserstoff – Farbenlehre: Rechtswissenschaftliche und rechtspolitische Kurzstudie. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ikem.de/publikation/horng2020/> (дата обращения: 25.10.2023).

⁸ Bundesnetzagentur veröffentlicht Daten zum Strommarkt 2022. Источник: Bundesnetzagentur. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.bundesnetzagentur.de/Shared-Docs/Pressemitteilungen/DE/2023/20230104_smar.html (дата обращения: 25.10.2023).

⁹ Tesla bekommt Wasser für 30.000 Menschen – dafür sollen die Anwohner sparen. // FOCUS ONLINE. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.focus.de/panorama/welt/focus-online-reportage-gruenheide-tesla-der-wasserverband-hat-einfach-kein-wasser-mehr-zu-vergeben_id_184714793.html (дата обращения: 25.10.2023).

¹⁰ Die Nationale Wasserstoffstrategie. Источник: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Wasserstoff/Dossiers/wasserstoffstrategie.html> (дата обращения: 25.10.2023).

¹¹ ENERGIE FÜR DEUTSCHLAND. Fakten, Perspektiven und Positionen im globalen Kontext 2023. / Weltenergieat Deutschland. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.weltenergieat.de/energie-fuer-deutschland-2023/?cn-reloaded=1> (дата обращения: 25.10.2023).



¹² Global Hydrogen Review 2022. // International Energy Agency (IEA). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022> (дата обращения: 25.10.2023).

¹³ Ibid.

¹⁴ Agyekum E. B., Nutakor C., Agwa A. M., S. A. Kamel, A Critical Review of Renewable Hydrogen Production Methods: Factors Affecting Their Scale-Up and Its Role in Future Energy Generation, 2022. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/358299148_A_Critical_Review_of_Renewable_Hydrogen_Production_Methods_Factors_Affecting_Their_Scale-Up_and_Its_Role_in_Future_Energy_Generation/. (дата обращения: 25.10.2023).

¹⁵ Brinner A., Schmidt M., Schwarz S., Wagener L., U. Zuberbühler Technologiebericht Power-to-gas (Wasserstoff) innerhalb des Forschungsprojektes TF_Energiewende. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7058/file/7058_Power-to-gas.pdf (дата обращения: 25.10.2023).

¹⁶ Global Hydrogen Review 2022. Источник: International Energy Agency (IEA). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022> (дата обращения: 25.10.2023).

¹⁷ Brinner A., Schmidt M., Schwarz S., Wagener L., U. Zuberbühler Technologiebericht Power-to-gas (Wasserstoff) innerhalb des Forschungsprojektes TF_Energiewende. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7058/file/7058_Power-to-gas.pdf (дата обращения: 25.10.2023).

¹⁸ Ibid.

¹⁹ Glenk G., Holler P., Reichelstein S., Advances in Power-to-Gas Technologies: Cost and Conversion Efficiency. Источник: Stanford Business. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.gsb.stanford.edu/faculty-research/working-papers/advances-power-gas-technologies-cost-conversion-efficiency> (дата обращения: 25.10.2023).

²⁰ Kopp H., Moritz M., Scharf H., Schmidt J. Strukturwandel in der Gaswirtschaft – Was bedeutet die Entwicklung der Gas- und Wasserstoffnachfrage für die zukünftige Infrastruktur? Источник: Zeitschrift für Energiewirtschaft, № 46, стр. 255-266. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12398-022-00335-2> дата обращения: 25.10.2023).

²¹ Jügel C., Bamberg C., Edel M., Gründig D, Massow G., Müller M., Schenkluhn M., Siegemund S., Seidl H., Uhlig J., Hobohm J., Lübbers S., Seefeldt F., Thamling N. Dialogprozess Gas 2030 Hintergrundpapier. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/Hintergrundpapier_Dialogprozess_Gas_2030.pdf (дата обращения: 25.10.2023).

²² Wasserstoff DIHK Faktenpapier. Источник: Deutscher Industrie- und Handelskammertag. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.dihk.de/resource/blob/24872/fd2c89df9484cf912199041a9587a3d6/dihkfaktenpapier-wasserstoff-data.pdf> (дата обращения: 25.10.2023).

²³ Fishedick M, Marzinkowski J, Winzer P, Weigel M. Technoeconomic Evaluation of Innovative Steel Production Technologies. Источник: Wuppertal Institute, [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/5644/file/5644_Fishedick.pdf (дата обращения: 25.10.2023).

²⁴ Ueckerdt F., Bauer C., Dirnauichner A., Everall J., Sacchi R., Luderer G. Potential and Risks of Hydrogen-based E-fuels in Climate Change Mitigation. Источник: Nature Climate Change № 11, pp. 384-393.

²⁵ Kopp H., Moritz M., Scharf H., Schmidt J. Strukturwandel in der Gaswirtschaft – Was bedeutet die Entwicklung der Gas- und Wasserstoffnachfrage für die zukünftige Infrastruktur? Источник: Zeitschrift für Energiewirtschaft, № 46, pp. 255-266. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12398-022-00335-2> (дата обращения: 25.10.2023).

²⁶ Schill W. P. Residual Load, Renewable Surplus Generation and Storage Requirements in Germany. Energy Policy № 73, pp. 65-79. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/264425451_Residual_load_renewable_surplus_generation_and_storage_requirements_in_Germany (дата обращения: 25.10.2023).

²⁷ Zöphel M., Möst D. The Value of Energy Storages under Uncertain CO₂-Prices and Renewable Shares, 14th International Conference on the European Energy Market, 14, pp. 1-5. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/318697526_The_value_of_energy_storages_under_uncertain_CO2-prices_and_renewable_shares (дата обращения: 25.10.2023).

²⁸ Gils H. C., Scholz Y., Pregger T., Tena D. L., Heide D. Integrated Modelling of Variable Renewable Energy-based Power Supply in Europe, Energy № 123, pp. 173-188. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/313127382_Integrated_modelling_of_variable_renewable_energy-based_power_supply_in_Europe (дата обращения: 25.10.2023).

²⁹ Линник Ю.Н., Фаляхова Е.Д. Водородная энергетика и перспективы ее развития // Вестник ГУУ. 2023. №4. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/vodorodnaya-energetika-i-perspektivy-ee-razvitiya> (дата обращения: 25.10.2023).

БИБЛИОГРАФИЯ:

Куликов Д.В. Возможности сотрудничества России и стран Азии по развитию водородных проектов. // Известия СПбГЭУ. 2023. №3-2 (141) @@ Kulikov D.V. *Vozmozhnosti sotrudnichestva Rossii i stran Azii po razvitiyu vodorodny`x proektov.* // Izvestiya SPbGE`U. 2023. №3-2 (141). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-sotrudnichestva-rossii-i-stran-azii-po-razvitiyu-vodorodnyh-proektov> (дата обращения: 25.10.2023).

Линник Ю.Н., Фаляхова Е.Д. Водородная энергетика и перспективы ее развития. // Вестник ГУУ. 2023. №4 @@ Linnik Yu.N., Falyakhova E.D. *Vodorodnaya e`nergetika i perspektivy` ee razvitiya.* // Vestnik GUU. 2023. №4. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/vodorodnaya-energetika-i-perspektivy-ee-razvitiya> (дата обращения: 25.10.2023).

Симонин П.В., Капустина Н.В., Кузьмина А.А., Шамалова Е.В., Анохин С.А., Костромина Е.А., Курбацкая Т.Б., Курбацкий Н.В. Формирование инклюзивной архитектуры водородной экономики и потребления угля. // Уголь. 2023. №9 (1171) @@ Simonin P.V., Kapustina N.V., Kuz`mina A.A., Shamalova E.V., Anoxin S.A., Kostromina E.A., Kurbaczkaia T.B.,



Kurbaczki N.V. Formirovanie inklyuzivnoj arhitektury` vodorodnoj e`konomiki i potrebleniya uglya. // Ugol'. 2023. №9 (1171). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-inklyuzivnoy-arhitektury-vodorodnoy-ekonomiki-i-potrebleniya-uglya> (дата обращения: 25.10.2023).

Agyekum E. B., Nutakor C., Agwa A. M., S. A. Kamel, A Critical Review of Renewable Hydrogen Production Methods: Factors Affecting Their Scale-Up and Its Role in Future Energy Generation, 2022. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/358299148_A_Critical_Review_of_Renewable_Hydrogen_Production_Methods_Factors_Affecting_Their_Scale-Up_and_Its_Role_in_Future_Energy_Generation/. (дата обращения: 25.10.2023).

Brinner A., Schmidt M., Schwarz S., Wagener L., U. Zuberbühler Technologiebericht Power-to-gas (Wasserstoff) innerhalb des Forschungsprojektes TF_Energiewende. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7058/file/7058_Power-to-gas.pdf (дата обращения: 25.10.2023).

Bundesnetzagentur veröffentlicht Daten zum Strommarkt 2022. // Bundesnetzagentur. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2023/20230104_smarkd.html (дата обращения: 25.10.2023).

Die Nationale Wasserstoffstrategie. Источник: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Wasserstoff/Dossiers/wasserstoffstrategie.html> (дата обращения: 25.10.2023).

ENERGIE FÜR DEUTSCHLAND. Fakten, Perspektiven und Positionen im globalen Kontext 2023 // Weltenergieinstitut Deutschland. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.weltenergieinstitut.de/energie-fuer-deutschland-2023/?cn-reloaded=1> (дата обращения: 25.10.2023).

Fischedick M, Marzinkowski J, Winzer P., Weigel M. Technoeconomic Evaluation of Innovative Steel Production Technologies // Wuppertal Institute, [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/5644/file/5644_Fischedick.pdf (дата обращения: 25.10.2023).

Gils H. C., Scholz Y., Pregger T., Tena D. L., Heide D. Integrated Modelling of Variable Renewable Energy-based Power Supply in Europe, Energy № 123, pp. 173-188. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/313127382_Integrated_modelling_of_variable_renewable_energy-based_power_supply_in_Europe (дата обращения: 25.10.2023).

Glenk G., Holler P., Reichelstein S., Advances in Power-to-Gas Technologies: Cost and Conversion Efficiency // Stanford Business. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.gsb.stanford.edu/faculty-research/working-papers/advances-power-gas-technologies-cost-conversion-efficiency> (дата обращения: 25.10.2023).

Global Hydrogen Review 2021. // International Energy Agency (IEA). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021> (дата обращения: 25.10.2023).

Global Hydrogen Review 2022. // International Energy Agency (IEA). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022> (дата обращения: 25.10.2023).

Hornig P., Kalis M. Wasserstoff – Farbenlehre: Rechtswissenschaftliche und rechtspolitische Kurzstudie. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ikem.de/publikation/hornig2020/> (дата обращения: 25.10.2023).

Jugel C., Bamberg C., Edel M., Gründig D, Massow G., Müller M., Schenkluhn M., Siegemund S., Seidl H., Uhlig J., Hobohm J., Lübbers S., Seefeldt F., Thamling N. Dialogprozess Gas 2030 Hintergrundpapier. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/Hintergrundpapier_Dialogprozess_Gas_2030.pdf (дата обращения: 25.10.2023).

Kopp H., Moritz M., Scharf H., Schmidt J. Strukturwandel in der Gaswirtschaft – Was bedeutet die Entwicklung der Gas- und Wasserstoffnachfrage für die zukünftige Infrastruktur? // Zeitschrift für Energiewirtschaft, № 46, pp. 255-266. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12398-022-00335-2> (дата обращения: 25.10.2023).

Kopp H., Moritz M., Scharf H., Schmidt J. Strukturwandel in der Gaswirtschaft – Was bedeutet die Entwicklung der Gas- und Wasserstoffnachfrage für die zukünftige Infrastruktur? // Zeitschrift für Energiewirtschaft, № 46, pp. 255-266. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12398-022-00335-2> (дата обращения: 25.10.2023).

Michaelis J. Modellgestützte Wirtschaftlichkeitsbewertung von Betriebskonzepten für Elektrolyseure in einem Energiesystem mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien, 2018. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/328497818_Modellgestuzte_Wirtschaftlichkeitsbewertung_von_Betriebskonzepten_fur_Elektrolyseure_in_einem_Energiesystem_mit_hohen_Anteilen_erneuerbarer_Energien (дата обращения: 25.10.2023).

Schill W. P. Residual Load, Renewable Surplus Generation and Storage Requirements in Germany. Energy Policy № 73, pp. 65-79. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/264425451_Residual_load_renewable_surplus_generation_and_storage_requirements_in_Germany (дата обращения: 25.10.2023).

Tesla bekommt Wasser für 30.000 Menschen – dafür sollen die Anwohner sparen // FOCUS ONLINE. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.focus.de/panorama/welt/focus-online-reportage-gruenheide-tesla-der-wasserverband-hat-einfach-kein-wasser-mehr-zu-vergeben_id_184714793.html (дата обращения: 25.10.2023).

Ueckerdt F., Bauer C., Dirnaichner A., Everall J., Sacchi R., Luderer G. Potential and Risks of Hydrogen-based E-fuels in Climate Change Mitigation. // Nature Climate Change № 11, pp. 384-393.

Wasserstoff DIHK Faktenpapier. // Deutscher Industrieund Handelskammertag. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.dihk.de/resource/blob/24872/fd2c89df9484cf912199041a9587a3d6/dihkfaktenpapier-wasserstoff-data.pdf> (дата обращения: 25.10.2023).

Zöphel M., Möst D. The Value of Energy Storages under Uncertain CO₂-Prices and Renewable Shares, 14th International Conference on the European Energy Market, 14, pp. 1-5. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/318697526_The_value_of_energy_storages_under_uncertain_CO2-prices_and_renewable_shares (дата обращения: 25.10.2023).

