

УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ И ЗЕЛЕНАЯ ЭКОНОМИКА

УДК 338.12.017+338.22.021.1+338.242.4+338.28
JEL C43+O31+O33+O38+L50

Перспективы развития рынка водородных технологий: приоритеты государства и бизнеса

Н. П. Марчук, Ю. В. Туровец

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Российская Федерация, 101000, Москва, ул. Мясницкая, 20

Для цитирования: Марчук, Н. П. и Туровец, Ю. В. (2024) 'Перспективы развития рынка водородных технологий: приоритеты государства и бизнеса', *Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика*, 40 (3), с. 355–386. <https://doi.org/10.21638/spbu05.2024.302>

Дискуссии вокруг направлений применения водородных технологий в различных отраслях экономики в рамках зеленой повестки привели к появлению целого ряда национальных инициатив для развития данных технологий. По состоянию на конец 2023 г. более чем в 40 странах приняты водородные стратегии. В то же время технологии использования водорода остаются все еще недостаточно зрелыми для широкого использования из-за технологических барьеров, связанных в том числе с производством, хранением и транспортировкой водорода. Для преодоления барьеров выделяются значительные средства на исследования и разработки как правительствами стран, так и частными компаниями. В данной статье дана оценка существующего уровня развития водородных технологий на основе индексного и иных статистических методов для выявления наиболее перспективных отраслей применения. Проведен анализ текущего развития водородных решений на основе патентной и проектной активности компаний, направлений государственной поддержки на примере стран — импортеров энергоресурсов — ФРГ и Республики Корея. Анализ показал, что к числу ключевых сфер применения рассматриваемых технологий относится автотранспорт на топливных элементах и традиционные приложения (производство аммиака, метанола в химической промышленности). Водород также может использоваться в отдельных задачах электроэнергетики и ряде иных приложений. В перспективе водород может стать одним из источников сырья для энергетики, химической промышленности, автомобилестроения и металлургии. Правительства стран, активно инвестирующие в водородные технологии, стремятся расширить спектр их применения путем привлечения инвестиций крупных компаний тех отраслей, в которых уже сегодня водород востребован в производственные цепочки.

Ключевые слова: водородные технологии, водородная энергетика, импортеры энергоресурсов, водородная инфраструктура, ценностные цепочки, шкала видов водорода, водородная политика, водородные проекты и инвестиции, индекс применения водородных технологий.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2024

Введение

Новый энергетический кризис и зависимость стран с крупным промышленным сектором, в первую очередь стран Евросоюза и Восточной Азии (Японии и Южной Кореи), от импорта энергоресурсов заставляют искать новые источники энергии, а также способы их применения. Водородные технологии стали рассматривать в качестве альтернативы использования углеводородов еще в конце XX в. На тот момент от идей внедрения водорода было решено отказаться ввиду дороговизны его производства, хранения, а также ряда свойств: взрывоопасности, летучести и др.¹ Под водородными технологиями подразумевается совокупность различных технических решений, которые позволяют использовать водород в качестве энергоносителя².

К началу 2010-х годов на фоне нового финансового кризиса на водород снова обратили внимание как на один из элементов зеленой повестки. Во-первых, это способ стабилизации систем хранения для ВИЭ (возобновляемых источников энергии, солнечной, ветряной) и энергосистемы в целом. Во-вторых, водород имеет более высокую энергоемкость по сравнению с ископаемым топливом, например его показатели в МДж/кг превышают таковые у автомобильного бензина в три раза (Satyapal et al., 2007, p. 246)³.

Целый ряд стран, особенно ЕС и Восточной Азии (прежде всего Япония и Республика Корея), рассматривают водород как способ снижения зависимости от импорта традиционных ископаемых энергоносителей. С учетом данного факта прогнозируется, что к 2050 г. рост доли водорода на мировом рынке энергоресурсов достигнет 9,4% (в 2023 г. этот показатель составлял менее 1%⁴). По всему миру, в том числе в России, постепенно инвестируются значительные средства в крупные водородные проекты для дальнейшего экспорта водорода⁵.

Однако переход на водородные решения может растянуться на несколько десятилетий и потребовать больших инвестиций в развитие технологий. Период встраивания в экономику новых ресурсов, включая исследования, испытания технологий для эксплуатации, полномасштабное внедрение, как правило, составляет десятки лет (например, атомной энергетике США потребовалось порядка 40 лет, чтобы занять 20% в энергобалансе страны)⁶.

В последние годы мир охватила новая «водородная лихорадка», которая пока не позволяет взвешенно оценить потенциал применения водорода в качестве энергоносителя. В недавнем отчете МЭА (Международного энергетического агентства,

¹ Росатом. (2020) *Эра водорода*. URL: <https://rosatomnewsletter.com/ru/2020/07/25/era-of-hydrogen/> (дата обращения: 23.08.2023).

² РГИ. *Водородные технологии*. URL: https://rusge.ru/expertise/hydrogen_industry/ (дата обращения: 23.08.2023).

³ Мегаджоуль на килограмм (МДж/кг) — удельная теплота сгорания.

⁴ IRENA. (2022) *Geopolitics of the Energy Transformation. The Hydrogen Factor*, p. 11. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA_Geopolitics_Hydrogen_2022.pdf (дата обращения: 21.09.2023).

⁵ Марчук, Н. П. и Туровец, Ю. В. (2023) Перспективы водородной энергетики, *ИСИЭЗ*, 15 июня. URL: <https://issek.hse.ru/news/840275432.html> (дата обращения: 21.09.2023).

⁶ Smil, V. A. (2012) Skeptic Looks at Alternative Energy, *IEEE*, June 28. URL: <https://spectrum.ieee.org/a-skeptic-looks-at-alternative-energy> (дата обращения: 21.09.2023).

IEA) прогнозы относительно водорода носят более реалистичный характер⁷. Вместе с тем возможности практического применения водородных решений (например, топливных элементов) выходят далеко за пределы энергетической отрасли. На современном этапе водород пользуется спросом не как энергоресурс, а как компонент в химической и нефтегазовой отраслях⁸. Уже сегодня многие страны изучают возможности и ограничения водородных технологий, задавая вектор развития для частных компаний.

Водородную повестку активно развивают страны с мощным промышленным сектором и зависимые от импортных поставок энергетических ресурсов. К их числу относятся Республика Корея и ФРГ, чей чистый импорт энергии составляет 80 % и 61 % соответственно⁹. В текущем общемировом потреблении водорода обе страны входят в топ-15: ФРГ в составе ЕС занимает 5-е место, Республика Корея — 13-е¹⁰. На протяжении последних двух десятилетий они активно инвестируют в водородные технологии. Обе страны были в числе первых, опубликовавших свои водородные стратегии, — Республика Корея в 2019 г. и ФРГ в 2020 г. вместе с другими европейскими странами¹¹.

В литературе достаточно широко обсуждаются перспективы водорода как энергоносителя, при этом уделяется мало внимания другим возможностям применения водородных технологий. Цель настоящего исследования — определить текущие тренды и перспективы применения водородных решений в различных отраслях экономики, а также роль государства и бизнеса в этом процессе на примере ФРГ и Республики Корея. Эти страны заинтересованы в водороде как энергоресурсе и готовы вкладываться в решения по всей технологической цепочке (от производства до масштабирования потребления). Были сформулированы следующие задачи: 1) анализ государственной политики в сфере разработки и внедрения водородных решений; 2) анализ инициатив бизнеса на основе актуальных статистических данных; 3) разработка нового показателя (индекса) применения водородных технологий в экономике. Предполагается, что водород не замещает, но дополняет традиционные источники не только в энергетике, но и в обрабатывающей промышленности (рис. 1).

Масштабные инвестиции, как правило, требуют либо значительного объема рынка для достижения эффекта масштаба, либо большого числа сфер (направлений) применения, как в случае с водородными технологиями. Для оценки их потен-

⁷ IEA. (2023) *Global Hydrogen Review*. URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023> (дата обращения: 25.08.2023).

⁸ The Chemical Engineers. (2019) *Uses of Hydrogen in Industry*. URL: <https://www.thechemicalengineer.com/features/uses-of-hydrogen-in-industry/> (дата обращения: 25.08.2023).

⁹ H2i. (2021) *Country Profiles. Germany*. URL: <https://www.h2-index.com/s/Germany-Tearsheet-vF.pdf> (дата обращения: 25.08.2023); H2i. (2021) *Country Profiles. South Korea*. URL: <https://www.h2-index.com/s/South-Korea-Tearsheet-vF-6lhz.pdf> (дата обращения: 25.08.2023).

¹⁰ IRENA. (2022) *Geopolitics of the Energy Transformation. The Hydrogen Factor*, p.25. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA_Geopolitics_Hydrogen_2022.pdf (дата обращения: 21.09.2023).

¹¹ WEC. (2021) *Working Paper on hydrogen strategies*, p. 4. URL: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Working_Paper_-_National_Hydrogen_Strategies_-_September_2021.pdf (дата обращения: 29.07.2023).

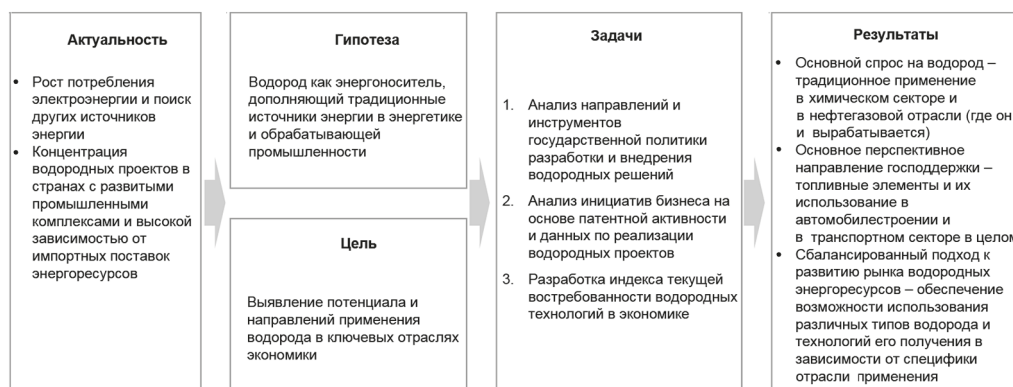


Рис. 1. Схема исследования

циала был использован индексный метод, основанный на различных показателях, связанных с разработкой водородных технологий.

Статья содержит введение, шесть разделов и заключение. В первом представлен общий обзор роли водорода как энергоносителя на современном этапе технологического развития. Во втором разделе дан краткий обзор литературы, связанной с водородными технологиями (на примере ФРГ и Южной Кореи). Третий раздел посвящен методологии. В четвертом представлен анализ водородной политики стран — импортеров энергоресурсов на примере Республики Корея и ФРГ. В пятом дана оценка текущего развития водородных технологий в отобранных странах на основе разработанного индекса применения водородных технологий. В шестом разделе проанализированы перспективы использования водородных решений на базе патентной активности бизнеса. В заключении изложены общие выводы о возможностях дальнейшего внедрения водородных технологий.

1. Роль использования водорода в экономике

Термин «водородная экономика» и идея использования водорода для снижения нагрузки на окружающую среду в качестве альтернативы углеводородному топливу были подробно рассмотрены еще в 1970 г. (Lawrence, 1970). Ранее в 1960-х годах НАСА (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, НАСА; National Aeronautics and space administration, NASA) впервые применило щелочные топливные элементы для питания электрических компонентов космических капсул, которые затем получили более широкое распространение¹². Топливными элементами называют устройства, которые используют топливо (водород) для генерации электричества в ходе электрохимического процесса¹³.

Широкое использование топливных элементов на основе водорода началось относительно недавно, в начале 2000-х годов, например для применения в качестве

¹² LePan, N. (2019) The Evolution of Hydrogen: From the Big Bang to Fuel Cells, *Visual Capitalist*, April 23. URL: <https://www.visualcapitalist.com/evolution-of-hydrogen-fuel-cells/> (дата обращения: 22.09.2023).

¹³ Neftegaz.RU. (2023) *Топливные элементы*. URL: <https://neftgaz.ru/tech-library/energeticheskoe-oborudovanie/801128-toplivnye-elementy/> (дата обращения: 22.11.2023).

электрогенераторов на удаленных объектах или для погрузочно-разгрузочной техники¹⁴. В качестве сырья водород имеет узкое специализированное применение в ряде отраслей, в основном в химической (для производства метанола, аммиака), нефтяной промышленности, металлургии и др.¹⁵

Удорожание нефти и газа привело к росту популярности водорода как энергоресурса в 2000-е годы¹⁶. Особенно популярны стали топливные элементы в автотранспортной промышленности (Bakker and Budde, 2012, p. 552). Например, в начале 2000-х годов Daimler (ФРГ) стал инвестировать в производителя топливных элементов Ballard (Канада)¹⁷. Общемировые государственные инвестиции в исследования и разработки (ИР) в сфере водорода в 2006 г. достигли более 1 млрд долл. (8,9% от общемировых инвестиций в энергетические ИР), а с 2009 г. пошли на спад и составили только 5%, когда интерес к водороду стал снижаться¹⁸.

Вновь водородная повестка возникла после финансового кризиса 2008–2010 гг. К 2015 г. начался резкий рост количества публикаций в сфере водородных технологий: с менее 30 в 2011 г. до 198 в 2020 г. (Kar, Harichandan and Roy, 2022, p. 10806). Отчасти это связано с тем, что в течение 2010-х годов стала активно продвигаться повестка перехода к безуглеродной экономике, направленная на разработку альтернативных экологически чистых видов топлива (Kar, Harichandan and Roy, 2022, p. 10807).

Наряду с этим был накоплен определенный прогресс в самих технологиях. Стали появляться работы, посвященные различным аспектам развития водородных технологий на разных этапах цепочек создания стоимости (ЦСС). Больше всего ученые уделяют внимание способам производства водорода и сравнению их эффективности. В работе одних из наиболее цитируемых авторов в данной области было выделено 19 методов производства водорода (Dincer and Acar, 2015, p. 11096). По показателю энергоэффективности лидировал метод риформинга полезных ископаемых, прежде всего природного газа (Dincer and Acar, 2015, p. 11109).

Постепенно стала использоваться неофициальная «цветовая» шкала водорода, основанная на способах его получения (табл. 1). Зеленый водород, получаемый с помощью электролиза, по себестоимости считается наиболее дорогим (10 долл. за кг) из-за низкого уровня развития технологий и малых масштабов¹⁹. В то же время себестоимость серого и коричневого в разы меньше и варьируется от 2 до 2,5 долл. за кг²⁰. Наиболее выгодным представляется использование голубого водорода, производство которого предполагает улавливание CO₂, а себестоимость оце-

¹⁴ FuelCellsWorks. (2022) *History*. URL: <https://fuelcellworks.com/knowledge/history/> (дата обращения: 21.09.2023).

¹⁵ The Chemical Engineers. (2019) *Uses of Hydrogen in Industry*. URL: <https://www.thechemicalengineer.com/features/uses-of-hydrogen-in-industry/> (дата обращения: 25.08.2023).

¹⁶ EnergyNet. (2019) *Russia's prospects in the global hydrogen fuel market*, p. 8. URL: <https://www.eprussia.ru/upload/iblock/ede/ede334adeb4c282549a71d6fec727d64.pdf> (дата обращения: 28.08.2023).

¹⁷ EE Power. (2005) *DaimlerChrysler and Ford Invest \$55 Million in Ballard*. URL: <https://eeperpower.com/news/daimlerchrysler-and-ford-invest-55-million-in-ballard/> (дата обращения: 21.09.2023).

¹⁸ IEA. (2023) *Energy Technology RD&D Budgets Data Explorer*. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-technology-rdd-budgets-data-explorer> (дата обращения: 21.09.2023).

¹⁹ Атомные города. (2021) *Водородная энергетика, точки роста*, с. 8. URL: https://eco.atomgoroda.ru/content/media_files/1639985559-25786.pdf (дата обращения: 25.08.2023).

²⁰ Там же.

Таблица 1. «Цветовая» классификация водорода

Цветовое соответствие	Технология получения	Источник энергии для получения водорода	Уровень выбросов CO ₂
Зеленый	Электролиз (т. е. разложение воды на водород и кислород с использованием электроэнергии)	Солнечная, ветровая энергия, гидроэнергия, геотермальная и др.	Минимальный
Желтый		Смешанная энергосистема	Средний
Розовый/фиолетовый		Энергия АЭС	Минимальный
Голубой	Риформинг природного газа, т. е. метана (CH ₄) с использованием технологии улавливания, хранения и утилизации выделяемого CO ₂ (CCUS)	В основном природный газ (метан, CH ₄)	Низкий
Бирюзовый	Пиролиз	Природный газ (метан, CH ₄)	Твердый углерод (побочный продукт)
Серый	Риформинг природного газа		Средний
Коричневый	Газификация угля	Бурый уголь	Высокий
Черный		Черный уголь	

Составлено по: WEC. (2021) *Working Paper on hydrogen strategies*, p.15. URL: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Working_Paper_-_National_Hydrogen_Strategies_-_September_2021.pdf (дата обращения: 29.07.2023).

нивается в 2 долл. (практически в 5 раз ниже зеленого)²¹. В настоящее время более 60 % водорода получают из природного газа, 20 % из угля, тогда как на экологичные способы производства (электролиз и др.) приходится менее 1 %²².

Текущий рост интереса к водородным технологиям начиная со второй половины 2010-х годов имеет ряд особенностей. В отличие от предыдущих периодов вкпе с технологическими достижениями он сопровождается значительной государственной поддержкой²³. Уже достигли высокого уровня зрелости технологии электролиза и создания топливных элементов на водороде. Мощность электролизеров для производства водорода возросла с менее 2 МВт электроэнергии в 2010 г. до 143 Вт в 2020 г.²⁴ Кроме того, развитию водородных технологий способствуют многочисленные водородные проекты, затраты на реализацию которых к 2030 г. могут превысить 300 млрд долл.²⁵

В то же время относительно других направлений в области энергетики водород и топливные элементы все еще занимают небольшую, но значимую нишу — 9,2% в 2022 г. (5,8% годом ранее) от мировых затрат на государственные исследования

²¹ Атомные города. (2021) *Водородная энергетика, точки роста*, с. 8. URL: https://eco.atomgoroda.ru/content/media_files/1639985559-25786.pdf (дата обращения: 25.08.2023).

²² IEA. (2023) *Global Hydrogen Review 2023*, p.64. URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023> (дата обращения: 25.08.2023).

²³ WEC. (2019) *Innovation. Insights Briefs*, p.6. URL: <https://www.worldenergy.org/assets/downloads/WENnovation-Insights-Brief-New-Hydrogen-Economy-Hype-or-Hope.pdf> (дата обращения: 25.08.2023).

²⁴ IEA. (2022) *Capacity of electrolyzers for hydrogen production by commissioning year and intended use of hydrogen, 2010-2020*. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/capacity-of-electrolyzers-for-hydrogen-production-by-commissioning-year-and-intended-use-of-hydrogen-2010-2020> (дата обращения: 25.09.2023).

²⁵ Hydrogen Council. (2021) *Hydrogen Insights 2021*, p.7. URL: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021.pdf> (дата обращения: 25.08.2023).

и разработки в области энергетики. Для сравнения: на ядерные технологии пришлось 20,7 % в 2022 г.²⁶

Водород сегодня в нефтехимической промышленности не имеет широкого применения как энергоноситель. В 2022 г. из 95 млн т произведенного водорода менее 0,1 % пришлось на новые области применения в тяжелой промышленности, транспортном секторе и энергетике²⁷. Отсутствие технической возможности транспортировки препятствует формированию рынка водорода. Крайне затратным считается хранение водорода. В частности, его сжижение для последующего хранения является энергоемким процессом (требует 30–40 % энергии, содержащейся в водороде)²⁸. Водород в целом довольно сложно использовать из-за его чрезвычайно низкой плотности (Tarasov, Lototskyu and Yartys, 2007, p. 694).

Возможности применения водорода во многом ограничены указанными барьерами. Вместе с тем вопросы создания жизнеспособных решений на его основе в последние годы актуальны в международной повестке. На это указывают различные прогнозы по снижению себестоимости производства водорода, в первую очередь зеленого, который может к 2030 г. сравниться с серым и голубым по цене по мере снижения стоимости электролизеров²⁹. В перспективе возможно удешевление и масштабирование систем транспортировки (трубопроводы) и хранения водорода, так как разрабатываются системы хранения в малых масштабах и подземные хранилища для крупных объемов водорода³⁰. Однако внедрение таких решений требует дальнейших исследований, разработок и масштабирования в рамках государственно-частных партнерств.

2. Обзор литературы о влиянии водородных технологий на экономику

Литературу, посвященную развитию водородных технологий, можно разделить на три ключевые группы (прил. 1): 1) общий анализ водородной политики с акцентом на поддержку исследований и разработок; 2) роль бизнеса и его отношение к развитию водородных технологий; 3) прогнозы/эффекты развития рынка водородных решений в ФРГ и Республике Корея.

Литература, входящая в первую ключевую группу, касается основных аспектов водородной политики обеих стран, где исследуются их приоритеты, цели, основ-

²⁶ IEA. (2023) *Energy Technology RD&D Budgets Data Explorer*. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-technology-rdd-budgets-data-explorer> (дата обращения: 21.09.2023).

²⁷ IEA. (2023) *Global Hydrogen Review 2023*, p. 13. URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023> (дата обращения: 25.08.2023).

²⁸ IDTechEx. (2023) *Hydrogen Economy 2023–2033: Production, Storage, Distribution & Applications*. URL: <https://www.idtechex.com/en/research-report/hydrogen-economy-2023-2033-production-storage-distribution-and-applications/946> (дата обращения: 25.08.2023).

²⁹ IRENA. (2021) *Making the Breakthrough: Green hydrogen policies and technology costs*, p. 8. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_Hydrogen_breakthrough_2021.pdf?la=en&hash=40FA5B8AD7AB1666EECBDE30EF458C45EE5A0AA6 (дата обращения: 25.08.2023).

³⁰ IDTechEx. (2023) *Hydrogen Economy 2023–2033: Production, Storage, Distribution & Applications*. URL: <https://www.idtechex.com/en/research-report/hydrogen-economy-2023-2033-production-storage-distribution-and-applications/946> (дата обращения: 25.08.2023).

ные инструменты и проекты. В целом работы посвящены специфическим вопросам водородной энергетики, например технологиям, необходимым для развития газотранспортной инфраструктуры (Cerniauskas et al., 2020) или сети водородных заправочных станций (Kim, Eom and Kim, 2020).

Отдельно можно выделить авторов, которые составили подробное описание научно-технической и инновационной политики исследуемых стран (Delaval et al., 2022a; 2022b). Аналогичные исследования были подготовлены по Южной Корее и ФРГ с акцентом на правовых и политических аспектах поддержки развития водородных технологий (Burchard, 2021; Song, 2021).

Вторая группа исследований посвящена тому, как бизнес реагирует на развитие водородной энергетики, продвигаемой государствами. В работах на уровне секторов экономики (Schlund, Schulte and Sprenger, 2022; Gils, Gardian and Schmutge, 2021) и конкретных компаний в ЕС (Klerk Wolters, 2021) рассмотрены роль и позиция основных представителей бизнеса касательно внедрения водорода в экономику ФРГ.

Статьи, входящие в третью группу, посвящены потенциальным эффектам от внедрения водорода в экономику. Выводы таких исследований носят в основном прогностический характер. Наиболее системными являются работа Дж. Ф. Джорджа, В. Мюллера, Дж. Винклера и М. Рагвица (J. F. George, V. Müller, J. Winkler, M. Ragwitz (George et al., 2022)) по ФРГ и исследование Дж. Чоя, Д. Г. Чоя и С. Ю. Пака (Choi J., Choi D. G. and Park S. Y. (Choi, Choi and Park, 2022)) по энергетической системе Южной Кореи. В обеих работах приведены расчеты в пользу видов водорода, получаемого из природного газа.

Несмотря на многие технологические барьеры и дискуссии, исследователи признают потенциал водородных технологий. Вместе с тем относительно меньше внимания уделено сферам, задачам и сценариям применения водорода. Именно данный фактор может решающим образом повлиять на становление рынка водорода в ближайшем десятилетии.

3. Методология исследования

Чтобы проанализировать возможности применения водородных технологий в различных отраслях экономики, был сформирован подход к исследованию, который включает три этапа: 1) анализ приоритетов, отраженных в основных стратегических документах и законах в области водородных технологий, программ исследований и разработок (ИР) и основных мер поддержки частного сектора на уровне стран; 2) анализ особенностей патентной и проектной активности в области водородных технологий, текущего состояния спроса на водород и водородной инфраструктуры на уровне частных и государственных компаний; 3) разработку совокупного странового индекса применения водородных технологий.

В качестве источников были использованы различные эмпирические ресурсы, обеспечивающие комплексный анализ тематики водородных технологий. Это национальные стратегии, дорожные карты и планы действий ФРГ и Республики Корея, статистические данные МЭА (по госрасходам на энергетические исследования и разработки в сфере водородных технологий и топливных элементов).

По водородным проектам была агрегирована информация на основе базы МЭА, а также национальных организаций об инвестициях в водородные техно-

логии и др. Кроме того, при анализе роли частного сектора и его взаимодействия с государством были изучены данные крупных конгломератов в части патентной активности (в транспортной отрасли, энергетическом, химическом секторе и др.), представленные в работах МЭА. На основе изученных источников и литературы сформирован перечень наиболее перспективных сфер применения водородных технологий. В него вошли такие сферы, как автомобилестроение и производство транспортных средств в целом, химическая промышленность и теплоснабжение.

Для сравнения уровня развития и внедрения водородных технологий в разных странах был разработан страновой индекс применения водородных технологий. Показатели отбирались с учетом существующих индексов в сфере развития водородных технологий:

1) индекса водородной экономики (H_2 Economy), исследующего текущую инвестиционную активность 15 стран в сфере водородных технологий в пяти отраслях (транспорт, энергетика, теплоэнергетика, использование водорода в качестве сырья в промышленности, импорт/экспорт) на основе трех выведенных категорий: регулирования; инфраструктуры и развитости рынка; развитости сферы исследований, разработок и демонстрационных проектов³¹;

2) индекса инвестиционной привлекательности водорода (H_2i), который построен на основе агрегирования 25 показателей у 40 стран по шести категориям: регулирования и государственной поддержки; развитости систем транспортировки и хранения водорода; инвестиционной привлекательности; потенциала использования ВИЭ; потенциала внутреннего спроса и энергетической безопасности³².

По каждому индексу топ-5 стран в значительной мере совпадает. В случае индекса H_2i было взято больше пяти стран, так как некоторые государства имели одинаковые значения. В целом к числу стран, лидирующих в развитии водородных технологий, можно отнести следующие: Республику Корея, Японию, ФРГ, Францию, США, Испанию, Австралию, Нидерланды, Великобританию, Италию, Канаду и КНР (табл. 2).

Рассмотренные индексы не содержат в полной мере требуемой для анализа информации. Поэтому был предложен индекс применения водородных технологий, содержащий шесть показателей, разделенных на две группы (прил. 2). Разные показатели были нормализованы по шкале от 0 до 1 и затем просуммированы.

Первая группа показателей «Инновационная активность» включает данные, отражающие текущую степень развития водородных технологий на уровне: 1) патентной активности частного сектора как на общем уровне, так и на уровне компаний-лидеров; 2) государственной поддержки в рамках научно-технической политики и инвестиций в ИР; 3) водородных проектов как способа демонстрации новых технологий. Для анализа патентной активности были использованы показатели патентной деятельности по различным отраслям промышленности и этапам цепочки создания стоимости водорода (производство, хранение, транспортировка, использование в отраслях экономики), собранные МЭА (прил. 2). Основной индикатор — количество международных патентных семейств (IPF, прил. 2).

³¹ Bloomberg. (2021) *The H₂ Economy*. URL: <https://sponsored.bloomberg.com/immersive/hyundai/the-h2-economy> (дата обращения: 20.07.2023).

³² H₂i. (2021) *About*. URL: <https://www.h2-index.com/about> (дата обращения: 19.07.2023).

Таблица 2. Страны-лидеры в мировых рейтингах в области водородных технологий

Страна	Значение индекса H ₂ Есопому (максимум 3 балла)	Страна	Значение индекса H2i (максимум 5 баллов)
ФРГ	2,94	ФРГ	4,7
Япония	2,87	Испания	4,2
Республика Корея	2,78	США, Австралия, Франция	4,0
Франция	2,57	Нидерланды, Италия, Великобритания, Канада	3,9
Нидерланды	2,40	КНР, Япония, Республика Корея	3,6

Составлено по: Bloomberg. (2021). *The H₂ Economy*. URL: <https://sponsored.bloomberg.com/immersive/hyundai/the-h2-economy> (дата обращения: 20.07.2023); H2i. (2021). URL: <https://www.h2-index.com/about> (дата обращения: 19.07.2023).

Вторая группа показателей «Развитие водородных технологий для транспортного сектора» отражает важность водорода для транспортной сферы. В последние десятилетия активно поддерживается применение топливных элементов в автотранспортной отрасли, где уже имеются готовые для коммерциализации решения, в частности на рынке существуют модели гибридных автомобилей на топливных элементах (FCEV — fuel cell electric vehicle)³³. Основным показателем данной группы является количество FCEV на одну водородную заправку³⁴. Показатель был посчитан на основе баз данных о количестве водородных автомобилей и заправок Международного партнерства в области использования водорода и топливных элементов в экономике (IPHE) и МЭА, которые собирают информацию от национальных ведомств, ответственных за водородные технологии (прил. 2).

Новый индекс позволяет агрегировать существующие основные показатели в сфере стимулирования развития водородных решений и их применения. Индекс показывает, насколько успешно странам, в первую очередь импортерам энергоресурсов, удалось внедрить водородные технологии после десятилетий инвестирования в исследования и разработки, в том числе в топливные элементы. Главное отличие нового индекса от предыдущих заключается в фокусе на потреблении решений.

4. Водородная политика стран-импортеров на примере Республики Корея и ФРГ

Ввиду начального этапа развития водородных технологий ведущей остается роль государства, берущего на себя риски развития нового технологического на-

³³ Hambleton, J. (2023) Country's First Hydrogen Cars Come to Market, Emitting Only Water and Purifying the Air as They Drive, *The Premier Daily*, January 16. URL: <https://thepremierdaily.com/hydrogen-cars/#:~:text=Hyundai%20and%20Toyota%20In%20On,models%20in%20the%20near%20future> (дата обращения: 22.07.2023).

³⁴ Samsun, R. C., Laurent, A., Rex, M. and Stolten, D. (2021) Deployment Status of Fuel Cells in Road Transport: 2021 Update. *Forschungszentrums Jülich*, p.17. URL: https://ieafuelcell.com/fileadmin/webfiles/2021-Deployment_status_of_fc_in_road_transport.pdf (дата обращения: 19.05.2023).

правления, на которые не готов идти частный сектор (Mazzucato, 2013). Республика Корея и ФРГ активно занимаются развитием водорода с 2000-х годов. В ФРГ в 2007 г. была запущена межведомственная Национальная инновационная программа по технологиям водорода и топливных элементов (NIP) для финансирования передовых исследований. Только в рамках 1-й фазы (2007–2016) было выделено приблизительно 764 млн долл.³⁵ В ходе ее осуществления удалось снизить стоимость создания различных типов топливных элементов более чем на 50 %³⁶. В Южной Корее еще в начале 2000-х годов была поставлена задача развития рынка водородных топливных элементов, что привело к росту государственных расходов в ИР. Например, к 2010 г. в один только специализированный Водородный центр исследований и разработок было вложено 100 млн долл. (Azni and Md Khalid, 2021, p. 6).

Политика строится вокруг этапов цепочки создания стоимости и выходит за пределы одной страны, то есть предполагает импорт водорода или сырья (природный газ, аммиак и др.) с производством на своей территории и экспорт технологий. В Южной Корее Министерство торговли, промышленности и энергетики (MOTIE) изучает возможности для импорта водорода из шести стран: Саудовской Аравии, Австралии, США и др. (Delaval et al., 2022b, p. 35). Аналогично в ФРГ и в Европе имеются планы по импорту водорода из Северной Африки³⁷.

Развитие водорода — это не только про технологии, но и про новые модели экономического взаимодействия. Республика Корея — первая страна, где разработан закон о водороде, вступивший силу в 2021 г. Согласно данному закону (Hydrogen Economy Promotion and Hydrogen Safety Management Act), производственные предприятия, поставляющие водород для транспортных средств на топливных элементах, должны сообщать государству цену продажи³⁸. Данный акт предполагает поддержку компаний, развивающих водородные технологии, посредством льгот и субсидий в обмен на строительство и эксплуатацию водородных заправочных станций и др. (Delaval et al., 2022b, p. 13).

Он устанавливает требования к безопасности уже пригодного для коммерческого использования водородного оборудования, процессы сертификации и разъясняет роли и обязанности различных государственных учреждений. Дело в том, что возможности применения водорода на практике в различных отраслях зависят от многих факторов, и прежде всего от сертификации. За эту задачу могут отвечать разные органы. Так, в Южной Корее сертификацию топливных элементов и других технологий проводит Корейская ассоциация стандартов, за испытание и сертификацию газового оборудования высокого давления (установки

³⁵ PTJ. (2023) *National Innovation Programme Hydrogen and Fuel Cell Technology (NIP)*. URL: <https://www.ptj.de/en/project-funding/nip> (дата обращения: 21.08.2023).

³⁶ Atomic Expert. (2022) *Водородная республика Германия*. URL: https://atomicexpert.com/hydrogen_republic_of_germany (дата обращения: 21.08.2023).

³⁷ Pandey, R. and Ponsford, V. (2023) Africa and Europe set to be the dynamos for the global green hydrogen economy, *Rystad Energy*, March 21. URL: <https://www.rystadenergy.com/news/africa-and-europe-set-to-be-the-dynamos-for-the-global-green-hydrogen-economy> (дата обращения: 21.08.2023).

³⁸ Lee, K.-W. (2021) Implementation of the World's First "Hydrogen Law" Expected to Accelerate the Hydrogen Economy, *Chambers and Partners*, February 8. URL: <https://chambers.com/articles/implementation-of-the-world-s-first-hydrogen-law-expected-to-accelerate-the-hydrogen-economy> (дата обращения: 21.08.2023).

для паровой конверсии метана, компрессоры, резервуары для хранения) отвечает госкомпания KGS и др.³⁹

Регуляторы стремятся выстроить целостную систему управления водородными технологиями как социально-экономическим явлением. Один из атрибутов этой политики — наличие классификации. Для этого в ФРГ в 2021 г. было принято сразу два нормативных акта, касающихся водорода: закон об энергетической промышленности и закон о возобновляемых источниках энергии. В них среди прочего приведена классификация водорода, что создает нормативную базу для операторов электростанций и энергосетей (Ringsgwandl et al., 2022, p. 14). Федеральное сетевое агентство Германии взяло на себя обязанности по регулированию водородных сетей в соответствии с законом об энергетической промышленности⁴⁰.

В основе текущего развития водородных технологий лежат многочисленные меры государственной поддержки. В ФРГ и Южной Корее действуют 13 мер, которые применяются для разных этапов создания стоимости (прил. 3). Основными являются налоговые стимулы, субсидии, инновационные зоны (кластеры) и др. Например, правительства полностью или частично финансируют строительство заправочных станций для водородного транспорта, а также компенсируют издержки на его приобретение для потребителей⁴¹.

Страны, инвестирующие в водород, делают ставку на развитие технологий, применимых на всех этапах цепочки создания стоимости. Основное различие связано с технологиями производства. В Южной Корее предпочтение отдается зеленому, серому и голубому водороду, в то время как в ФРГ — зеленому и в меньшей степени голубому⁴². В ФРГ из более чем 182 производственных проектов только два связаны с водородом на основе природного газа, остальные — с технологиями для электролиза⁴³.

На Южную Корею приходится всего 11 проектов, из них четыре связаны с голубым водородом⁴⁴. Кроме того, именно в Южной Корее была открыта первая электростанция на водородных топливных элементах, которая вырабатывает электроэнергию с использованием водорода (серого), остающегося от нефтехимических предприятий⁴⁵. Считается, что производство водорода посредством электролиза воды оптимально для малых масштабов, в то время как для крупных эффективнее использовать паровой риформинг метана для получения серого и голубого водо-

³⁹ Austrade. (2022) *Korean Hydrogen Market Update. South Korea*, p. 7–8. URL: <https://www.austrade.gov.au/ArticleDocuments/1358/Korea%20Hydrogen%20Market%20Update%20June%202022.docx.aspx> (дата обращения: 28.08.2023).

⁴⁰ Neziri, A. (2021) Germany's BNetzA assumes hydrogen regulation responsibilities, *ICIS*, July 30. URL: <https://www.icis.com/explore/resources/news/2021/07/30/10669071/germany-s-bnetza-assumes-hydrogen-regulation-responsibilities/> (дата обращения: 20.05.2023).

⁴¹ IEA. (2022) *Global EV Outlook 2022*, p. 33. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022> (дата обращения: 25.08.2023).

⁴² WEC. (2021) *Working Paper on hydrogen strategies*, p. 15. URL: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Working_Paper_-_National_Hydrogen_Strategies_-_September_2021.pdf (дата обращения: 29.07.2023).

⁴³ IEA. (2023) *Hydrogen Projects Database*. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database> (дата обращения: 21.09.2023).

⁴⁴ Ibid.

⁴⁵ Kyong-ae, C. (2020) World's 1st byproduct hydrogen fuel cell power plant built in S. Korea, *YNA*, July 28. URL: <https://en.yna.co.kr/view/AEN20200728006000320> (дата обращения: 21.08.2023).

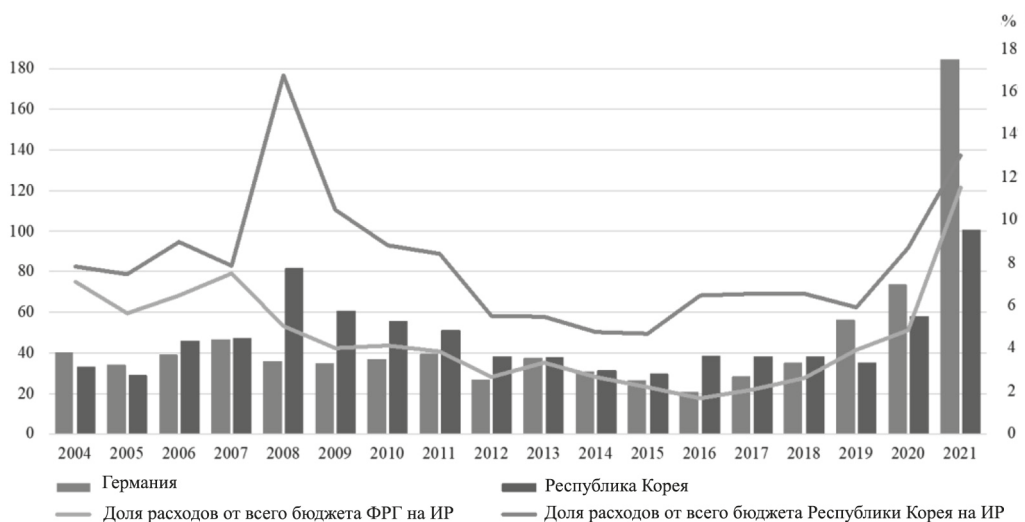


Рис. 2. Государственные расходы Республики Корея и ФРГ на исследования и разработки в области водородных технологий и топливных элементов, млн долл. и проценты от общей суммы расходов на ИР в области энергетики

Составлено по: IEA. (2023) *Energy Technology RD&D Budgets Data Explorer*. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-technology-rdd-budgets-data-explorer> (дата обращения: 21.09.2023)

рода (Lee et al., 2017, p. 6469). Это, в свою очередь, указывает на более прагматичный (комбинирование различных видов) подход Южной Кореи в сфере развития технологий производства водорода, которым необходимо доказать свою конкурентоспособность.

Значительная часть мер государственной поддержки направлена на финансирование исследований и разработок. Государственные расходы на энергетические ИР в сфере водорода обеих стран следуют ранее описанным мировым трендам (см. разд. 1). К концу 2000-х годов, после периода роста, инвестиции стали сокращаться, но с середины 2010-х годов снова расти с колебаниями по настоящее время как в абсолютных, так и в относительных значениях на фоне новой волны интереса к водородным решениям (рис. 2).

На протяжении долгого времени ИР в сфере водородных технологий в Южной Корее финансировались активнее, чем в ФРГ, которая стала наращивать инвестиции в только с 2016 г. (рис. 2). К 2021 г. доли расходов на водородные ИР приблизились к высоким отметкам: 14% в Республике Корея и 12% в ФРГ. Между странами разница значительная и по средним долям от общих расходов на энергетические ИР за весь период, опережает Республика Корея. Средняя доля ее водородных инвестиций за период является крайне высокой — 8%, в то время как у ФРГ — 4%, а общее среднее значение среди отобранных стран — 5%⁴⁶.

В ФРГ и Южной Корее в рамках научно-технической политики основное внимание уделяется двум важным направлениям: технологиям потребления водорода

⁴⁶ Рассчитано авторами на основе: IEA. (2023) *Energy Technology RD&D Budgets Data Explorer*. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-technology-rdd-budgets-data-explorer> (дата обращения: 21.09.2023).

в автотранспортном секторе и его производства. В ФРГ на 2020-е годы запланировано выделить на ИР, преимущественно на указанные цели, например производство зеленого водорода, приблизительно 2,7 млрд долл. (Fuhrmann, 2020, p. 4).

Сравнительно меньше внимания уделяется системам хранения и транспортировки водорода. Согласно подсчетам южнокорейских авторов, всего с 2015 по 2020 г. в стране в водородные ИР было инвестировано более 565,7 млн долл. (Lee and Kim, 2021, p. 18). Из них более 56 % — в технологии и инфраструктуру для производства зеленого и голубого водорода и только 14,6 % — на технологии хранения водорода и его транспортировки (Lee and Kim, 2021, p. 18).

Аналогичная ситуация в ФРГ, ее флагманский проект TransHyDE, направленный на развитие технологий транспортировки водорода, например контейнеров высокого давления, получает финансирование от Федерального министерства образования и научных исследований (BMBWF) в размере 150 млн долл. с 2021 г. в течение 4 лет⁴⁷. В то время как на основную водородную исследовательскую программу ФРГ — вторую фазу Национальной инновационной программы в области водорода и топливных элементов (NIP II, с 2016 по 2026 г.) — всего должно быть выделено около 1,5 млрд долл. (Tyagusov, 2021, p. 41). Программа разделена на такие направления ИР, как водородный транспорт и топливные элементы, стационарное энергоснабжение в домохозяйствах, промышленности и др., то есть на технологии конечного применения⁴⁸. Среди них наиболее важной остается совершенствование водородных транспортных технологий и топливных элементов (Delaval et al., 2022b, p. 23).

Технологии хранения и транспортировки водорода, которые являются наименее приспособленными для коммерческого применения, остаются приоритетом. Однако уровень их поддержки со стороны государства существенно уступает поддержке по тем направлениям, которые уже можно коммерциализировать (топливные элементы и основанные на них решения).

Индикатором успешности государственной поддержки является степень развитости водородной транспортной инфраструктуры: автомобили на топливных элементах (FCEV) остаются наиболее пригодными для коммерческого развертывания. В ФРГ и Южной Корее удалось сформировать небольшую инфраструктуру для водородного транспорта. В 2022 г. на ФРГ приходилось 12 % (четвертое место) от всех водородных заправок в мире, а на Южную Корею — 17 % (третье место), обе страны уступают только Японии и КНР⁴⁹. По количеству легковых FCEV Республика Корея занимает первое (29,3 тыс.), а ФРГ — четвертое место в мире (3,2 тыс.)⁵⁰.

⁴⁷ Biogradlija A. (2023) German TransHyDE project aims to transform hydrogen transport, *Industry & Energy*, August 22. URL: <https://www.industryandenergy.eu/hydrogen/german-transhyde-project-aims-to-transform-hydrogen-transport/> (дата обращения: 15.07.2023).

⁴⁸ European Commission. *National Innovation Programme for Hydrogen and Fuel Cell Technology*. URL: <https://trimis.ec.europa.eu/programme/national-innovation-programme-hydrogen-and-fuel-cell-technology> (дата обращения: 20.05.2023).

⁴⁹ HydrogenTools. (2022) *International Hydrogen Fueling Stations*. URL: <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/international-hydrogen-fueling-stations> (дата обращения: 28.04.2023); рассчитано авторами с учетом доли США на основе: IPHE. *United States*. URL: <https://www.iphe.net/united-states> (дата обращения: 28.04.2023).

⁵⁰ IEA. (2023) *Fuel cell electric vehicle (FCEV) stock by region and by mode, 2022*. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/fuel-cell-electric-vehicle-fcev-stock-by-region-and-by-mode-2022> (дата обращения: 25.09.2023).

Однако уже можно говорить о несоответствии текущих результатов поставленным целям, что видно на примере Южной Кореи. Согласно ее дорожной водородной карте количество легковых FCEV к 2022 г. должно было составить 79 тыс. моделей⁵¹. В реальности к 2023 г. удалось внедрить только 29 тыс.⁵²

В целом полноценных массовых технологий использования водорода на рынке нет, так как в настоящее время он продолжает применяться на промышленных объектах, где и производится (Schönfisch, 2022, p.2). Такие результаты указывают на необходимость дальнейшего инвестирования в водородные технологии и их масштабирование.

Основное различие в политике стран заключается в выборе перспективных видов производства: Республика Корея отдает предпочтение нескольким видам водорода, а ФРГ — в основном зеленому. Особое внимание обе страны уделяют развитию способов потребления водорода в транспортном секторе, где активно используются топливные элементы, которые считаются наиболее выгодной с экономической точки зрения технологией для коммерциализации⁵³. Поддержка именно этой сферы направлена на стимулирование спроса на уже готовые водородные решения. Здесь будут сосредоточены основные инвестиции и компетенции частного сектора, который продолжит модернизировать и в дальнейшем масштабирует возможности применения водорода.

5. Оценка текущего развития водородных технологий

Для формирования комплексной оценки текущего уровня развития водородных технологий использован индексный метод, сочетающий в себе элементы количественных и качественных методов. Предлагаемый новый страновой индекс применения водородных технологий включает шесть показателей, описанных в методологии исследования (см. также прил. 2). Он отражает существующий результат внедрения водородных технологий в странах — импортерах энергоносителей (они же основные страны-инвесторы). Сегодняшние лидеры — США, развитые страны Восточной Азии (Япония и Республика Корея) и Европейского союза (ФРГ, Франция и Испания). Однако сами оценки индекса остаются крайне скромными: только у США, Южной Кореи и Японии этот индикатор составляет более 3 баллов, что указывает на низкий уровень внедрения водородных решений среди основных стран-инвесторов (табл. 3).

Лидерские позиции указанных стран обусловлены следующими конкурентными преимуществами. Республика Корея, США, Япония и ФРГ вошли в топ-5 мировых лидеров по количеству единиц водородного транспорта и в лидеры по числу

⁵¹ MOTIE. (2019) *Hydrogen Economy. Roadmap of Korea*. URL: https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_fc2f37727595437590891a3c7ca0d025.pdf (дата обращения: 20.09.2023).

⁵² IEA. (2023) *Fuel cell electric vehicle (FCEV) stock by region and by mode, 2022*. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/fuel-cell-electric-vehicle-fcev-stock-by-region-and-by-mode-2022> (дата обращения: 25.09.2023).

⁵³ Филиппов, С., Голодницкий, А. и Кашин, А. (2020) Топливные элементы и водородная энергетика, *Энергетическая политика*. URL: <https://energypolicy.ru/toplivnye-elementy-i-vodorodnaya-energetika/energoperehod/2020/12/17/> (дата обращения: 30.05.2023).

Таблица 3. Индекс применения водородных технологий

Страна	Сводный индекс	Инновационная активность				Показатели, связанные с применением водорода на транспорте	
		Доля страны в общем числе патентных семей в области водородных технологий, %	Доля страны в общем числе патентных семей ее передовых корпораций, %	Доля расходов на водородные ИР, %	Кол-во проектов, шт.	Кол-во FCEV на заправку H ₂ , шт.	Кол-во легковых FCEV, тыс.
США	3,7	20	9	5	114	259,3	15
Республика Корея	3,2	7	16	8	11	173	29,3
Япония	3,1	24	41	5	28	41	7,6
ФРГ	2,4	11	18	4	182	19	2,3
Франция	1,6	6	11	6	79	12	0,6
Испания	1,6	0	0	9	107	3	0
Великобритания	1,4	3	6	4	90	53	0,5
Нидерланды	1,2	3	0	4	81	45	0,6
Австралия	1,1	0	0	3	118	39,4	0,2
КНР	1,0	4	0	0	56	37,1	13,4
Канада	0,7	2	0	4	38	1,9	0
Италия	0,5	0	0	3	32	8,8	0

Расчеты авторов по: IEA. (2023) *Hydrogen patents for a clean energy future*, p. 28, 33–34; IEA. (2023) *Hydrogen Projects Database*; IEA. (2023) *Energy Technology RD&D Budgets Data Explorer*; IEA. (2023) *Fuel cell electric vehicle (FCEV) stock by region and by mode*; IPHE. (2023) *Current Deployment of Partner Countries*; IGU. (2021) *Global Renewable and Low-Carbon Gas Report*, p. 21. URL: https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2021/11/IGU-Renewable-Gas-Report-2021_11.pdf (дата обращения: 30.05.2023).

водородных заправок⁵⁴. Кроме того, эти страны попали в топ-15 мировых потребителей водорода как продукта нефтехимической и нефтегазовой промышленности⁵⁵. Высокие показатели обеспечены и патентной активностью частного сектора данных стран, в первую очередь ведущих корпораций и конгломератов, участвующих также в многочисленных производственных проектах (табл. 3).

США сохраняют лидерство в сфере развития и внедрения водородных технологий (табл. 3). Несмотря на свою богатую ресурсную базу (например, 10-е место в мире по запасам нефти), как и другие лидеры рейтинга, страна зависит от импорта иностранных энергоносителей⁵⁶.

Республика Корея, Япония, ФРГ, Франция и Испания, находящиеся в большей зависимости от импорта иностранных энергоносителей, рассматривают технологии применения и производства водорода как способ удовлетворения собственных нужд (с возможностью экспорта технологий). Неслучайно у данных стран чистый импорт энергии, то есть потребление энергии за вычетом производства, варьируется от 44 % (Франция) до 93 % (Япония)⁵⁷.

Позиции Китая обусловлены скромными результатами патентной активности и отсутствием достаточной информации о расходах на водородные исследования. Однако КНР — лидер по количеству крупных водородных транспортных средств (грузовиков, автобусов и др.)⁵⁸. Хотя Китай и имеет скромный вклад по патентной активности, он инвестирует значительные средства в развитие водородных решений⁵⁹.

У каждой страны из топ-5 сводного индекса оказались преимущества, обеспечившие им высокие результаты в виде развитости водородного автотранспортного сектора (США, Республика Корея); патентной активности (США, Япония, Республика Корея, ФРГ); высокой доли государственных инвестиций в исследования и разработки (Республика Корея, Франция, Испания); количества производственных водородных проектов (США, ФРГ, Франция, Испания). Эти результаты отличаются от оценок двух существующих индексов в сфере развития водородных технологий, но во всех трех анализируемых случаях сохраняется присутствие отмеченных стран в разной последовательности (табл. 4).

⁵⁴ IEA. (2023) *Fuel cell electric vehicle (FCEV) stock by region and by mode*, 2022; HydrogenTools. (2022) *International Hydrogen Fueling Stations*. URL: <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/international-hydrogen-fueling-stations> (дата обращения: 28.04.2023).

⁵⁵ IRENA. (2022) *Geopolitics of the Energy Transformation. The Hydrogen Factor*, p.25. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA_Geopolitics_Hydrogen_2022.pdf (дата обращения: 21.09.2023).

⁵⁶ Global Economy. *Oil reserves — Country rankings*, 2021. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/oil_reserves/ (дата обращения: 30.05.2023).

World's Top Exports. (2023) *Crude Oil Imports by Country*. URL: <https://www.worldstopexports.com/crude-oil-imports-by-country/> (дата обращения: 30.05.2023).

⁵⁷ H2i. (2021) *Country Profiles*. URL: <https://www.h2-index.com/country-profiles> (дата обращения: 30.05.2023).

⁵⁸ IEA. (2023) *Fuel cell electric vehicle (FCEV) stock by region and by mode*, 2022. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/fuel-cell-electric-vehicle-fcev-stock-by-region-and-by-mode-2022> (дата обращения: 25.09.2023).

⁵⁹ IEA. (2023) *Hydrogen patents for a clean energy future*, p.47. URL: <https://www.iea.org/reports/hydrogen-patents-for-a-clean-energy-future> (дата обращения: 20.08.2023).

Таблица 4. Страны-лидеры по показателям ключевых водородных индексов

№ п/п	Индекс применения водородных технологий (предложен авторами)	Индекс H ₂ Economy (развитие технологий для будущего использования водорода)	Индекс H2i (оценка будущих центров привлечения инвестиций в водородные решения)
1	США	ФРГ	ФРГ
2	Республика Корея	Япония	Испания
3	Япония	Республика Корея	США, Австралия, Франция
4	ФРГ	Франция	Нидерланды, Италия, Великобритания, Канада
5	Франция, Испания	Нидерланды	КНР, Япония, Республика Корея

Составлено по: расчеты авторов; Bloomberg. (2021). *The H₂ Economy*. URL: <https://sponsored.bloomberg.com/immersive/hyundai/the-h2-economy> (дата обращения: 20.07.2023); H2i. (2021). URL: <https://www.h2-index.com/about> (дата обращения: 19.07.2023).

Наибольшее сходство было обнаружено с индексом H₂ Economy, причиной является его межотраслевой характер, в том числе применение в транспортном секторе и теплоснабжении решений на основе топливных элементов; также он учитывает сферы «водородная энергетика», «инфраструктура импорта и экспорта», которые до сих пор остаются на начальном этапе развития, что объясняет расхождение в порядке стран-лидеров⁶⁰.

Новый индекс включает только показатели с достигнутыми результатами, то есть отражает текущую ситуацию, что объясняет разницу с показателями других индексов. Например, в ФРГ были обозначены масштабные заявления относительно производства и применения зеленого водорода, в частности создание безуглеродной сталелитейной промышленности на его основе⁶¹. Отчасти поэтому ФРГ заняла первое место в существующих индексах, а в индексе, предложенном авторами настоящей статьи, — только четвертое. В частности, H2i рассматривает потенциал ВИЭ для производства водорода, что сужает возможности оценивания перспектив применения водородных технологий, которые могут быть основаны не только на решениях электролиза.

В целом оценки H2i носят прогностический характер в отношении будущих инвестиций в водородные технологии. Субиндекс «Регулирование» включает в себя множество параметров, связанных с декарбонизацией, эффект от реализации которой будет заметен только в среднесрочной и долгосрочной перспективах. Индекс H2i в большей степени ориентирован на оценку будущих возможностей стран развивать водородные решения, а также связан с вопросами зеленой повестки и декарбонизации. Последнее не было учтено при расчете сводного индекса.

⁶⁰ Bloomberg. (2021). *The H₂ Economy*. URL: <https://sponsored.bloomberg.com/immersive/hyundai/the-h2-economy> (дата обращения: 20.07.2023); H2i. (2021). URL: <https://www.h2-index.com/about> (дата обращения: 19.07.2023).

⁶¹ National Hydrogen Council. (2021) *Hydrogen Action Plan Germany 2021–2025*. URL: https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/EN/2021-07-02_NWR-Hydrogen_Action_Plan.pdf (дата обращения: 27.07.2023).

Расхождения с существующими индексами связаны с тем, что в них были включены прогнозы и обязательства в области зеленой повестки (Н2i) или состояние развития водородной торговли (Н₂ Economy), требующие проверки временем. Новый индекс в большей степени отражает существующий результат внедрения и развития водородных технологий в основных странах-инвесторах. Согласно данному индексу лидерами оказались развитые страны, зависящие от импорта энергоресурсов: Республика Корея и Япония в Восточной Азии, ФРГ, Франция и Испания в Евросоюзе. Отдельным кластером выступают США как крупная экономика и абсолютный лидер нового индекса. При этом ни одна из стран, входящих в топ-5, не смогла набрать больше четырех из шести баллов, что указывает на общее зачаточное состояние водородных решений, для масштабирования которых требуются новые инвестиции.

6. Перспективы применения водородных технологий в странах — импортерах энергоресурсов

В развитии водородных технологий в исследуемых странах-импортерах важную роль играют частные компании и иные организации — вложения бизнеса часто превосходят объемы государственных инвестиций. Поэтому корпоративная активность может служить прокси-индикатором, отражающим кратко- и среднесрочную перспективы развития рынка решений на основе водородных технологий.

В период роста интереса к водородным технологиям, в начале 2000-х годов, драйвером этого процесса были автомобилестроительные концерны BMW и Daimler (Bakker and Budde, 2012, p. 556). В настоящее время им на смену пришли консорциумы компаний. Южнокорейские чеболи организуются в крупные союзы для координации своей деятельности: в 2021 г. 11 крупнейших конгломератов (Samsung, Hyundai Motor, SK и др.) объединились в альянс «Водородный бизнес-саммит» с намерением инвестировать в водородные технологии 37 млрд долл. к 2030 г.⁶²

В Южной Корее более 30 крупных национальных и иностранных корпораций участвуют в развитии водородных технологий на разных этапах создания стоимости. Всего же в этой работе задействовано 400 компаний, 30 % из которых специализируются на водородных топливных элементах⁶³. Германия лидирует в ЕС по количеству организаций, развивающих водородные решения, доля страны составляет 36,2 % (Klerk Wolters, 2021, p. 5). Основными игроками в ФРГ являются электроэнергетические, исследовательские компании, госкомпании и др. — всего 49 отраслевых групп (Schlund, Schulte and Sprenger, 2022, p. 2).

Важным индикатором активности частного сектора является его патентная деятельность (рис. 3). На основе топ-13 корпораций — лидеров по количеству водородных IPF (международных патентных семейств) удалось выделить четыре ос-

⁶² Leigh Collins. (2021) Samsung, Hyundai and other 'chaebols' join forces in \$37bn Korean hydrogen pact. *Recharge*. URL: <https://www.rechargenews.com/energy-transition/samsung-hyundai-and-other-chaebols-join-forces-in-37bn-korean-hydrogen-pact/2-1-1066777> (дата обращения: 19.05.2023).

⁶³ Intralink. (2021) *The Hydrogen Economy South Korea. Market Intelligence Report*, p. 5. URL: <https://www.intralinkgroup.com/Syndication/media/Syndication/Reports/Korean-hydrogen-economy-market-intelligence-report-January-2021.pdf> (дата обращения: 28.08.2023).

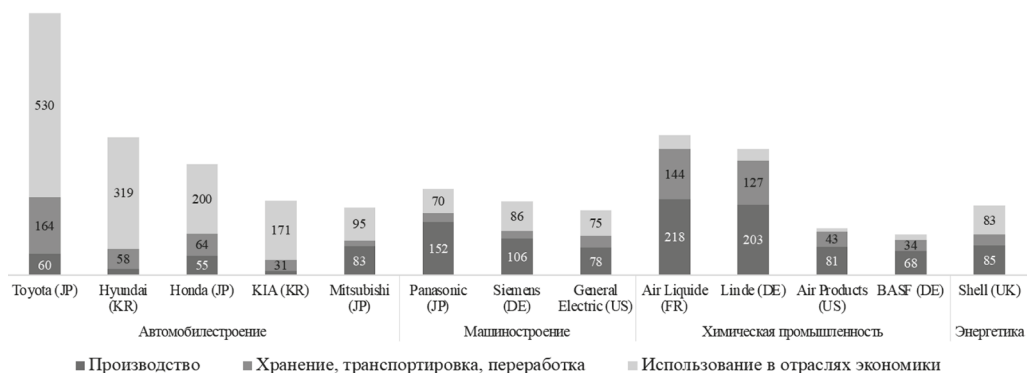


Рис. 3. Количество международных патентных семейств в области водородных технологий ведущих компаний по этапам цепочки создания стоимости водорода

Составлено по: IEA. (2023) *Hydrogen patents for a clean energy future*, p. 33–34. URL: <https://www.iea.org/reports/hydrogen-patents-for-a-clean-energy-future> (дата обращения: 20.08.2023)

новые отрасли, где компании активно инвестируют в водородные решения. IPF — это набор патентных заявок в разных странах, имеющих одно и то же или сходное техническое содержание⁶⁴. Ведущие позиции занимают крупные автопроизводители (японские Toyota, Honda, Mitsubishi, южнокорейские Hyundai и Kia), игроки химической промышленности (французская Air Liquide, немецкие Linde, BASF и др.), представители энергетики и машиностроения.

Приоритетные направления водородных технологий по основным этапам цепочки создания стоимости (ЦСС) зависят от основной деятельности корпораций. Таким автопроизводителям, как Hyundai, необходимы водородные решения для работы своих новых моделей для конечных потребителей. В свою очередь, у немецких химических корпораций (BASF, Linde) большинство IPF связано с технологиями производства водорода. Однако для них приоритетными остаются и технологии хранения и транспортировки водорода, над выходом которых требуется много работы. Именно Linde запустила первую в мире установку для извлечения водорода из трубопроводов для природного газа с использованием мембранной технологии⁶⁵.

Потребность в готовых решениях для применения водорода стимулирует развитие и других этапов ЦСС. Например, в сфере хранения водорода ведущие автоконцерны стремятся обеспечить себя технологиями эффективного хранения сжиженного водорода и удобной водородной сетью для нового автотранспорта⁶⁶. На основе более эффективных водородных технологий и топливных элементов авто-

⁶⁴ EPO. *Patent families*. URL: <https://www.epo.org/en/searching-for-patents/helpful-resources/first-time-here/patent-families-~-:text=A%20patent%20family%20is%20a,then%20extended%20to%20other%20offices> (дата обращения: 22.07.2023).

⁶⁵ Hydrogen Central. (2022) *Linde Engineering Starts up World's First Plant for Extracting Hydrogen from Natural Gas Pipelines Using Membrane Technology*. URL: <https://hydrogen-central.com/linde-engineering-worlds-plant-extracting-hydrogen-natural-gas-pipelines-membrane-technology/> (дата обращения: 20.04.2023).

⁶⁶ IEA. (2023) *Hydrogen patents for a clean energy future*, p. 53. URL: <https://www.iea.org/reports/hydrogen-patents-for-a-clean-energy-future> (дата обращения: 20.08.2023).

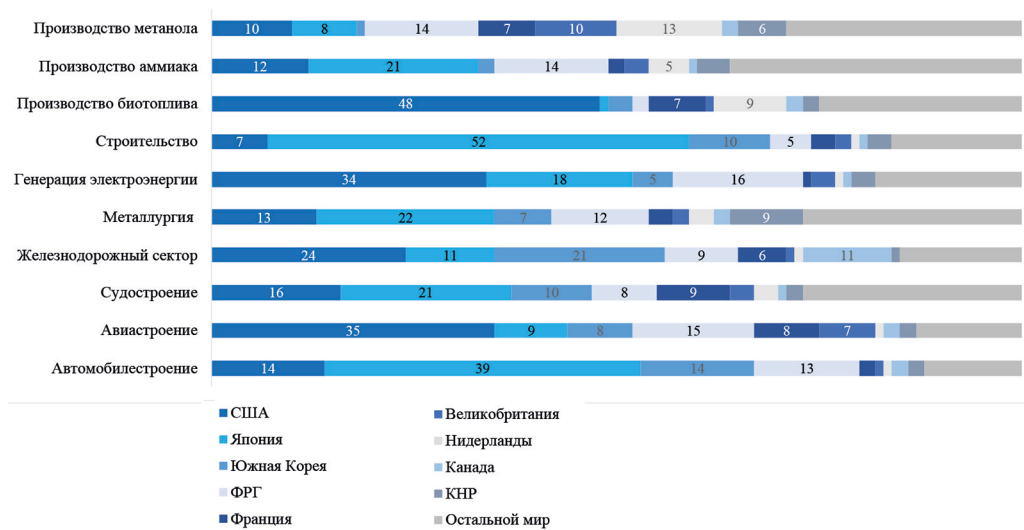


Рис. 4. Распределение международных патентных семейств в области водородных технологий по сферам применения, %

Составлено по: IEA. (2023) *Hydrogen patents for a clean energy future*, p. 60, 63. URL: <https://www.iea.org/reports/hydrogen-patents-for-a-clean-energy-future> (дата обращения: 20.08.2023)

производители представляют новые продукты. В сфере хранения водорода отдельно стоит выделить немецких технологических гигантов Siemens и Bosch, которые специализируются на решениях для водородной инфраструктуры⁶⁷.

Основными отраслями экономики, в которых постепенно внедряются водородные технологии, считаются автомобилестроение, производство метанола, аммиака (традиционное использование водорода), энергетика и производство «экологичной» стали. По последнему направлению доля ФРГ составляет 12 % (второе место), из-за чего одним из лидеров считается холдинг Thyssenkrupp⁶⁸. В сфере производства метанола и аммиака среди лидеров также остаются немецкие компании с 14 % в обеих отраслях (рис. 4).

Активно разрабатываются водородные решения для транспортного сектора в целом. В Южной Корее (второе место) ведутся работы по созданию первого в мире локомотива на сжиженном водороде к 2025 г.⁶⁹ В сфере автомобилестроения у ФРГ и Южной Кореи 13 и 14 % от общего количества IPF соответственно (второе и третье место; первое место занимает Япония). Это связано с тем, что ведущие автопроизводители Восточной Азии (Toyota и Hyundai) продолжают доминировать на мировом рынке водородного транспорта⁷⁰.

⁶⁷ Ibid.

⁶⁸ Ibid. p. 30.

⁶⁹ Smith, K. (2021) Korean project to develop liquefied hydrogen fuel cell traction, *IRJ*, April 21. URL: <https://www.railjournal.com/technology/korean-project-to-develop-liquefied-hydrogen-fuel-cell-traction/> (дата обращения: 19.05.2023).

⁷⁰ Hambleton, J. (2023) Country's First Hydrogen Cars Come to Market, Emitting Only Water and Purifying the Air as They Drive, *The Premier Daily*, January 16. URL: <https://thepremierdaily.com/hydrogen-cars/~:text=Hyundai%20and%20Toyota%20In%20On,models%20in%20the%20near%20future> (дата обращения: 22.07.2023).

ФРГ больше инвестирует в электролизеры для использования в электроэнергетике⁷¹. Доля страны на мировом рынке электролизеров составляет 20%⁷². Audi и BMW активно направляют средства в электролизерные мощности и для автомобилестроения⁷³. В части электролизеров ФРГ удалось добиться конкурентной стоимости водорода, производимого с использованием подключенных к сети фотоэлектрических систем, хотя многие технологии электролиза еще недостаточно эффективно взаимодействуют с ВИЭ (Bhandari and Shah, 2021, p. 928).

Актуальным показателем потребления водорода является количество водородного транспорта (FCEV) на одну заправочную станцию. Такие машины уже используются в качестве готовых решений. Однако существует проблема неразвитости инфраструктуры водородных станций, в отличие от таковых для обычных электромобилей⁷⁴. На данный момент Республика Корея занимает второе место в мире по количеству единиц водородного транспорта на одну заправку (а также первое по легковым FCEV), ФРГ — 10-е⁷⁵. Более низкий результат ФРГ обусловлен тем, что в некоторых странах (например, в Австралии) крайне мало заправочных станций по сравнению с количеством транспорта (5 и 197 соответственно)⁷⁶. В то же время в ФРГ одни из наиболее высоких показателей по количеству стационарных топливных элементов (21,7 тыс.), что говорит о развитости инфраструктуры для еще не сформированного рынка⁷⁷.

Для дальнейшего внедрения не решена проблема безопасности при транспортировке водорода. Рассматриваются возможности внедрения мобильных заправок, однако для этого требуются технологии, необходимые для предотвращения и обнаружения утечек газа, аварийного отключения и др. (Kim et al., 2022, p. 33541). В связи с этим в Южной Корее разрабатываются стандарты безопасности и технологии мобильных водородных заправочных станций⁷⁸.

В текущих условиях бизнес осваивает все основные группы водородных технологий (производство, транспортировка, хранение, конечное применение), необходимых для формирования будущего рынка. В приоритете остаются технологии производства и применения водорода в отраслях экономики (химическая промышленность, автомобилестроение), в то время как способы его хранения еще на стадии активной разработки. В сфере конечного применения востребован водородный транспорт, в развитии которого участвуют ключевые автоконцерны. Де-

⁷¹ Hydrogen Council. (2022) *Hydrogen Insights 2022*, p. 9. URL: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2022/09/Hydrogen-Insights-2022-2.pdf> (дата обращения: 25.08.2023).

⁷² Eckert, V. (2021) German government pledges ongoing support for hydrogen build-up, *Reuters*, September 22. URL: <https://www.reuters.com/business/energy/german-government-pledges-ongoing-support-hydrogen-build-up-2021-09-22/> (дата обращения: 19.05.2023).

⁷³ IEA. (2023) *Hydrogen patents for a clean energy future*, p. 66.

⁷⁴ IEA. (2022) *Global EV Outlook 2022*, p. 24. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022> (дата обращения: 25.08.2023).

⁷⁵ Рассчитано авторами на основе: IPHE. *Current Deployment of Partner Countries*. URL: <https://www.iphe.net/copy-of-partners> (дата обращения: 25.09.2023).

⁷⁶ IPHE. *Australia*. URL: <https://www.iphe.net/australia> (дата обращения: 25.09.2023).

⁷⁷ IPHE. *Germany*. URL: <https://www.iphe.net/germany> (дата обращения: 25.09.2023).

⁷⁸ Kilgore, E. (2018) World's First mobile liquid hydrogen refueling station launched, *Hydrogen Fuel News*, July 10. URL: <https://www.hydrogenfuelnews.com/worlds-first-mobile-liquid-hydrogen-refueling-station-launched/8535420/> (дата обращения: 28.04.2023).

тельность бизнеса находится в сильной зависимости от государственных стратегий, что объясняет внимание к электролизным мощностям для зеленого водорода или преобладание голубого.

Заключение

В ближайшей перспективе основной спрос на водород будет связан с традиционными отраслями (химической и нефтегазовой), где он и вырабатывается. Существующие возможности применения новых водородных технологий пока ограничены узкими рыночными нишами и демонстрационными проектами. Их реализация основывается на комплексной государственной политике. Наиболее активны в этой области страны, импортирующие значительные объемы энергоресурсов, а также обладающие значительным промышленным потенциалом. Их усилия направлены на комплексную инфраструктуру, охватывающую все этапы цепочки создания стоимости (производство, транспортировка, хранение и применение в отраслях экономики), в том числе импорт водорода.

Развитие водородной индустрии должно базироваться на сбалансированном подходе, ориентированном на обеспечение возможности использовать различные типы водорода и технологии его получения. Зеленый водород в последние годы стал предметом наибольшего интереса в политической и академической среде из-за возможностей комбинирования с ВИЭ, однако эти технологии недостаточно зрелые и экономически целесообразно их масштабирование.

Основными потребителями водорода остаются химические и энергетические компании, которые работают над созданием водородной инфраструктуры для его транспортировки. Технологиями хранения водорода занимаются и ведущие мировые автоконцерны. Однако эти решения остаются недостаточно зрелыми в силу взрывоопасности водорода.

В отраслевом разрезе доминирующей тенденцией является расширение рынка водородного транспорта на топливных элементах как наиболее зрелого, но нишевого решения. Для этого активно создается инфраструктура в виде заправочных станций. Однако большинство стран не могут обеспечить заявленный уровень покрытия водородной инфраструктуры. Известны и менее успешные попытки по внедрению водорода в других отраслях (например, на железнодорожном транспорте). При этом государственная поддержка направлена на масштабирование уже готовых технологий.

Вместе с тем результаты индекса применения водородных технологий указывают на то, что страны-лидеры рассматривают данные технологии в качестве востребованных в долгосрочной перспективе. Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на выявление новых сфер и возможностей применения водородных технологий в традиционных отраслях экономики — там, где это целесообразно и может принести как прямые экономические эффекты, так и косвенные (например, как дополнительный источник для непрерывного энергообеспечения).

Литература/References

- Azni, M. and Md Khalid, R. (2021) 'Hydrogen Fuel Cell Legal Framework in the United States, Germany, and South Korea — A Model for a Regulation in Malaysia', *Sustainability*, 13 (4): 2214, pp. 1–14.
- Bakker, S. and Budde, B. (2012) 'Technological Hype and Disappointment: Lessons from the Hydrogen and Fuel Cell Case', *Technology Analysis and Strategic Management*, 24 (6), pp. 549–563.
- Bard, J., Gerhardt, N., Selzam, P., Beil, M., Wiemer, M. and Buddensiek, M. (2022) 'The Limitations of Hydrogen Blending in the European Gas Grid', *Fraunhofer IEE*. Available at: https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/en/documents/Studies-Reports/FINAL_FraunhoferIEE_ShortStudy_H2_Blending_EU_ECF_Jan22.pdf (accessed: 15.08.2023).
- Bhandari, R. and Shah, R. R. (2021) 'Hydrogen as energy carrier: Techno-economic assessment of decentralized hydrogen production in Germany', *Renewable Energy*, 177, pp. 915–931.
- Braun, J-F, Roos, H., Schermers, B., Geuns, L. and Zensus, C. (2019) 'Energy R&D Made in Germany: Strategic Lessons for the Netherlands', *Hague Centre for Strategic Studies*. Available at: https://hcss.nl/wp-content/uploads/2021/01/HCSS_Report_Energy-R-D_-Made-in-Germany.pdf (accessed: 15.08.2023).
- Burchard, F. (2021) 'Hydrogen Law, Regulations & Strategy in Germany', *CMS, CMS Expert Guide to hydrogen energy law and regulation*. Available at: <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/germany?format=pdf&v=22> (accessed: 20.06.2023).
- Cader, J., Koneczna, R. and Olczak, P. (2021) 'The Impact of Economic, Energy, and Environmental Factors on the Development of the Hydrogen Economy', *Energies*, 14 (16): 4811, pp. 1–22.
- Cerniauskas, S., Junco, A., Grube, T., Robinius, M. and Stolten, D. (2020) 'Options of natural gas pipeline reassignment for hydrogen: Cost assessment for a Germany case study International Journal of Hydrogen', *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (21), pp. 12095–12107.
- Choi, J., Choi, D. G. and Park, S. Y. (2022) 'Analysis of effects of the hydrogen supply chain on the Korean energy system', *International Journal of Hydrogen Energy*, (47) 52, pp. 21908–21922.
- Chu, K. H., Lim, J., Mang, J. and Hwang, M.-H. (2021) 'Evaluation of strategic directions for supply and demand of green hydrogen in South Korea', *International Journal of Hydrogen Energy*, 47 (3), pp. 1409–1424.
- Chun, D., Woo, C., Seo, H., Chung, Y., Hong, S. and Kim, J. (2014) 'The role of hydrogen energy development in the Korean economy: An input-output analysis', *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 (15), pp. 7627–7633.
- Delaval, B., Rapson, T., Sharma, R., Hugh-Jones, W., McClure, E., Temminghoff, M. and Srinivasan, V. (2022a) Hydrogen RD&D Collaboration Opportunities: Germany, *CSIRO*, Australia. Available at: <http://www.mission-innovation.net/wp-content/uploads/2022/09/H2RDD-Germany-FINAL.pdf> (accessed: 15.08.2023).
- Delaval, B., Rapson, T., Sharma, R., Hugh-Jones, W., McClure, E., Temminghoff, M. and Srinivasan, V. (2022b) Hydrogen RD&D Collaboration Opportunities: Republic of Korea, *CSIRO*, Australia. Available at: <http://www.mission-innovation.net/wp-content/uploads/2022/09/H2RDD-Korea-FINAL.pdf> (accessed: 15.08.2023).
- Dickel, R. (2020) 'Blue hydrogen as an enabler of green hydrogen: The case of Germany', *OIES*. Available at: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/246558/1/978-1-78467-159-4.pdf> (accessed: 15.08.2023).
- Dincer, I. and Acar, C. (2015) 'Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability', *International Journal of Hydrogen Energy*, 40 (34), pp. 11094–11111.
- Fuhrmann, M. (2020) 'Germany's National Hydrogen Strategy', *Mitsui & Co. Global Strategic Studies Institute Monthly Report*. Available at: https://www.mitsui.com/mgssi/en/report/detail/___icsFiles/afield-file/2021/02/19/2012_fuhrmann_e.pdf (accessed: 21.07.2023).
- George, J. F., Müller, V., Winkler, J. and Ragwitz, M. (2022) 'Is blue hydrogen a bridging technology? — The limits of a CO₂ price and the role of state-induced price components for green hydrogen production in Germany', *Energy Policy*, 167: 113072, pp. 1–16.
- Gils, H. C., Gardian, H. and Schmutge, J. (2021) 'Interaction of hydrogen infrastructures with other sector coupling options towards a zero-emission energy system in Germany', *Renewable Energy*, 180, pp. 140–156.
- Hong, S., Kim, E. and Jeong, S. (2023) 'Evaluating the sustainability of the hydrogen economy using multi-criteria decision-making analysis in Korea', *Renewable Energy*, 204, pp. 485–492.
- Husarek, D., Schmutge, J. and Niessen, S. (2021) 'Hydrogen supply chain scenarios for the decarbonisation of a German multi-modal energy system', *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (76), pp. 38008–38025.

- Kan, S. (2020) 'South Korea's Hydrogen Strategy and Industrial Perspectives', *IFRI*. Available at: https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/sichao_kan_hydrogen_korea_2020_1.pdf (accessed: 20.07.2023).
- Kar, S. K., Harichandan, S. and Roy, B. (2022) 'Bibliometric analysis of the research on hydrogen economy: An analysis of current findings and roadmap ahead', *International Journal of Hydrogen Energy*, 47 (20), pp. 10803–10824.
- Kim, D.-H., Lim, J.-Y., Park, W.-I. and Joe C.-H. (2022) 'Quantitative risk assessment of a mobile hydrogen refueling station in Korea', *International Journal of Hydrogen Energy*, 47 (78), pp. 33541–33549.
- Kim, H., Eom, M. and Kim, B.-I. (2020) 'Development of strategic hydrogen refueling station deployment plan for Korea', *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (38), pp. 19900–19911.
- Klerk Wolters, F. J. (2021) 'The Heralds of Hydrogen: The economic sectors that are driving the hydrogen economy in Europe', *OIES, Energy Insight*, 82. Available at: https://nangs.org/analytics/download/6467_75e68b202bc4a346fc6c58e3622aac72 (accessed: 20.08.2023).
- Langenberg, L., Knosala, K., Pflugradt, N., Kotzur, L., Stolten, D. and Stenzel, P. (2022) 'The role of hydrogen in German residential buildings', *Energy and Buildings*, 276: 112480, pp. 1–18.
- Lawrence, J. W. (1970) *Toward a liquid hydrogen fuel economy*. Available at: <https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/5800> (accessed: 21.09.2023).
- Lee, B., Chae, H., Choi, N. H., Moon, C., Moon, S., and Lim, H. (2017) 'Economic evaluation with sensitivity and profitability analysis for hydrogen production from water electrolysis in Korea', *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (10), pp. 6462–6471.
- Lee, D. and Kim, K. (2021) 'Research and Development Investment and Collaboration Framework for the Hydrogen Economy in South Korea', *Sustainability*, 13 (19): 10686, pp. 1–31.
- Liu, P. and Han, X. (2022) 'Comparative analysis on similarities and differences of hydrogen energy development in the World's top 4 largest economies: A novel framework', *International Journal of Hydrogen Energy*, 47 (16), pp. 9485–9503.
- Mazzucato, M. (2013) *The Entrepreneurial State: Debunking Public vs. Private Sector Myths*. London: Anthem Press.
- Nuñez-Jimenez, A. and Blasio, N. (2022) 'Competitive and secure renewable hydrogen markets: Three strategic scenarios for the European Union', *International Journal of Hydrogen Energy*, 47 (84), pp. 35553–35570.
- Ringsgwandl, L. M., Schaffert, J., Brücken, N., Albus, R. and Görner, K. (2022) 'Current Legislative Framework for Green Hydrogen Production by Electrolysis Plants in Germany', *Energies*, 15 (5): 1786, pp. 1–16.
- Satyapal, S., Petrovic, J., Read, C., Thomas, G. and Ordaz, G. (2007) 'The U.S. Department of Energy's National Hydrogen Storage Project: Progress towards meeting hydrogen-powered vehicle requirements', *Catalysis Today*, 120 (3–4), pp. 246–256.
- Schlund, D., Schulte, S. and Sprenger, T. (2022) 'The who's who of a hydrogen market ramp-up: A stakeholder analysis for Germany', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154 (25): 111810, pp. 1–14.
- Schönfisch, M. (2022) 'Charting the Development of a Global Market for Low-Carbon Hydrogen', *EWI Working Papers*, (22/03). Available at: <https://www.ewi.uni-koeln.de/en/publikationen/charting-the-development-of-a-global-market-for-low-carbon-hydrogen/> (accessed: 21.09.2023).
- Shin, J. (2022) 'Hydrogen Technology Development and Policy Status by Value Chain in South Korea', *Energies*, 15 (23): 8983, pp. 1–19.
- Song, Z. (2021) 'Hydrogen Law, Regulations & Strategy in South Korea CMS', *CMS Expert Guide to hydrogen energy law and regulation*. Available at: <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/south-korea?format=pdf&v=11> (accessed: 20.08.2023).
- Stangarone, T. (2021) 'South Korean efforts to transition to a hydrogen economy', *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23 (2), pp. 1–8.
- Tarasov, B. P., Lototskiy, M. V. and Yartys, V. A. (2007) 'Problem of hydrogen storage and prospective uses of hydrides for hydrogen accumulation', *Russian Journal of General Chemistry*, 77 (4), pp. 694–711.
- Tyagusov, M. M. (2021) 'The National hydrogen Strategy of Germany as an effective example of interaction between government, business, and society', *Business. Society. Power*, (42), pp. 37–54. (In Russian)

Статья поступила в редакцию: 05.11.2023
Статья рекомендована к печати: 16.05.2024

Контактная информация:

Марчук Николай Петрович — магистрант; <https://orcid.org/0000-0001-8124-4362>,
nmarchuk@hse.ru

Туровец Юлия Валерьевна — <https://orcid.org/0000-0002-6336-1255>, yturovecz@hse.ru

Prospects of hydrogen technologies application in the economic sectors: Priorities of the state and business

N. P. Marchuk, J. V. Turovets

HSE University,
20, ul. Myasnitskaya, Moscow, 101000, Russian Federation

For citation: Marchuk, N. P. and Turovets, J. V. (2024) 'Prospects of hydrogen technologies application in the economic sectors: Priorities of the state and business', *St. Petersburg University Journal of Economic Studies*, 40 (3), pp. 355–386. <https://doi.org/10.21638/spbu05.2024.302> (In Russian)

Discussions around the application of hydrogen technologies in various economic sectors (as part of the green agenda) contributed to the release of various hydrogen national initiatives. By the end of 2023, 41 governments have already adopted hydrogen strategies. However, hydrogen technologies are not mature for widespread adoption due to technological barriers associated with the production, storage, and transportation of hydrogen. National governments and private companies invest significant funds in research and development in order to overcome them. The purpose of this study is to assess current level of hydrogen technologies' development on the basis of index and other methods to identify the most promising fields of application. Statistical and analytical materials devoted to the development of hydrogen solutions were exploited: patent and project activity of private sector, STI policy of net-energy importers — Germany and South Korea as the example. An analysis of the hydrogen strategies and the activities of corporations in selected countries revealed that the fuel cell automotive sector and traditional use of hydrogen (production of ammonia and methanol in the chemical industry) are among the key areas of application of the studied technologies. Hydrogen can also be adopted in the electric power industry, etc. Governments that support hydrogen technologies seek to expand the range of its applications by attracting investments from multinational corporations from those sectors where hydrogen is already embedded in the chain of production.

Keywords: hydrogen technologies, hydrogen energy, energy importers, hydrogen infrastructure, value chains, hydrogen color spectrum, hydrogen policy, hydrogen projects and investments, hydrogen technology application index.

Received: 05.11.2023

Accepted: 16.05.2024

Authors' information:

Nikolay P. Marchuk — Master Student; <https://orcid.org/0000-0001-8124-4362>, nmarchuk@hse.ru

Julia V. Turovets — <https://orcid.org/0000-0002-6336-1255>, yturovecz@hse.ru

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Основные направления исследований в сфере водородных технологий на примере ФРГ и Республики Корея

Направление исследований	ФРГ	Республика Корея
Водородная политика, исследования и разработки	Общие аспекты водородной политики и стратегии	
	Fuhrmann, 2020 Burchard, 2021 Tyagusov, 2021 Cader, Koneczna and Olczak, 2021	Stangarone, 2020 Song, 2021 Cader, Koneczna and Olczak, 2021 Shin, 2022
	Исследования и разработки в области водородных технологий	
	Braun et al., 2019 Fuhrmann, 2020 Delaval et al., 2022a	Lee and Kim, 2021 Delaval et al., 2022b
	Роль государственных мер поддержки в развитии водородных решений	
	Bhandari and Shah, 2021 Liu and Han, 2022 Ringsgwandl et al., 2022	Chun et al., 2014 Stangarone, 2020 Kan, 2020
Роль бизнеса в развитии водородных технологий	Анализ основных участников в сфере развития водородных технологий	
	Klerk Wolters, 2021 Gils, Gardian and Schmutge, 2021 Schlund, Schulte and Sprenger, 2022	Kan, 2020
	Влияние отдельных секторов экономики на развитие водородных технологий	
	Langenberg et al., 2022	Kim et al., 2022
Прогнозы/эффекты развития рынка водородных решений в ФРГ и Республике Корея	Перспективы голубого водорода как основного драйвера развития водородных решений	
	Dickel, 2020 George et al., 2022	Choi, Choi and Park, 2022
	Развитие водородной инфраструктуры	
	Cerniauskas et al., 2020 Bard et al., 2022	Kim, Eom and Kim, 2020 Kim et al., 2022
	Переход к зеленой энергетике с помощью водорода	
	Husarek, Schmutge and Niessen, 2021 Nuñez-Jimenez and Blasio, 2022	Chu et al., 2021 Hong, Kim and Jeong, 2023

**Приложение 2. Группы показателей для разработки индекса
применения водородных технологий**

Группа показателей	Название показателя	Описание показателя
Инновационная активность	Доля стран по совокупному количеству водородных IPF, %	Международное семейство патентов (IPF) — это набор патентных заявок в разных странах, имеющих одно и то же или сходное техническое содержание ¹ . Используются доли IPF по тем технологиям, которые связаны со всей цепочкой создания стоимости водородных решений (производство, транспортировка, хранение и потребление). Данные по IPF были взяты из базы МЭА, собраны из национальных патентных ведомств (США, КНР, Республика Корея и др.) и Европейского патентного ведомства (ЕПО) с 2011 по 2020 г. ²
	Доля водородных патентных семейств крупных корпораций, %	Дополнительно был взят предыдущий показатель, но на основе долей 13 международных компаний (химических, автомобилестроительных и др.), играющих основную роль в развитии водородных решений
	Доля расходов на водородные ИР к 2021 г. от всех энергетических ИР, в %	За основу был взят период 2004–2021 гг., с того момента, когда начал расти интерес к водородным технологиям. Данные взяты из базы данных расходов на энергетические исследования и разработки МЭА ³
	Количество водородных проектов по странам	Данные взяты из базы проектов МЭА, которая охватывает все проекты, введенные в эксплуатацию или находящиеся на разных стадиях реализации с 2000 г. В базу входят проекты, целью которых является либо сокращение выбросов за счет водорода, либо его использование в качестве энергоносителя или сырья в новых областях ⁴
Развитие водородных технологий для транспортного сектора	Общее количество легковых FCEV по странам	Отражает текущий спрос на водородные технологии у частных потребителей. Основан на данных, собранных Международным партнерством в области использования водорода и топливных элементов в экономике (IPHE) и МЭА из национальных ведомств ⁵

Группа показателей	Название показателя	Описание показателя
	Количество транспортных средств на топливных элементах (FCEV) на одну водородную заправку	Отражает текущее состояние водородной инфраструктуры, находящейся на ранних стадиях развития. Данные о количестве водородного транспорта и заправочных станций по странам фиксируют организации IPHE и МЭА. По водородным заправочным станциям также собирает информацию портал Hydrogen Tools из США ⁵

¹ EPO. *Patent families*. URL: <https://www.epo.org/en/searching-for-patents/helpful-resources/first-time-here/patent-families#:~:text=A%20patent%20family%20is%20a,then%20extended%20to%20other%20offices> (дата обращения: 22.07.2023).

² IEA. (2023) *Hydrogen patents for a clean energy future*. URL: <https://www.iea.org/reports/hydrogen-patents-for-a-clean-energy-future> (дата обращения: 20.08.2023).

³ IEA. (2023) *Energy Technology RD&D Budgets Data Explorer*. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-technology-rdd-budgets-data-explorer> (дата обращения: 21.09.2023).

⁴ IEA. (2023) *Hydrogen Projects Database*. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database> (дата обращения: 21.09.2023).

⁵ IPHE. *Current Deployment of Partner Countries*. URL: <https://www.iphe.net/copy-of-partners> (дата обращения: 25.09.2023); IEA. (2023) *Fuel cell electric vehicle (FCEV) stock by region and by mode, 2022*. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/fuel-cell-electric-vehicle-fcev-stock-by-region-and-by-mode-2022> (дата обращения: 25.09.2023). Для КНР взяты данные по таким транспортным средствам, как водородные автобусы, грузовики и др., так как страна является абсолютным лидером в данной сфере.

⁶ Данные портала использовались для стран, которые не были зафиксированы в базах IPHE и МЭА; Hydrogen Tools. (2022) *International Hydrogen Fueling Stations*. URL: <https://h2tools.org/file/9362/download?token=VUgEeOTT> (дата обращения: 25.09.2023).

**Приложение 3. Основные меры поддержки развития водородных технологий
на примере ФРГ и Республики Корея**

Этап производственной цепочки	Применяемые инструменты	Примеры реализации
Производство и транспортировка	Налоговые стимулы	Освобождение от налога на зеленую энергию (ФРГ) ¹ Налоговые льготы для компаний, инвестирующих в водородные технологии (Республика Корея) (Delaval et al., 2022b, p. 24) Сертификаты для возобновляемой энергетики на каждый МВт, подтверждающие факт поставки электроэнергии, выработанной с использованием ВИЭ или водорода, для налоговых льгот (Республика Корея) ²
	Торговля углеродными выбросами	Национальная схема торговли выбросами углерода для поставщиков топлива (ЕС) ³
	Финансирование иностранных проектов	Программа грантов на сумму 414 млн долл. для поддержки международных проектов по производству зеленого водорода (ФРГ) ⁴
Все этапы цепочки создания стоимости	Прямое финансирование	Прямой грант и механизм условных выплат, например ThyssenKrupp Steel Europe, для декарбонизации производства стали и использования водорода ⁵
		Спонсирование проектов, связанных с производством водорода на основе паровой конверсии метана (Республика Корея) ⁶
		Финансирование проектов по установке станций риформинга для производства водорода, чтобы обеспечить топливом транспортную инфраструктуру городов (Республика Корея) ⁷
	Субсидии	Субсидии на покупку электромобилей, в том числе FCEV (ФРГ) ⁸
		Субсидии на строительство водородных заправочных станций, до 75 % от объема капитальных затрат (Республика Корея) ⁹
		Субсидии для приобретения водородного автомобиля (31 тыс. долл., для автобусов на топливных элементах в Южной Корее — до 250 тыс. долл.) ¹⁰
		Субсидии для установок, в том числе для топливных элементов в жилых и коммерческих зданиях (покрытие до 80 % стоимости установки, Республика Корея) ¹¹
Госзакупки	Закупка государством в рамках Национального плана действий по энергоэффективности (NAPE) систем отопления на топливных элементах для частных заказчиков (ФРГ) ¹²	
Финансирование регионов	Конкурсы в регионах HyLand, направленные на стимулирование участников внедрять водородные технологии (ФРГ) ¹³	

Этап производственной цепочки	Применяемые инструменты	Примеры реализации
Все этапы цепочки создания стоимости	Создание кластеров	Кластер или экосистема, ориентированные на создание целой отрасли водородных технологий с охватом всех цепочек создания стоимости в регионе (Южная Корея) ¹⁴
	Кредиты	Правительственные кредиты компаниям, инвестирующим в водородные технологии, до 8,4 млн долл. (Республика Корея) (Song, 2021)
		Низкие ставки и более высокие лимиты на кредитование корпорациям, инвестирующим в водородный фонд на сумму в 382 млн долл. (Республика Корея) ¹⁵ Кредиты немецкого государственного банка (KfW) для поддержки проектов за рубежом (ФРГ) ¹⁶
	Контракт на разницу цен (CfD)	Аукционы на выбросы углерода для поддержки перехода тяжелой промышленности на углеродно-нейтральные источники энергии (ФРГ)
	Двойные аукционы для иностранных поставщиков	Закупка за рубежом через организацию Hintco зеленого аммиака, метанола, авиационного топлива на основе электроэнергии (SAF) и услуг транспортировки в ходе аукционов по 10-летним контрактам (ФРГ) ¹⁷ . Затем Hintco продает по более низким ценам водород на территории ФРГ и ЕС также через аукционы, но по краткосрочным контрактам, а образовавшиеся потери компенсируются фондом H2Global ¹⁸
	Международные фонды	Австрало-корейский фонд, финансируемый компаниями из обеих стран для предоставления помощи проектам ИР, в том числе в сфере водородных технологий (Республика Корея) (Delaval et al., 2022b, p. 35)
	Регуляторные песочницы или свободные от регулирования зоны	Регуляторные песочницы для новых технологий. Созданы в 2021 г. для тестирования использования водорода в транспортном, промышленном секторе и теплоснабжении (ФРГ) ¹⁹
		«Свободные от регулирования зоны», упрощенное регулирование и низкое налогообложение для демонстрационных проектов (Республика Корея) (Song, 2021). Каждая из таких зон концентрируется на отдельных аспектах применения или ИР, например в Канвондской зоне осуществляются проекты в сфере сжиженного водорода ²⁰

¹ Geipel, M. and Jager, P. (2021) Green hydrogen fully exempts from Renewable Energies Act levy, NOERR, June 25. URL: <https://www.noerr.com/en/insights/green-hydrogen-fully-exempt-from-renewable-energies-act-levy> (дата обращения: 21.07.2023).

² Корнеев, К. А. Оценка институциональной готовности стран Восточной Азии к практическому внедрению технологий водородной энергетики, *Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова*, 2022, 1, с. 10.

³ EU Reporter. (2022) *Схема торговли выбросами в ЕС (ETS) и ее реформа*. URL: <https://ru.eureporter.co/environment/co2-emissions/emissions-trading-scheme-ets/2022/06/02/the-eu-emissions-trading-scheme-ets-and-its-reform-in-brief/> (дата обращения: 21.03.2023).

⁴ BMWK. (2021) *Overview of the core elements of the funding guideline to support the international establishment of generating installations for green hydrogen*. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2021/10/20211004-overview-of-the-core-elements-of-the-funding-guideline-to-support-the-international-establishment-of-generating-installations-for-green-hydrogen.html> (дата обращения: 21.03.2023).

⁵ Market Screener. (2022) *EU clears French and German state aid for steelmakers*. July 20. URL: <https://www.marketscreener.com/quote/stock/THYSSENKRUPP-AG-436698/news/EU-clears-French-and-German-state-aid-for-steelmakers-44377197/#:~:text=The%20commission%20said%20it%20approved,and%20remain%20competitive%20with%20rivals> (дата обращения: 21.08.2023).

⁶ Intralink. (2022) *Outlook on Hydrogen Economy & Roadmap Republic of Korea*, p. 30. URL: <https://icdk.dk/-/media/websites/icdk/locations-reports/seoul/outlook-on-korean-hydrogen-economy-and-roadmap.ashx> (дата обращения: 28.08.2023).

⁷ NEA. (2020) *Hydrogen Economy Development in Korea*. URL: <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2020/07/Korea-Hydrogen-economy-overview-2020-final.pdf> (дата обращения: 28.08.2023).

⁸ CLEW. (2023) *Germany has subsidised a total of two million electric cars*. September 28. URL: <https://www.cleanenergywire.org/news/germany-has-subsidised-total-two-million-electric-cars> (дата обращения: 30.09.2023).

⁹ Григорьев, Ф. (2020) *Водородная экономика по-корейски*. Атомный эксперт. URL: https://atomicexpert.com/hydrogen_economy_in_korean (дата обращения: 15.03.2023).

¹⁰ Intralink. (2021) *The Hydrogen Economy South Korea. Market Intelligence Report*, p. 11. URL: <https://www.intralinkgroup.com/Syndication/media/Syndication/Reports/Korean-hydrogen-economy-market-intelligence-report-January-2021.pdf> (дата обращения: 28.08.2023).

¹¹ Ibid, p. 10.

¹² NOW. Hydrogen and Fuel Cell. URL: <https://www.now-gmbh.de/en/funding/funding-programmes/hydrogen-and-fuel-cell/> (дата обращения: 21.06.2023).

¹³ HyLand. *HyLand Hydrogen Regions in Germany*. URL: <https://www.hy.land/en/> (дата обращения: 20.05.2023).

¹⁴ MOTIE. (2022) *Achievements and Vision of Korea's Hydrogen Economy Policy*, p. 9–11. URL: <https://jimdo-storage.global.ssl.fastly.net/file/03bfe6aa-791c-4ff5-9184-1f9d048170a5/Koreas-Hydrogen-Economy-Policy.pdf> (дата обращения: 25.08.2023).

¹⁵ Nam, J.-M. (2022) *Korea hydrogen council launches \$382 mn fund*, *The Korea Economy Daily*, July 7. URL: <https://www.kedglobal.com/hydrogen-economy/newsView/ked202207070007> (дата обращения: 20.03.2023).

¹⁶ BMWK. (2022) *Support Mechanisms for International Hydrogen Projects by the German Government*, p. 4. URL: https://www.dena.de/fileadmin/H2_Dialog/Dokumente/Factsheets/2022_10_Factsheet_Germany_s_hydrogen_support_mechanisms_EN.pdf (дата обращения: 20.08.2023).

¹⁷ Hintco. URL: <https://www.hintco.eu/> (дата обращения: 20.04.2023).

¹⁸ H2Global Stiftung. (2023) *H2Global Idea, Instrument and Intentions. Policy Brief H2Global Stiftung 01/2022*. URL: https://h2news.cl/wp-content/uploads/2023/06/H2Global-Stiftung-Policy-Brief-01_2022-EN.pdf (дата обращения: 28.08.2023).

¹⁹ BMWK. (2021) *Launch of the Northern Germany Regulatory Sandbox: Economic Affairs Ministry provides 18 ore than €52 million in funding*, April 14. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2021/04/20200414-Launch-of-the-Northern-Germany-Regulatory-Sandbox.html> (дата обращения: 20.03.2023).

²⁰ CJ Logistics. (2023) *CJ Logistics obtained the regulatory sandbox approval for transporting liquefied hydrogen*, January 12. URL: https://www.cjlogistics.com/en/newsroom/news/NR_00001022 (дата обращения: 20.03.2023).