

# Перспективы водородной энергетики в контексте энергетического перехода<sup>1</sup>

**С.Ю. КОВАЛЕВ.** PhD(ABD).

E-mail: kovalev.2009@iyahoo.com

ORCID: 0000-0002-7516-5091

**И.Ю. БЛАМ,** кандидат экономических наук,

E-mail: inna@ieie.nsc.ru

Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН,  
Новосибирск

**Аннотация.** Развитие водородной энергетики, являющееся одним из ключевых элементов энергоперехода, отражает в себе основные проблемы этого процесса, главная из которых – невозможность объективно оценить вероятностные перспективы отдельно взятых проектов и отрасли в целом. Принятие рядом стран национальных водородных стратегий, предлагающих всевозможные субсидии, налоговые льготы и прямое финансирование для стимулирования развития отрасли, не решает эту проблему, однако обозначенные в них целевые ориентиры дают представление о масштабах намеченных на ближайшее десятилетие изменений и позволяют независимым наблюдателям делать собственные выводы и прогнозы о будущем отрасли. Российские компании видят в прогнозируемом развитии мировой водородной энергетики прежде всего возможность производства водорода на экспорт. Такую же позицию занимает и Правительство России.

**Ключевые слова:** водородная энергетика; изменение климата; глобальное потепление; углеродоемкость; секвестрация углерода; низкоуглеродный путь развития

## Введение

Важное место в разворачивающемся в мире процессе энергоперехода – постепенного отказа от использования ископаемых видов топлива и наращивания потребления возобновимых энергоресурсов – занимает водородная энергетика<sup>2</sup>. Значительно превосходя традиционные виды топлива по показателю энергоотдачи

---

<sup>1</sup> Статья подготовлена в рамках выполнения работ по плану НИР ИЭОПП СО РАН по проекту «Ресурсные территории Востока России и Арктической зоны: особенности процессов взаимодействия и обеспечения связанности региональных экономик в условиях современных научно-технологических и социальных вызовов» (Регистрационный номер – № 121040100278–8).

<sup>2</sup> BP Energy Outlook 2019 Edition. 157 p. [С. 102–104]. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf> (дата обращения: 12.02.2021).

на единицу массы, в течение XX века водород значительно проигрывал им по стоимости производства, транспортировки и хранения, что ограничивало сферу его применения. На нём работали, например, ракетные двигатели космических кораблей и двигатели внутреннего сгорания эксклюзивных спорткаров.

В начале 2000-х гг. разработка приемлемых для широкой эксплуатации двигателей на водородных топливных ячейках, совпавшая во времени с продолжительным стабильным ростом цен на углеводороды, придавала значительный импульс развитию водородной энергетики. Главными преимуществами водорода тогда считали его широкую распространенность и неистощимость запасов – в отличие от нефти и природного газа, естественный пик добычи которых должен был наступить в самом скором будущем [The Economist, 2001a; 2001b].

Отсутствие в продуктах сгорания водорода углекислого газа не рассматривалось в то время в качестве его преимущества по сравнению с ископаемыми видами топлива, поскольку первое по значению место среди парниковых газов отводилось не оксиду углерода, а водяному пару, являющемуся единственным продуктом сгорания водорода [Данилов-Данильян и Лосев, 2000]. В последующие два десятилетия цены на нефть пережили три резких падения, проблема естественного пика добычи углеводородов потеряла актуальность [Solow, 2009], что привело к ослаблению интереса бизнеса к проектам развития водородной энергетики. Тем не менее усилиями компаний Honda<sup>3</sup>, Toyota<sup>4</sup> и Hyundai<sup>5</sup> мировой парк автомобилей на топливных элементах превысил 20 тыс. машин, которые в основном эксплуатируются в Японии, Южной Корее и Южной Калифорнии.

Существующие технологии получения водорода в промышленных масштабах сопряжены с высокими издержками, а объёмы его потребления в электроэнергетике, промышленности и на транспорте пока не достаточны для оправдания капитальных вложений в крупномасштабные производства. Кроме того, практически отсутствует необходимая транспортная и складская инфраструктура.

---

<sup>3</sup> URL: <https://automobiles.honda.com/clarity-fuel-cell>

<sup>4</sup> URL: <https://www.toyota.com/mirai/>

<sup>5</sup> URL: <https://www.hydrogencarsnow.com/index.php/hyundai-tucson-fcev/>

С середины 2010-х гг. в мире наблюдается новый всплеск интереса к развитию водородных технологий, обусловленный актуализацией климатической политики, главной целью которой стало сокращение выбросов углекислого газа. Финансовая поддержка правительствами отдельных государств и международными организациями инновационных технологий, позволяющих снизить углеродоёмкость экономики, привела, в частности, к появлению пилотных проектов по переводу на водородное топливо широкого спектра транспортных средств – автобусов<sup>6</sup>, трамваев<sup>7</sup>, пригородных поездов<sup>8</sup>, высотных беспилотников-разведчиков<sup>9</sup>.

Ряд стран уже разработали стратегии развития национальной водородной энергетики, предлагающие всевозможные субсидии, налоговые льготы и прямое финансирование для стимулирования НИОКР на всех стадиях отраслевой технологической цепочки. Кроме того, поддерживаются проекты, направленные на расширение потребления водорода в качестве топлива в промышленности и на транспорте. Ставка делается на то, что скоординированная поддержка предложения и спроса запустит спираль ускоренного развития отрасли и выведет её на новый качественный уровень, при котором со временем станет коммерчески оправданным и производство водорода методом непосредственного электролиза воды, что позволит окончательно отказаться от использования ископаемых углеводородов.

Заметим, что при описании неопределённости такого вида любые вероятностные оценки сроков и темпов изменений носят субъективный характер. Но они необходимы для понимания коммерческих перспектив как отдельных проектов, так и отрасли в целом. В публичном поле представители бизнеса, заявляющие о возможности вложений в водородную энергетику, предпочитают избегать прямого ответа на вопрос о конкретных цифрах, на которые ориентируются сами компании при принятии

---

<sup>6</sup> URL: <https://www.solarisbus.com/en/vehicles/zero-emissions/hydrogen>

<sup>7</sup> URL: <https://www.railwaygazette.com/qingdao-opens-fuel-cell-tram-route/42177.article>

<sup>8</sup> URL: <https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-train>

<sup>9</sup> URL: <https://www.boeing.com/defense/phantom-eye/>

инвестиционных решений<sup>10</sup>. Однако складывается впечатление, что они считают сценарий появления в ближайшие полтора десятилетия новой отрасли, сравнимой по масштабам с традиционной углеводородной энергетикой, весьма маловероятным<sup>11</sup>.

В связи с этим нефтегазодобывающие компании не рассматривают водород в качестве угрозы традиционному топливу, предполагая, что мировой спрос на углеводородное сырье сохранится, поскольку ожидаемое снижение европейского потребления будет компенсироваться сравнимым по масштабам ростом спроса в развивающихся странах<sup>12</sup>. Однако российские компании, такие как «Новатэк»<sup>13</sup>, «Росатом»<sup>14</sup> и «Газпром»<sup>15</sup>, рассматривают возможность коммерциализации растущего интереса международного сообщества к водороду, прежде всего путём наращивания его экспорта. Например, «ЛУКОЙЛ» планирует увеличивать производство водорода на экспорт в связи с планами стран ЕС ввести норму о содержании водорода в метане до 5%<sup>16</sup>. Такая же позиция прослеживается и в Энергетической стратегии России, где поставлена цель нарастить экспорт водорода к 2035 г. до 22,2 млрд м<sup>3</sup>, что десятикратно превосходит весь объём отечественного производства водорода в 2019 г.,<sup>17</sup> и в Плане мероприятий по развитию водородной энергетики в РФ до 2024 г., утверждённом правительством в октябре 2020 г.<sup>18</sup>

Тем не менее российские компании принимают участие в реализации инновационных проектов развития водородной энерге-

---

<sup>10</sup> Характерный пример – ответы главного экономиста компании BP Спенсера Дейла на вопросы журналистов на презентациях прогнозных обзоров «BP Energy Outlook» последних лет. URL: <https://www.csis.org/events/2019-bp-energy-outlook>; URL: <https://www.csis.org/events/online-event-bp-energy-outlook-2020>.

<sup>11</sup> В редком случае, когда была названа конкретная цифра, совладелец компании «ЛУКОЙЛ» Леонид Федун заявил о вероятности «в 3% максимум». // Коммерсантъ. 2020. 11 нояб. № 215. С. 10; URL: [https://www.kommersant.ru/doc/4584070?from=main\\_7](https://www.kommersant.ru/doc/4584070?from=main_7)

<sup>12</sup> URL: [https://www.kommersant.ru/doc/4584070?from=main\\_7](https://www.kommersant.ru/doc/4584070?from=main_7), а также BP Energy Outlook 2020 Edition. 157 p. [С.64–67]. URL: [https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2020.pdf?utm\\_source=newsletter&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=newsletter\\_axiosgenerate&stream=top](https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2020.pdf?utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=newsletter_axiosgenerate&stream=top) (дата обращения: 12.02.2021)..

<sup>13</sup> URL: <https://neftegaz.ru/news/Alternative-energy/634835-klimatichno-novatek-verit-v-perspektivy-vodorodnoy-energetiki-i-gotovit-proekt-po-zakhoronenyu-ugle/>

<sup>14</sup> URL: <https://rosatom.ru/production/vodorodnaya-energetika/>

<sup>15</sup> URL: <https://www.gazprom.ru/press/news/2020/december/article520810/>

<sup>16</sup> URL: [https://www.kommersant.ru/doc/4584070?from=main\\_7](https://www.kommersant.ru/doc/4584070?from=main_7)

<sup>17</sup> URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026>

<sup>18</sup> URL: <http://government.ru/docs/40703/>

тики на территории России. Так, «Росатом», «Трансмашхолдинг» и «Российские железные дороги» при поддержке правительства Сахалинской области осуществляют пилотный проект по запуску в 2023 г. на Сахалине поездов пригородного сообщения на водородных элементах. Однако руководство «Росатома» настаивает на некоммерческом характере проекта и на необходимости дополнительного государственного финансирования для его успешного завершения<sup>19</sup>.

Правительство Москвы рассматривает эксплуатацию автобусов на водородных элементах как вариант реализации стратегии развития городской сети экологически чистого транспорта, но лишь в долгосрочной 30-летней перспективе, так как по показателям экономичности и безопасности такие средства передвижения пока значительно уступают автобусам с электроприводом<sup>20</sup>.

Хотя темой данной статьи является использование водорода в качестве энергоносителя, следует упомянуть и об иных возможностях сократить карбоновый след путём перехода на водородные технологии. Так, переход на водород лежит в основе некоторых схем декарбонизации сталеплавильной промышленности. В частности, *Primetals Technologies* в настоящее время работает над заменой коксующегося угля водородом при восстановлении железной руды. Если электроэнергия, необходимая для получения водорода и рафинирования стали, будет произведена с использованием возобновляемых источников, то можно говорить о производстве стали с нулевым углеродным следом. Водородная альтернатива также тестируется такими промышленными гигантами, как ArcelorMittal, Salzgitter Group, SSAB, LKAB+Vattenfall и Thyssenkrupp AG<sup>21</sup>.

### **Стратегии продвижения водорода в разных странах**

Прогнозы Международного энергетического агентства (МЭА) предполагали, что 2020 г. станет переломным в развитии

---

<sup>19</sup> URL: <https://tass.ru/ekonomika/9665713>

<sup>20</sup> URL: [https://www.rbc.ru/opinions/society/08/04/2021/606b3e089a794779f98ed5d5?from=column\\_2](https://www.rbc.ru/opinions/society/08/04/2021/606b3e089a794779f98ed5d5?from=column_2)

<sup>21</sup>URL: <https://www.primetals.com/press-media/news/primetals-technologies-develops-breakthrough-technology-for-carbon-free-hydrogen-based-direct-reduction-for-iron-ore-fines>

водородной энергетики<sup>22</sup>. К этому моменту многие государства подготовили стратегии и «дорожные карты», предполагающие поддержку инновационных проектов по развитию технологий водородной энергетики, однако препятствием для их реализации стал вызванный пандемией экономический спад 2020 г., прежде всего в нефтепереработке, химической отрасли и металлургии, формирующих большую часть спроса на водород. Тем не менее базовый прогноз МЭА от 2020 г. по производству этого газа выглядит оптимистичным, предполагая быстрое преодоление последствий коронакризиса и возврат к экспоненциальному росту уже с 2021 г.<sup>23</sup>

С точки зрения климатической политики, сравнительным преимуществом замещения ископаемых видов топлива водородом является то, что в процессе его сжигания не образуется углекислый газ. Однако в настоящее время наиболее экономичный способ производства водорода предполагает использование в качестве сырья метана, что значительно увеличивает углеродный след водородной энергетики. Сокращение углеродного следа возможно за счёт масштабного применения технологий улавливания, утилизации и хранения углерода (CCUS). Применение именно такого рода технологий рассматривается нефтегазовыми компаниями в качестве перспективного направления декарбонизации своей деятельности [Конопляник, 2020].

Альтернативный, пока существенно более дорогой способ производства водорода путем электролиза, требует значительных затрат электроэнергии, поэтому для уменьшения карбонового следа в данном случае необходимо снижать углеродоёмкость производства энергии. По оценке IRENA<sup>24</sup> (2019, 2020), стоимость 1 кг водорода, произведенного с использованием ветряной энергии, составляет в среднем около 4 долл. США,

---

<sup>22</sup> URL: <https://www.iea.org/reports/the-covid-19-crisis-and-clean-energy-progress/energy-integration#hydrogen>

<sup>23</sup> IEA. Hydrogen: More Efforts Needed (Tracking Energy Integration report). Paris: International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/tracking-energy-integration-2020/hydrogen> (дата обращения 02.02.2021).

<sup>24</sup> IRENA. Global energy transformation: A roadmap to 2050. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. URL: <https://irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>

IRENA. Global renewables outlook: Energy transformation 2050. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. URL: <https://irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020> (дата обращения 02.02.2021).

солнечной – почти 7 долл. США, тогда как производство из угля или газа обходится в 1,5–2,5 долл. США (даже с учетом CCUS).

Наиболее перспективным является использование водорода в качестве топлива для автомобилей на водородных топливных элементах (ВТЭ). Парк таких автомобилей к концу 2019 г. превысил 25 тыс. машин, причем свыше 12 тыс. было продано за год, предшествующий коронавирусному кризису. Основное количество автомобилей на ВТЭ сосредоточено в США, однако наиболее высокие темпы увеличения их числа наблюдаются в Китае, Японии и Республике Корея. Узким местом развития автотранспорта этого типа является отсутствие разветвлённой заправочной инфраструктуры, и преодолению этой проблемы была посвящена основная часть мероприятий государственной политики по поддержке развития водородной энергетики в мире во второй половине 2010-х гг.<sup>25</sup>

Перспективными направлениями использования водорода с точки зрения снижения углеродоемкости продукции и уменьшения карбонового следа являются также сталеплавильная промышленность – за счет широкого применения методов прямого восстановления железа, – энергетика и коммунальное хозяйство. В этих отраслях водород имеет высокий потенциал применения в качестве средства хранения и накопления энергии, а также балансировки нагрузки энергосетей, в особенности с учетом необходимости сглаживания колебаний потребления и генерации электроэнергии при использовании ВИЭ. Так, в случае избыточной генерации невостребованная энергия может быть использована в процессе производства водорода методом электролиза, а в случае повышенного спроса запасы произведенного ранее водорода могут быть направлены на выработку электроэнергии.

Первой страной, сформировавшей свою национальную водородную стратегию, стала Япония. «Базовая водородная стратегия» появилась в декабре 2017 г.,<sup>26</sup> а в 2019 г. последовала «Стратегическая дорожная карта для водорода и топливных

---

<sup>25</sup> IEA. The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities. Technology report. Paris: International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (дата обращения: 02.02.2021).

<sup>26</sup> METI. Basic Hydrogen Strategy. Japan's Ministry of Economy, Trade and Industry. URL: [https://www.meti.go.jp/english/press/2017/pdf/1226\\_003b.pdf](https://www.meti.go.jp/english/press/2017/pdf/1226_003b.pdf) (дата обращения: 02.02.2021).

элементов»<sup>27</sup>. В 2019 г. схожий национальный план, направленный на повышение энергетической безопасности за счет диверсификации источников энергии, ориентацию на импорт водорода, развитие технологий на экспорт и выполнение климатических обязательств, опубликовала Республика Корея<sup>28</sup>. В марте 2020 г. была утверждена стратегия Нидерландов<sup>29</sup>, в июне – Германии<sup>30</sup> и Норвегии<sup>31</sup>, в июле – Португалии<sup>32</sup> и стран ЕС в целом<sup>33</sup>, а в сентябре была принята стратегия Франции<sup>34</sup>. Примечательно, что стратегии европейских государств (например, Германии и Франции) представлены в контексте планов по восстановлению экономик после коронавирусного кризиса.

Среди национальных водородных стратегий, принятых к настоящему моменту, наибольшего внимания стоят следующие.

- **Национальная водородная стратегия Австралии**<sup>35</sup>, рассматривающая водород в качестве нового перспективного экспортного товара для страны, которая уже много лет является крупнейшим поставщиком энергоресурсов в Азиатско-Тихоокеанском регионе. В документе поставлена задача создания крупномасштабной экспортноориентированной инфраструктуры производства водорода на основе энергии солнца, ветра и воды, а также получения низкоуглеродного водорода из каменного угля

<sup>27</sup>URL: [https://www.meti.go.jp/english/press/2019/pdf/0312\\_002a.pdf](https://www.meti.go.jp/english/press/2019/pdf/0312_002a.pdf)

<sup>28</sup> URL: <https://www.iea.org/policies/6566-korea-hydrogen-economy-roadmap-2040>

<sup>29</sup>URL: <https://www.government.nl/binaries/government/documents/publications/2020/04/06/government-strategy-on-hydrogen/Hydrogen-Strategy-TheNetherlands.pdf>

<sup>30</sup> URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.html>

<sup>31</sup>URL: <https://www.regjeringen.no/contentassets/8ffd54808d7e42e8bce81340b13b6b7d/hydrogenstrategien-engelsk.pdf>

<sup>32</sup>URL: [https://climate-laws.org/rails/active\\_storage/blobs/eyJmcmFpbHMiOmsibWVzc-2FnZSI6IkJBaHBBazhNlwiZXhwIjpubWxsLCJwdXIiOiJibG9iX2lkIn19-5117f24ae7d6bd388d1031ec6e192bdc89efa597/Estrat%C3%A9gia%20Nacional%20para%20o%20Hidrog%C3%A9nio%20DRAFT%20publica%C3%A7ao.pdf](https://climate-laws.org/rails/active_storage/blobs/eyJmcmFpbHMiOmsibWVzc-2FnZSI6IkJBaHBBazhNlwiZXhwIjpubWxsLCJwdXIiOiJibG9iX2lkIn19-5117f24ae7d6bd388d1031ec6e192bdc89efa597/Estrat%C3%A9gia%20Nacional%20para%20o%20Hidrog%C3%A9nio%20DRAFT%20publica%C3%A7ao.pdf)

<sup>33</sup> URL: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen\\_strategy.pdf?utm\\_source=emailmarketing&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=european\\_commission\\_announces\\_hydrogen\\_strategy\\_energy\\_systems\\_integration\\_strategy\\_and\\_clean\\_hydrogen\\_alliance&utm\\_content=2020-07-08&cid=ZhfSKdVyHkBPuOBOg9SXRatph6Ou3Af16NtS8N7tDOIFlz5BhtM5M-xJX558ahT8lO8JS\\_gl6cGKs7Oq25Gj6Q](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf?utm_source=emailmarketing&utm_medium=email&utm_campaign=european_commission_announces_hydrogen_strategy_energy_systems_integration_strategy_and_clean_hydrogen_alliance&utm_content=2020-07-08&cid=ZhfSKdVyHkBPuOBOg9SXRatph6Ou3Af16NtS8N7tDOIFlz5BhtM5M-xJX558ahT8lO8JS_gl6cGKs7Oq25Gj6Q)

<sup>34</sup>URL: <https://www.entreprises.gouv.fr/fr/actualites/industrie/politique-industrielle/strategie-nationale-pour-developpement-de-l-hydrogene>

<sup>35</sup>COAG Energy Council. ...*Australia's National Hydrogen Strategy*. Commonwealth of Australia. URL: <https://hydrogenrenewablesaustralia.com/wp-content/uploads/2019/12/australias-national-hydrogen-strategy.pdf> (дата обращения 02.02.2021).



и природного газа при обязательном применении технологий CCUS<sup>36</sup>. Кроме того, заявлена цель сокращения удельных издержек производства и транспортировки водорода до конкурентоспособного уровня в 1,4 долл. США за 1 кг. В 2015–2019 гг. правительствами разных уровней были профинансированы работы НИОКР, а также демонстрационные и пилотные проекты на общую сумму около 297 млн долл. США. Координация действий предпринимателей в области ТЭК, транспорта, консалтинга и инноваций осуществляется специально созданным при правительстве страны Австралийским водородным советом.

• **Национальная водородная стратегия Германии**<sup>37</sup>, приоритетным направлением которой заявлено расширение импорта и внутреннего производства «зелёного» водорода с его последующим применением на транспорте и в промышленности. Отдельное внимание уделяется развитию так называемых технологий Power-to-X<sup>38</sup>. Предполагается, что общее финансирование инноваций в области водородной энергетики в 2016–2026 гг. составит 1,4 млрд евро, а на НИОКР и трансфер технологий в 2020–2023 гг. будет направлено около 1,1 млрд евро. Помимо специально созданного постоянно действующего правительственного органа, реализацию Стратегии координируют состоящий из министров Государственный комитет по водороду и объединяющий экспертов Национальный совет по водороду.

• **Водородная стратегия правительства Норвегии**, принятая в 2020 г.,<sup>39</sup> предусматривает наращивание внутреннего производства «зеленого» водорода – как из добываемых

---

<sup>36</sup> Австралия и Япония уже объявили о совместном пилотном проекте по созданию цепочки энергетических поставок водорода и подписала соглашение о намерениях с Республикой Корея о достижении сотрудничества по экспорту и импорту водорода. См. URL: <https://hydrogenenergysupplychain.com/>

<sup>37</sup> BMWi.The National Hydrogen Strategy. Berlin: BMWi – Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. URL: <https://www.bmw.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.html> (дата обращения 12.02.2021).

<sup>38</sup> Термин «Power-to-X» охватывает разнообразные технологии преобразования, хранения и обратного преобразования одного вида энергии в другой, с помощью которых можно сгладить неравномерности в производстве электроэнергии, характерные для её генерации из возобновляемых источников. В данном случае речь идёт об использовании избыточной электроэнергии для производства водорода (power-to-hydrogen).

<sup>39</sup> NMPE/NMCE. The Norwegian Government's Hydrogen Strategy: Towards a Low Emission Society. Norwegian Ministry of Petroleum and Norwegian Ministry of Climate and Environment. URL: <https://www.regjeringen.no/contentassets/8ffd54808d7e42e8bce81340b13b6b7d/hydrogenstrategien-engelsk.pdf> (дата обращения 02.02.2021).

в стране углеводородов (с обязательным использованием carbon capturing and sequestration – CCS), так и путём электролиза воды на вновь создаваемых мощностях. Получаемый энергетический водород предполагается использовать на транспорте и в промышленности. Финансирование мероприятий в объёме 13 млрд долл. США будет осуществляться в рамках Плана восстановления экономики после кризиса, вызванного пандемией COVID-19.

• *Национальная водородная стратегия Португалии* утверждена в июле 2020 г., в ней водород называется не иначе как «столпом» перехода к низкоуглеродной экономике<sup>40</sup> [Cabrita-Mendes, 2020]. В качестве ключевого шага осуществления Стратегии предполагается строительство к 2030 г. крупного комплекса по производству водорода, включающего не менее 1 ГВт совокупной мощности ветряных и солнечных энергоустановок. Ввод этого объекта, в сочетании с субсидиями, направляемыми государством на создание инфраструктуры импорта, транспортировки и сбыта водородного топлива, должен обеспечить постепенный перевод значительной части большегрузного транспорта на водородное топливо. Кроме того, предполагается поддерживать на регулярной основе внедрение инновационных водородных технологий в производстве стекла, керамики и цемента, а также в химической и добывающей промышленности. Для решения вышеперечисленных задач, а также для подготовки соответствующих кадров правительством будет организована целевая технологическая коллаборация. Все эти проекты потребуют финансирования в объёме свыше 7 млрд евро, которые частично предполагается покрыть из общеевропейского фонда IPCEI Hydrogen<sup>41</sup>. По оценкам Министерства экологии, к 2030 г. осуществление Стратегии может привести к сокращению импорта природного газа на сумму от 380 до 740 млн евро и к созданию около 10 тыс. новых рабочих мест.

---

<sup>40</sup> Ministério de Ambiente e Ação Climática EN-H2: Estratégia Nacional Para o Hidrogénio Versão. Portugal: Ministry of Environment and Climate Action. URL: [https://climate-laws.org/rails/active\\_storage/blobs/eyJfcmFpbHMiOnsibWVzc2FnZSI6IkJBaHBBazhNliwiZXhwIjpudWxsLCJwdXIiOiJibG9iX2lkIn19-5117f24ae7d6bd388d1031ec6e192bdc89efa597/Estrat%C3%A9gia%20Nacional%20para%20o%20Hidro%C3%A9nio%20DRAFT%20publica%C3%A7ao.pdf](https://climate-laws.org/rails/active_storage/blobs/eyJfcmFpbHMiOnsibWVzc2FnZSI6IkJBaHBBazhNliwiZXhwIjpudWxsLCJwdXIiOiJibG9iX2lkIn19-5117f24ae7d6bd388d1031ec6e192bdc89efa597/Estrat%C3%A9gia%20Nacional%20para%20o%20Hidro%C3%A9nio%20DRAFT%20publica%C3%A7ao.pdf) (дата обращения: 02.02.2021).

<sup>41</sup> Important Project of Common European Interest Hydrogen – англ.

• **Французская Национальная стратегия развития «чистого» водорода**<sup>42</sup> делает ставку на внутреннее производство «зеленого» водорода, опираясь на значительный потенциал собственной электрогенерации, в том числе ядерной. Производимый водород предполагается использовать прежде всего на транспорте и в промышленности, а также в «умных» энергосетях, применяя и развивая технологии Power-to-X. Финансирование программы в размере 7,2 млрд евро до 2030 г. заложено в План восстановления экономики после пандемии COVID-19 под названием «Франция восстанавливается»<sup>43</sup>. Координацией работ будут заниматься Национальный комитет по водороду и Французская ассоциация по водороду и топливным элементам.

• **Нидерланды** в 2020 г. также приняли **Государственную стратегию по водороду**, которая предполагает как ввод в действие новых электролизных мощностей, производящих «зеленый» водород, так и получение водорода из природного газа при обязательном применении технологий CCS. Большое внимание в Стратегии уделяется вопросам создания и развития национальной водородной инфраструктуры с целью сохранения позиции страны как энергетического хаба Европы. Предполагается, что совокупное государственное ежегодное финансирование, начиная с 2021 г., будет составлять 35 млн евро.

• Правительством **Республики Корея** в 2019 г. утверждена **Дорожная карта водородной экономики**<sup>44</sup>. В документе отражено стремление к мировому лидерству в производстве топливных водородных элементов для автомобилей и электростанций, а также поставлена задача развития экспорта автомобилей на водородном топливе. Особенностью корейской водородной политики является отказ от крупномасштабного внутреннего производства водорода в пользу импорта (прежде всего из Австралии). На создание промышленной экосистемы для производства водородных автомобилей на 2020–2022 гг. выделено 2,2 млрд долл. США.

---

<sup>42</sup> *Ministère de L'Économie des Finances et de La Relance. Stratégie Nationale Pour Le Développement De L'hydrogène Décarboné En France.* URL: <https://www.entreprises.gouv.fr/fr/actualites/industrie/politique-industrielle/strategie-nationale-pour-developpement-de-l-hydrogene> (дата обращения: 02.02.2021).

<sup>43</sup> URL: <https://www.gouvernement.fr/france-relance>

<sup>44</sup> *Ministry of Trade, Industry and Energy. Hydrogen Economy Roadmap of Korea.* URL: [https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a\\_fc2f37727595437590891a3c7ca0d025.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_fc2f37727595437590891a3c7ca0d025.pdf) (дата обращения: 02.02.2021).

Организация работ возложена на Министерство торговли и энергетики и специально созданное государственно-частное партнерство H2KOREA.

• **Базовая водородная стратегия Японии**<sup>45</sup> координируется специально созданным при правительстве советом<sup>46</sup>, Её основными целями являются декарбонизация и обеспечение энергобезопасности, импорт водорода (начиная с 2040 г. – «зелёного» водорода), преимущественное использование водорода в электроэнергетике, а также расширение производства и экспорта автомобилей на водородных топливных элементах. Заявленное финансирование на 2020 г. – 664 млн долл. США.

### **Диапазон затрат на производство водорода различными методами**

Основным препятствием на пути развития водородной энергетики являются сравнительно высокие издержки, численные оценки которых тем не менее эксперты дают с большой осторожностью, поскольку выход на промышленные объёмы использования водорода предполагает осуществление крупномасштабных инвестиций, способных качественно изменить текущее представление о реальной величине затрат.

Большинство экспертов сходятся на том, что в течение ближайших десяти лет предложение водорода в промышленных масштабах может быть обеспечено четырьмя способами: за счет использования водорода – побочного продукта иных производств, развития технологий электролиза воды и парового риформинга метана (ПРМ), а также импорта.

Использование водорода, получаемого в качестве побочного продукта, связано с наименьшими затратами, поскольку почти не требует дополнительных капиталовложений<sup>47</sup>. Издержки

---

<sup>45</sup> METI. *Basic Hydrogen Strategy*. Japan's Ministry of Economy, Trade and Industry. URL: [https://www.meti.go.jp/english/press/2017/pdf/1226\\_003b.pdf](https://www.meti.go.jp/english/press/2017/pdf/1226_003b.pdf) (дата обращения: 02.02.2021).

<sup>46</sup> Ministerial Council on Renewable Energy, Hydrogen and Related Issues (URL: [https://japan.kantei.go.jp/97\\_abe/actions/201704/11article1.html](https://japan.kantei.go.jp/97_abe/actions/201704/11article1.html))

<sup>47</sup> Так, британская нефтехимическая компания *Ineos*, ежегодно получающая 300 тыс. т водорода в виде побочного продукта производства хлора и использующая его как топливо и как средство удаления серы на НПЗ, подписала в ноябре 2020 г. меморандум с *Hyundai Motors* о поставках водорода для производства топливных элементов. URL: <https://www.ineos.com/news/ineos-group/ineos-and-hyundai-motor-company-cooperate-on-driving-the-hydrogen-economy-forward/>

производства водорода путём электролиза на сегодняшний день весьма высоки, ввиду низкого КПД трансформации электрической энергии в химическую энергию водорода и дороговизны электричества. Требование использования при производстве водорода электроэнергии только из возобновляемых источников дополнительно увеличивает издержки по причине относительной дороговизны ветряных и солнечных энергоустановок, а также необходимости обеспечения резерва мощности, предназначенного для компенсации неизбежных перепадов в потоке энергии солнца или ветра. Однако, являясь более затратным, этот способ обеспечивает производство «зелёного» водорода.

Основной проблемой, связанной с паровым риформингом метана, на существующем уровне развития технологий является то, что углеродный след от потребления полученной этим способом энергии превышает углеродный след метана (и все же он ниже, чем при использовании бензина или угля). Тем не менее именно с помощью этой технологии можно обеспечить плавный переход к водородной экономике через создание водородной инфраструктуры и продвижение водородных технологий в различных отраслях. Себестоимость производства водорода методом ПРМ уже сегодня лежит в пределах 1,5–3,0 долл. США за 1 кг<sup>48</sup> (IEA, 2019 г.). Однако производство 1 кг водорода этим способом сопровождается выделением в атмосферу 9,8 кг углекислого газа. Применение самых современных технологий улавливания и секвестрирования (CCS) позволяет уменьшить эту величину до 1,2 кг и обходится примерно в 0,26 долл. США в расчёте на 1 кг водорода. Дальнейшее хранение углекислого газа стоит 5,43 долл. США за тонну CO<sub>2</sub>, что повышает полную себестоимость производства водорода ещё примерно на 5 центов (Study Task Force, 2019)<sup>49</sup>.

На импорт водорода накладывают ограничения высокие транспортные затраты и отсутствие полного комплекса необходимых технологий. Так, одобренный в ноябре 2020 г. крупномасштабный пилотный проект поставок водорода из Австралии

---

<sup>48</sup> IEA. The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities. (Technology report). Paris: International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (дата обращения 02.02.2021).

<sup>49</sup> Альтернативой вечному хранению может стать утилизация углерода с использованием систем CCU (carbon capturing and utilisation).

в страны Юго-Восточной Азии основан на сравнительной дешевизне производства солнечной электроэнергии на территории страны-континента<sup>50</sup>. Оптимистический прогноз предполагает снижение к 2050 г. издержек транспортировки водорода в сжиженном виде до 0,56 долл. США за 1 кг, причём львиную долю (0,40 долл. США за 1 кг H<sub>2</sub>) составят затраты на сжижение и хранение в жидком виде (Study Task Force, 2019).

По мнению экспертов, массовое коммерческое использование «зелёного» водорода в качестве топлива к 2030 г. станет возможным лишь в случае пятикратного снижения издержек его производства путём электролиза с использованием возобновляемых источников энергии – с текущего уровня в 15 долл. США до 3 долл./кг. Для этого нужно сократить нормированную стоимость электричества<sup>51</sup>, производимого с использованием солнечной энергии, со 150 долл. США/кВт·ч до 47 долл. США/кВт·ч, а с использованием энергии ветра – с 93 долл. США/кВт·ч до 56 долл. США/кВт·ч. Кроме того, необходимо снизить удельную капиталоемкость электролизных установок с 1500–2000 долл./кВт до 400–1500 долл./кВт (в зависимости от типа установки) и повысить КПД электролизного процесса с 60% до 85%<sup>52</sup>.

Необходимо также учитывать тот факт, что снижение волатильности энергообеспечения, основанного на использовании ВИЭ, потребует создания системы «умных» электросетей и энергохранилищ, что, по самым оптимистичным оценкам, повысит конечную нормированную стоимость водорода как минимум на 15% при использовании только «умных» энергосетей и более чем в два раза при использовании хранилищ электроэнергии<sup>53</sup>.

Ещё один барьер, который предстоит преодолеть за счёт технологических инноваций, – это создание приемлемой инфраструктуры распределения водорода. В краткосрочной перспективе

---

<sup>50</sup>URL: <https://direct.argusmedia.com/newsandanalysis/article/2151283>; <https://www.argusmedia.com/en/news/2153837-australia-plans-to-fast-track-renewable-export-project>

<sup>51</sup> Нормированная стоимость электроэнергии (англ. Levelised Cost of Energy) – средняя расчётная себестоимость производства электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла электростанции, учитывая все возможные капитальные и текущие издержки.

<sup>52</sup> Study Task Force. Hydrogen Roadmap – Korea: Presenting a vision, roadmap and recommendations for Korea's future hydrogen economy. [С.34–36]. URL: [https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a\\_24c2ffd09e4f4eadb75db89995350a52.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_24c2ffd09e4f4eadb75db89995350a52.pdf) (дата обращения: 02.02.2021).

<sup>53</sup> Там же. С. 37.

экономическая эффективность систем заправки водородом может быть повышена за счёт оптимизации источников предложения и экономии от масштаба при производстве и обслуживании заправочных станций.

Многие эксперты сомневаются в осуществимости вышеизложенных целей, указывая на то, что в своё время нефти, а затем природному газу потребовалось по пять десятилетий на наращивание своей доли в мировом энергопотреблении с 1 до 10%, а водороду и другим ВИЭ национальные стратегии отводят на это лишь по 10–15 лет<sup>54</sup>.

### **Выводы и рекомендации**

Развитие водородной энергетики, являющееся одним из ключевых элементов энергоперехода, отражает в себе основные проблемы этого процесса. Главная из них – это необходимость принятия долгосрочных дорогостоящих инвестиционных решений в ситуации, когда объективные вероятностные стоимостные оценки в отношении перспектив отдельно взятых проектов и отрасли в целом практически невозможны. Стандартные методы вероятностных расчётов не применимы к сценарию, предполагающему самоподдерживающееся синергетическое развитие спроса и предложения на основе инновационных технологий.

Благоприятный сценарий развития новой отрасли предполагает крупномасштабное строительство и ввод в действие мощностей генерации «зелёной» электроэнергии, электролиза воды, пиролиза углеводородов, инфраструктуры, предназначенной для транспортировки, хранения и сбыта водорода конечному потребителю, а также производство работающих на водороде промышленных установок и транспортных средств – при одновременном пятикратном снижении издержек. В такой ситуации любой прогноз о ценовых пропорциях на десятилетнюю перспективу выйдет сомнительным.

Несмотря на то, что развитие водородной энергетики в настоящее время сопряжено с рядом проблем и, в частности, с высокими затратами производства «зеленого» водорода (то есть производства с использованием электроэнергии, полученной

---

<sup>54</sup> BP Energy Outlook 2019 Edition. 157 p. [С. 107]. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf> (дата обращения: 12.02.2021).

из возобновимых источников) и недостаточным развитием соответствующей инфраструктуры, растущий интерес государственных органов и международных организаций, принятие национальных стратегий развития отрасли позволяет надеяться на повышение уровня поддержки проектов в области водородной энергетики и принятие дополнительных мер государственного стимулирования ее развития.

К основным преимуществам водорода можно отнести возможности его хранения и использования практически во всех секторах экономики. Выбор сырья для получения водорода чрезвычайно широк, кроме того, его производство может послужить мощным стимулом развития генерации энергии из альтернативных источников. И, что представляется чрезвычайно важным в контексте решения климатических проблем, переход на водородное топливо позволит существенно сократить углеродный след в промышленности и на транспорте.

## Литература /References

Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С. Экологический вызов и устойчивое развитие. М.: Прогресс-Традиция, 2000, 432 с.

Danilov-Danilyan, V.I. and Losev, K.S. (2000). *Environmental Challenge and Sustainable Development*. Moscow, ProgressTraditsiya, 432 p. (In Russ.).

Конопляник А. Чистый водород из природного газа // Газпром. 2020. № 9. С. 20–29. URL: <https://www.gazprom.ru/f/posts/20/713953/gazprom-magazine-2020-09.pdf> (дата обращения 02.02.2021).

Konoplyanik, A. (2020). Pure hydrogen from natural gas. *Gazprom Magazine*. No. 9. Pp. 20–29. (In Russ.). Available at: <https://www.gazprom.ru/f/posts/20/713953/gazprom-magazine-2020-09.pdf> (accessed 02.02.2021).

Cabrita-Mendes, André. (2020). Five central points in the hydrogen strategy for Portugal// *Jornal Economico* 30 July. Available at: <https://jornaleconomico.sapo.pt/en/news/five-central-points-in-the-hydrogen-strategy-for-portugal-619971> (accessed 02.02.2021).

Nikolaïdis, P., Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol.67. Pp. 597–611.

Solow, Robert M. (2009). An Amateur Among Professionals. *The Annual Review of Resource Economics*, Vol.1, Pp. 1–14.

The Economist (2001a). Squeaky clean: Fuel cells are the next big thing. *The Economist* February 8. Available at: <https://www.economist.com/special-report/2001/02/10/squeaky-clean> (accessed 12.02.2021).

The Economist (2001b). The fuel cell's bumpy ride. *The Economist* March 22. Available at: <https://www.economist.com/technology-quarterly/2001/03/24/the-fuel-cells-bumpy-ride> (accessed 12.02.2021).



Статья поступила 13.02.2021

Статья принята к публикации 04.03.2021

**Для цитирования:** *Ковалев С. Ю., Блам И. Ю.* Перспективы водородной энергетики в контексте энергетического перехода // ЭКО. 2021. № 7. С. 56–72. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2021-7-56-72

**For citation:** Kovalev, S. Yu., Blam, I. Yu. (2021). Prospects for the Use of Hydrogen in the Energy Transition Context. *ECO*. No. 7. Pp. 56–72. (In Russ.). DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2021-7-56-72

## Summary

*Kovalev, S. Yu., Ph.D., Blam, I. Yu., Cand. Sci. (Econ.), Institute of Economics and Industrial Engineering, SB RAS, Novosibirsk*

### **Prospects for the Use of Hydrogen in the Energy Transition Context**

**Abstract.** The growth of hydrogen as an energy source, being itself a key element of the energy transition, represents all the basic problems of this process. The principle one is the impossibility to evaluate objectively the prospects of separate projects or the new industry as a whole. The national hydrogen strategies recently adopted by several countries, which include various subsidies, tax incentives and direct financing in order to promote the development of the hydrogen power industry, don't resolve this problem. However, they provide target numbers that give an idea about the scale of changes outlined for the next decade, and enable independent observers to make own conclusions and forecasts about the future of the new industry. In the projected future of the hydrogen power, Russian businesses see mainly an opportunity to scale up the gas export. This position is also shared by the Russian government.

**Keywords:** *hydrogen power industry; climate change; global warming; carbon intensity; carbon sequestration; low carbon path of development*