



СКОЛКОВО
Московская школа управления

Водородная экономика - путь к низкоуглеродному развитию



АВТОРЫ



Татьяна Митрова

Директор, Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО



Юрий Мельников

Старший аналитик по электроэнергетике, Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО



Дмитрий Чугунов

Консультант, Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО

Приглашенный соавтор: Алия Глаголева, научный сотрудник Центра Энергетических Технологий, Сколковский Институт Науки и Технологий

СОДЕРЖАНИЕ

РЕЗЮМЕ	3
ПОЧЕМУ СЕЙЧАС? НОВЫЕ СТИМУЛЫ РАЗВИТИЯ ВОДОРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	5
Водород 1.0.....	5
Новый двигатель глобальных изменений – декарбонизация.....	8
Новая роль водорода для решения проблемы балансирования энергосистем, основанных на ВИЭ.....	9
Новый глобальный энергоноситель.....	13
Статус программ развития водородных технологий.....	15
Прогнозы мирового рынка водородных технологий.....	18
ТЕХНОЛОГИИ ВОДОРОДНОЙ ЭКОНОМИКИ БУДУЩЕГО	20
Производство водорода: как отличить серый от зелёного.....	20
Транспорт водорода: танкеры против труб.....	25
Хранение водорода – от баков до соляных пещер.....	30
Водород в энергетике – в каждый дом?.....	33
Водород на транспорте – в конкуренции с Маском.....	36
Водород в промышленности – новая нефть и уголь.....	43
Безопасность и техническое регулирование.....	45
МЕСТО РОССИИ В ГЛОБАЛЬНОЙ ВОДОРОДНОЙ ЭКОНОМИКЕ	48
Стимулы.....	48
Технологии и стейкхолдеры.....	48
Ресурсы.....	51
Внутренний спрос на водород.....	53
Российская водородная программа как ответ на глобальные вызовы.....	54
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	57

РЕЗЮМЕ

Водородная экономика – это образ будущего для глобальной экономики, в которой водород становится новым глобальным энергоносителем и начинает играть роль, сопоставимую с той, которую сейчас играют уголь, нефть или газ, и гораздо важнее нынешней роли гидроэнергетики, АЭС и биоэнергетики вместе взятых. По различным прогнозам, это может случиться в целом в мире после 2040 г., но в отдельных регионах водородная экономика начинает формироваться уже в наши дни.

Если в XX веке основным драйвером развития водородных технологий была их экономическая конкурентоспособность по сравнению с дорожающими углеводородами – то в наши дни на первый план выходят обязательства государств, отдельных регионов, компаний и их объединений по борьбе с глобальным изменением климата. Водород является необходимым элементом для реализации этих обязательств: возобновляемые источники энергии могут декарбонизировать в основном электроэнергетику (хотя и там есть ограничения, связанные с их стохастичностью) – в то время, как энергообеспечение зданий, транспортный сектор, промышленность во многом остаются «за бортом» декарбонизации – если не удастся найти новый энергоноситель. Водород претендует на решение этой проблемы.

Более 20 государств и более 50 корпораций приняли долгосрочные программы развития водородных технологий, поддержанных льготами, финансированием из бюджетов разных уровней и международной технологической кооперацией.

В лидерах – Япония, поставившая целью строительство «общества, основанного на водороде»¹, развивающая одновременно несколько элементов «водородной» технологической цепочки и несколько знаковых проектов межконтинентального экспорта водорода из Австралии, Норвегии и с Ближнего Востока, а также проект использования водорода в миллионах домохозяйств. Всего в мире насчитываются десятки «водородных сообществ» и несколько сотен пилотных проектов, в первую очередь – в Японии, Германии, Великобритании, США, Южной Кореи и других странах.

Водород в наши дни производится в основном из углеводородов (около 65 млн тонн в год), и используется в местах производства. Вызов ближайших десятилетий – в создании принципиально новой индустрии и рынка, основанного на безуглеродном производстве водорода, его крупномасштабном хранении и транспортировке на сотни и тысячи километров в трубопроводах и в морских и наземных танкерах, в организации широкомасштабного использования в энергетике, транспорте, промышленности – от сталелитейных и химических производств и крупных газовых турбин до индивиду-

¹ Challenges for Japan's Energy Transition. Basic Hydrogen Strategy / Agency for Natural Resources and Energy (ANRE), Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). October 2018, Japan.

альных источников энергии для домохозяйств, промышленности и армии, от дальнебойных грузовиков до дронов.

При этом объемы производства водорода должны возрасти в несколько раз к 2050 г., а некоторые сегменты его технологической цепочки нужно будет масштабировать в сотни раз.

Россия пока остается в стороне от международных сообществ и партнерств, развивающих водородные технологии. В первую очередь, это объясняется тем, что климатическая повестка и декарбонизация пока играют малозначительную роль в энергетической стратегии, что существенно сдерживает развитие не только водородных, но вообще любых низкоуглеродных технологий (возобновляемой энергетики, энергоэффективности, электротранспорта и т.д.).

В то же время, в России есть не только огромные ресурсы для встраивания в новый глобальный рынок, но и собственные технологические разработки (в основном пока, правда, далекие от коммерциализации) и перспективный внутренний спрос.

Развивающийся водородный рынок, очевидно, будет конкурировать с рынками углеводородов, на которых позиции России кажутся сейчас незыблемыми – и в этом смысле стратегия игнорирования или даже борьбы с новым может казаться привлекательной в краткосрочной перспективе. Но в долгосрочной перспективе такая стратегия создаст высокие риски замедления национальной экономики – не только из-за падения спроса на углеводороды, но и в результате ограничения развития инновационного сектора в промышленности.

Ответом на эти глобальные вызовы может стать встраивание водородных технологий в российскую энергетическую стратегию и стратегию низкоуглеродного развития - или принятие отдельной национальной водородной программы, в центре которой должны встать три основных столпа – поддержка технологического развития, долгосрочного спроса и рынка, а также стимулирование международных инвестиций. Ключом к успеху должно стать встраивание в существующие международные водородные сообщества и координация разработчиков и стейкхолдеров внутри страны.

ПОЧЕМУ СЕЙЧАС? НОВЫЕ СТИМУЛЫ РАЗВИТИЯ ВОДОРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Водород 1.0

Водород сам по себе нельзя отнести к инновациям – этот химический элемент был открыт британским ученым Генри Кавендишем еще в 1766 году, а уже через 7 лет его французский коллега Жак Александр Сезар Шарль предпринял первую попытку полета на шаре, наполненном водородом².

В 1800 году был открыт электролиз (процесс получения водорода из воды с использованием электроэнергии), к середине XIX века – топливные элементы (электрохимические устройства, получающие электроэнергию из водорода, минуя процесс горения). В первой трети XX века появились опытные установки паровой конверсии метана (которые позволяли получать водород из легких углеводородов). Эти технологии и сегодня составляют основу использования водорода в промышленности.

Высокая энергетическая ценность водорода (теплота сгорания 120 МДж/кг против 56 МДж/кг у метана) предопределила попытки его использования в качестве топлива для транспорта. Герои «Таинственного острова» Жюль Верна (1874) летали на большом воздушном шаре с водородом за полвека до реального распространения трансатлантических водородных дирижаблей. Жидкий водород стал важным топливом для американской и советской космических программ, в первую очередь – для Space Shuttle и «Бурана». Первый самолет с одним из двигателей на водородном топливе был создан в СССР на базе Ту-154 в конце 1980-х. Первые водородомобили появились в те же годы. Однако, широкого распространения эти технологии не получили в силу дороговизны и невысокой эффективности, и в наши дни водород в качестве топлива используется в очень ограниченных объемах.

Главные направления использования водорода сегодня – в нефтепереработке и в химической промышленности (для производства различных товаров, в первую очередь – аммиака и метанола) (рис. 1). Энергетическое использование водорода, по данным ARENA, оценивается всего в 1-2% от общих объемов его потребления³.

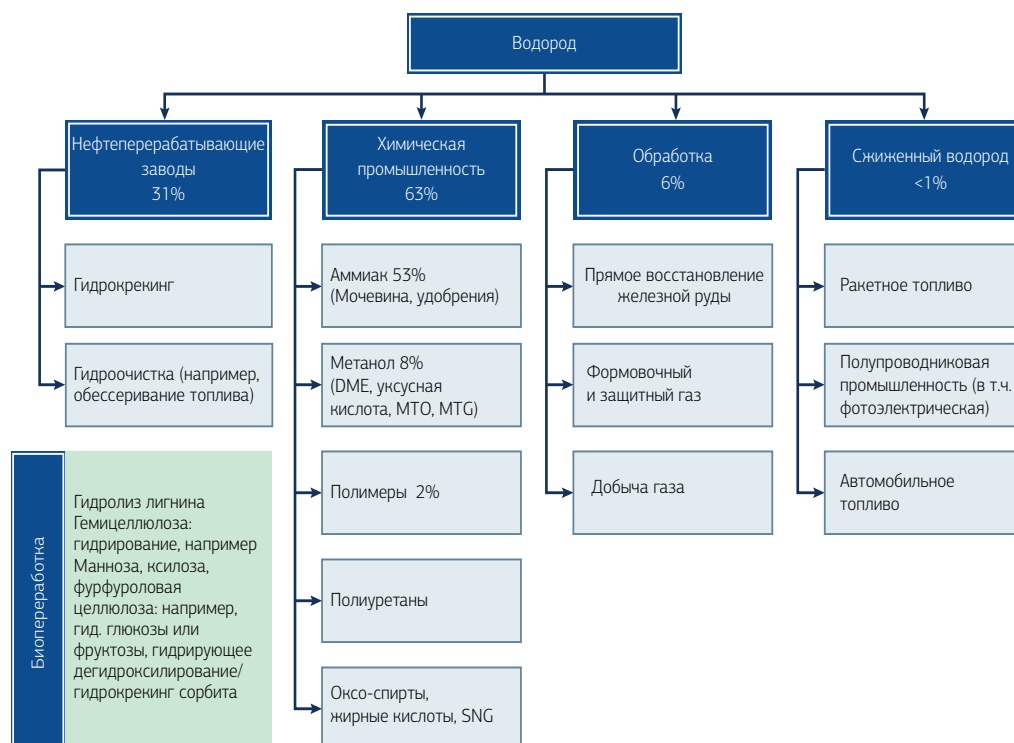
Общий объем производства водорода в мире в настоящее время оценивается различными источниками в 55-65 млн тонн, причем совокупные среднегодовые темпы его роста за последние 20 лет невысоки - около 1,6% (рис. 2). Более 90% водорода производят на месте его потребления (как так называемый кэптивный продукт),

² Introduction to hydrogen and its properties / H. Idriss, M. Scott, V. Subramani // Compendium of Hydrogen Energy; Volume 1: Hydrogen Production and Purification. Edited by V. Subramani, A. Basile and T. N. Veziroglu. - Woodhead Publishing, 2015.

³ Opportunities for Australia from Hydrogen Exports, ACIL Allen Consulting for ARENA, August 2018.

и менее 10% поставляют специализированные компании, работающие на рынке промышленных газов (Air Liquide, Linde, Praxair Inc. и др.).

Рисунок 1 Направления использования водорода



Источник: DECHEMA, DOE, Fair-PR, Linde⁴

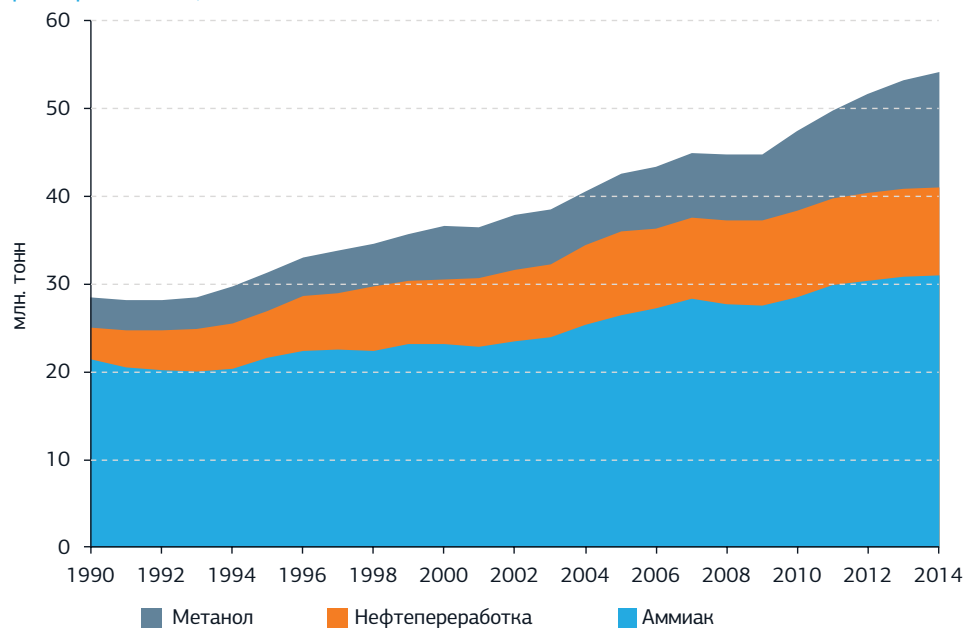
Сегодня в качестве сырья для производства водорода доминируют углеводороды. Более 68% водорода получают сейчас из природного газа, 16% из нефти, 11% - из угля и 5% - из воды с помощью электролиза. Это объясняется сравнительной дешевизной производства из углеводородов – по различным оценкам, себестоимость водорода из природного газа пока в 2-5 раз ниже, чем при электролизе (рис. 2).

Таким образом, в наши дни

- водород выступает как один из промышленных газов, который уже десятилетиями используют, - в первую очередь, в химии и нефтепереработке;
- основной источник энергии для производства водорода – природный газ;
- главный способ производства водорода – паровая конверсия метана;
- объемы производства за последние 20 лет росли небольшими темпами (CAGR 1,6%), достигнув отметки примерно в 65 млн. тонн в год.

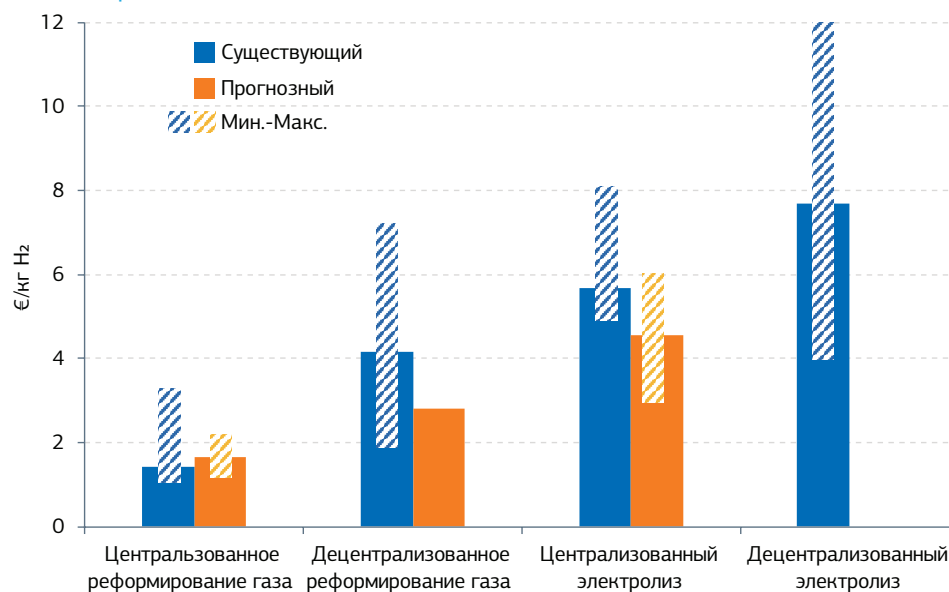
⁴ Hydrogen: Current Use and Future Development / DECHEMA, IEA Hydrogen Workshop, February 2019.

Рисунок 2. Производство водорода в мире промышленностью для собственных нужд (captive production), млн. тонн



Источник: D. Brown, NREL, 2016⁵

Рисунок 3. Стоимость производства водорода методами риформинга природного газа и электролиза



Источники: LBST/Hinico 2015⁶; Grube/Höhlein 2013⁷

Если прошлое и настоящее водорода связано с понятием «промышленный газ», то будущее – с понятием «новый энергоноситель».

⁵ Hydrogen Supply and Demand: Past, Present, and Future / D. Brown (NREL). GasWorld, April 2016.

⁶ Study on hydrogen from renewable resources in the EU / Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), July 2015.

⁷ Costs of Making Hydrogen Available in Supply Systems Based on Renewables / T. Grube, B.Höhlein // Hydrogen and Fuel Cells. Springer, 2016.

Новый двигатель глобальных изменений – декарбонизация

В мировой энергетике происходит процесс глобальной трансформации – «Энергетический переход» - связанный, в первую очередь, с декарбонизацией и низкоуглеродным развитием⁸.

Ведущие страны мира, отдельные регионы, крупные корпорации, города и даже отдельные муниципалитеты устанавливают в своих долгосрочных стратегиях цели по снижению выбросов парниковых газов (или углеродного следа в продукции) в целях борьбы с глобальным изменением климата.

В частности, декларации целого ряда государств (большинство из них сделано в 2015 г. в связи с Парижским соглашением) содержат ограничение выбросов к 2030 г. на 25-40% от уровня 1990 года или даже 2005 года, а Германия и Великобритания декларируют сокращение выбросов парниковых газов на 80-100% к 2050 году (табл. 1).

Таблица 1. Примеры заявленных национальных целей по сокращению выбросов и увеличению абсорбции парниковых газов

Страны	Декларируемые вклады в смягчение изменений климата
США	к 2025 г. сократить выбросы ПГ на 26—28% от уровня 2005 г.
Канада	2030 - на 30% от уровня 2005
Германия	2030 - на 40-55% от уровня 1990, 2050 – на 80-95%
Франция	2030 - на 40% от уровня 1990
Норвегия	2030 - на 40% от уровня 1990
Бразилия	2025 - на 37% от уровня 2005
Мексика	2030 г. - на 22—36% от базовой линии
Китай	К 2030 г. сократить удельные выбросы ПГ на 1 долл. ВВП на 65% с выходом на пик по абсолютной величине выбросов ПГ не позднее 2030 г.
Австралия	2030- на 26 -28% от уровня 2005

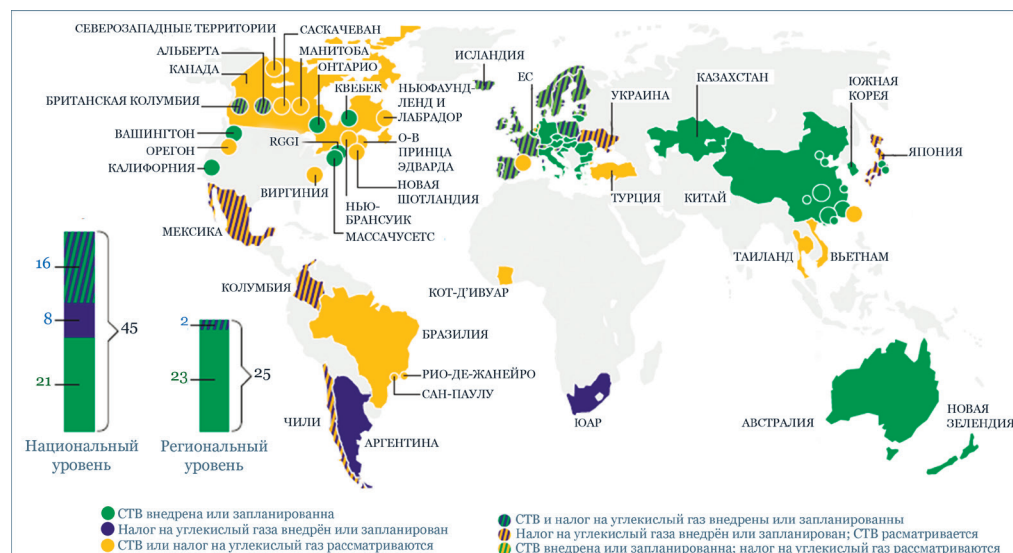
Источник: М. Юлкин⁹, официальный сайт Секретариата Рамочной конвенции ООН об изменении климата¹⁰

Меры экономического стимулирования сокращения выбросов парниковых газов – «углеродные налоги», системы торговли выбросами, - добавляют к операционным издержкам энергокомпаний и их потребителей значительную статью расходов, которой не существовало еще несколько лет назад – и величина этой

⁸ Подробнее об «энергетическом переходе» см.: Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина. ИНЭИ РАН-Московская школа управления СКОЛКОВО – Москва, 2019.

статьи зависит от углеродного следа¹¹. По данным World Bank, к 2018 году уже 45 государств и 25 отдельных регионов (в частности, некоторые штаты США) либо уже запустили национальную систему торговли выбросами CO₂ или другие формы «углеродных сборов», либо планируют это сделать в ближайшем будущем (рис. 4).

Рисунок 4. Статус национальных систем торговли выбросами (СТВ) и систем углеродных сборов в мире по состоянию на 2018 год.



Источник: World Bank Group, State and Trends of Carbon Pricing 2018¹²

В десятке лидеров по абсолютным значениям выбросов парниковых газов – Китай, США, Индия, Россия, Япония, Германия, Южная Корея, Иран, Саудовская Аравия и Канада. На эти страны пришлось, по данным Еврокомиссии¹³, 67% мировых выбросов в 2017 году.

Новая роль водорода для решения проблемы балансирования энергосистем, основанных на ВИЭ

Производство электроэнергии и тепла – один из основных секторов экономики, определяющих выбросы парниковых газов. Его доля, по различным оценкам, составляет около 25-30% (рис. 5). Поэтому первым и наиболее очевидным шагом для достижения целей по декарбонизации экономики становится увеличение доли ВИЭ (с практически нулевым углеродным следом) и уменьшение доли тепловой, например, угольной генерации (углеродный след в которой максимален) в выработке электроэнергии.

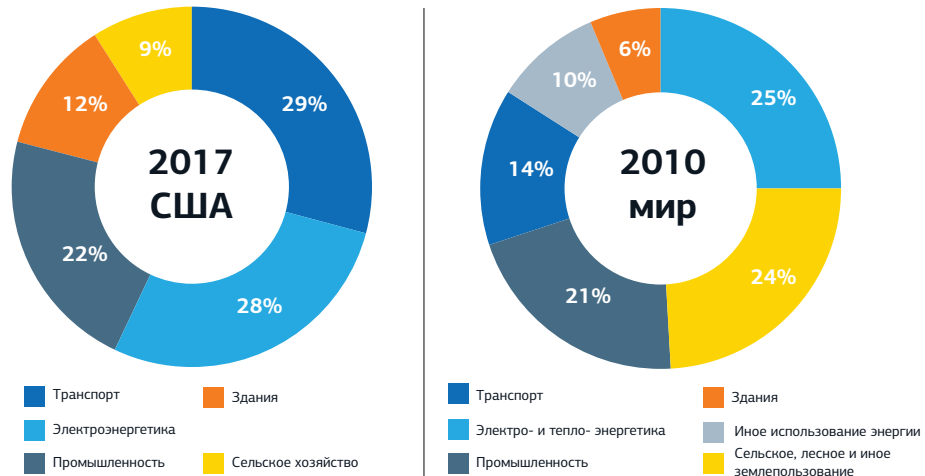
За последние 10 лет доля переменных ВИЭ (солнечной и ветряной генерации) в электроэнергетике ряда стран возросла в 3-10 раз (рис. 6) – при этом приведенная стоимость электроэнергии на базе

¹¹ ГОСТ Р 56276-2014/ISO/TS 14067:2013. Национальный стандарт Российской Федерации. Газы парниковые. Углеродный след продукции. Требования и руководящие указания по количественному определению и предоставлению информации.

¹² World Bank and Ecofys. 2018. “State and Trends of Carbon Pricing 2018 (May)”, by World Bank, Washington, DC.

¹³ EU EDGAR Database (Joint Research Centre (European Commission), 2018).

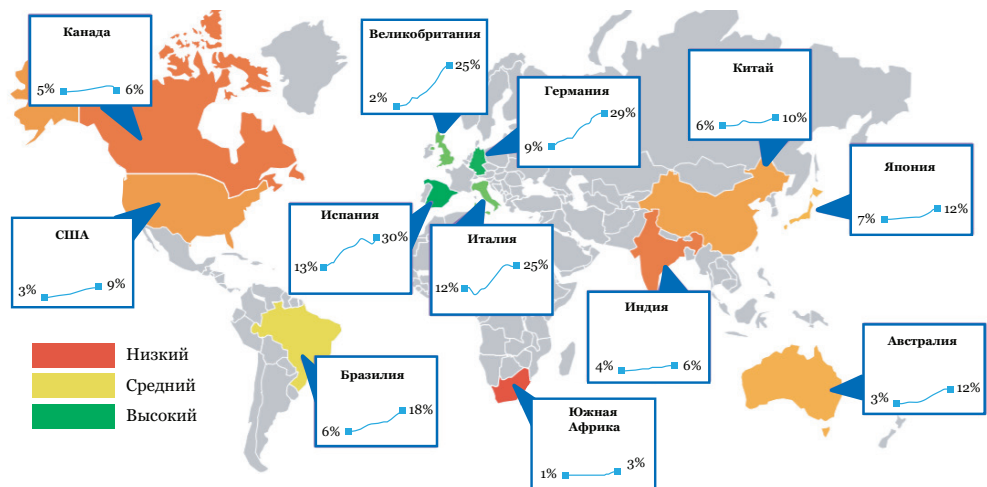
Рисунок 5. Вклад различных отраслей экономики в выбросы парниковых газов в США (слева, данные 2017 г.) и мире в целом (справа, данные 2010 г.)



Источники: EPA¹⁴, dena¹⁵ по данным IPCC Technical Summary¹⁶

ВИЭ сократилась примерно на 80% за счет интенсивного развития технологий. В ряде стран – прежде всего, в Великобритании, Дании, США, многих странах Европы – в том числе, благодаря этому удалось добиться сокращения углеродного следа в генерации электроэнергии на 100-250 г CO₂-экв / кВт-ч¹⁷.

Рисунок 6. Рост доли переменных ВИЭ в электроэнергетике различных стран в 2006-2016 гг.



Источник: BNEF¹⁸

¹⁴ EPA Sources of Greenhouse Gas Emissions 2017. <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>

¹⁵ Denä. Powerfuels: A missing link to a successful global energy transition. Berlin, April 2019.

¹⁶ Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Kadner, S., Minx, J. C., Brunner, S., ... Zwickel, T. (2014). Technical Summary. In Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

¹⁷ I. Staffell, M. Jansen, A. Chase, E. Cotton and C. Lewis (2018). Energy Revolution: Global Outlook. Drax: Selby.

¹⁸ New Energy Outlook 2017. / Bloomberg New Energy Finance.

По прогнозу Международного энергетического агентства, к 2040 г. до 20-35% электроэнергии в мире будет вырабатываться на солнечных и ветряных электростанциях, а по прогнозу Bloomberg New Energy Finance – более 40%. Так или иначе, речь идет о кратном росте доли ВИЭ.

Важное следствие этого развития – появление устойчивого спроса на технологии накопления электроэнергии, которые будут компенсировать неравномерность выработки – как краткосрочную (масштабы секунд-часов), так и долгосрочную (вплоть до нескольких месяцев).

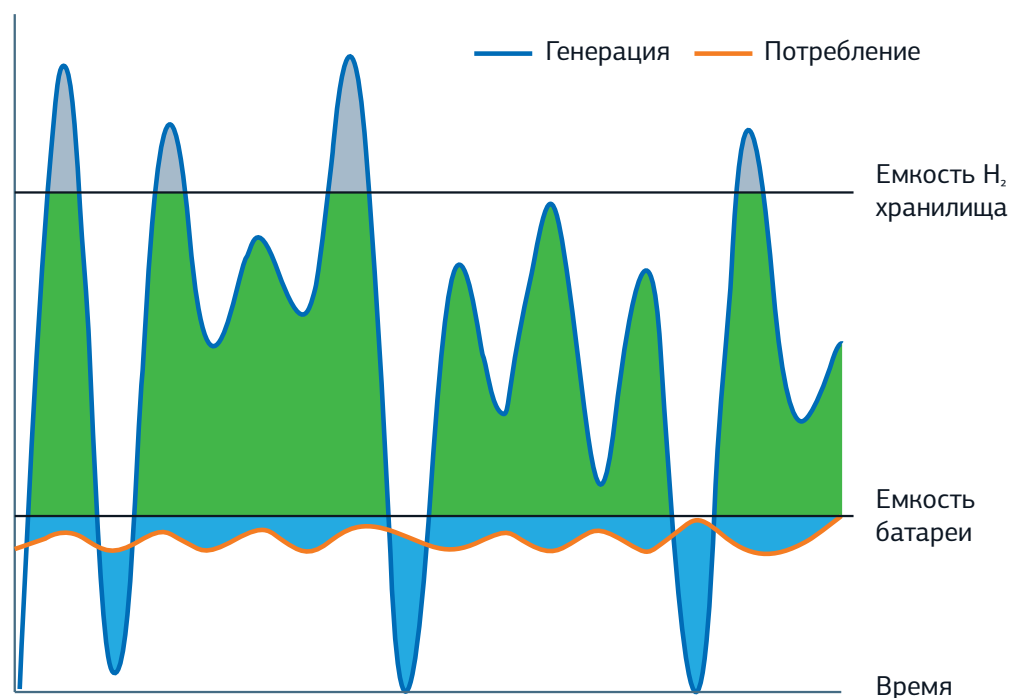
Энергосистемы справляются с неравномерностью выработки ВИЭ с помощью резервных электростанций, межстрановых и межрегиональных перетоков электроэнергии, технологий управления спросом, прогнозирования выработки ВИЭ и традиционных накопителей – гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС), накопителей на сжатом воздухе, а также других источников гибкости¹⁹. Этих инструментов пока достаточно даже для работы в условиях кратковременного роста доли ВИЭ в балансе до 90% (зафиксировано в течение 9 марта 2019 в Германии) или 65% (зафиксировано в течение недели в Германии весной 2019 г.). Однако для того, чтобы обеспечить планируемое удвоение среднегодовой доли ВИЭ в Германии – до 65% к 2030 г. – имеющиеся технологии, очевидно, придется усиливать за счет новых накопителей. По оценке Wood Mackenzie Power & Renewables, глобальный рынок систем хранения энергии с 2018 до 2024 может возрасти в 13 раз – с 12 до 158 ГВт-ч, в первую очередь за счет развития сегмента краткосрочных накопителей, устанавливаемых, например, в домохозяйствах.

Водород – один из наиболее эффективных способов создания долгосрочных хранилищ энергии. Конкуренцию ему могут составить только ГАЭС, которые сейчас составляют более 99% мощности накопителей в мире. Но потенциал дальнейшего роста этого сектора ограничен: ГАЭС могут быть построены только на специальных площадках, подходящих для размещения двух водохранилищ с соответствующим напором между ними. Аккумуляторы на батареях займут нишу краткосрочных накопителей (рис. 7).

Избыточная относительно дешевая электроэнергия от ВИЭ может использоваться при электролизе, в ходе которого вода преобразуется в водород и кислород. Произведенный таким образом водород можно долго хранить различными способами, в том числе в подземных хранилищах – соляных пещерах и существующих подземных хранилищах природного газа – и в нужный момент использовать, например, для выработки электроэнергии. Источником возврата инвестиций в этом случае выступает ценовой арбитраж: разница в цене водорода и электроэнергии в разные сезоны должна быть достаточной, чтобы оправдать сделанные инвестиции.

¹⁹ Power-Industry Transition, Here and Now: Wind and Solar Won't Break the Grid: Nine Case Studies / G. Wynn, Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA). USA, 2018.

Рисунок 7 Иллюстрация роли водорода и литий-ионных батарей в накоплении энергии от ВИЭ



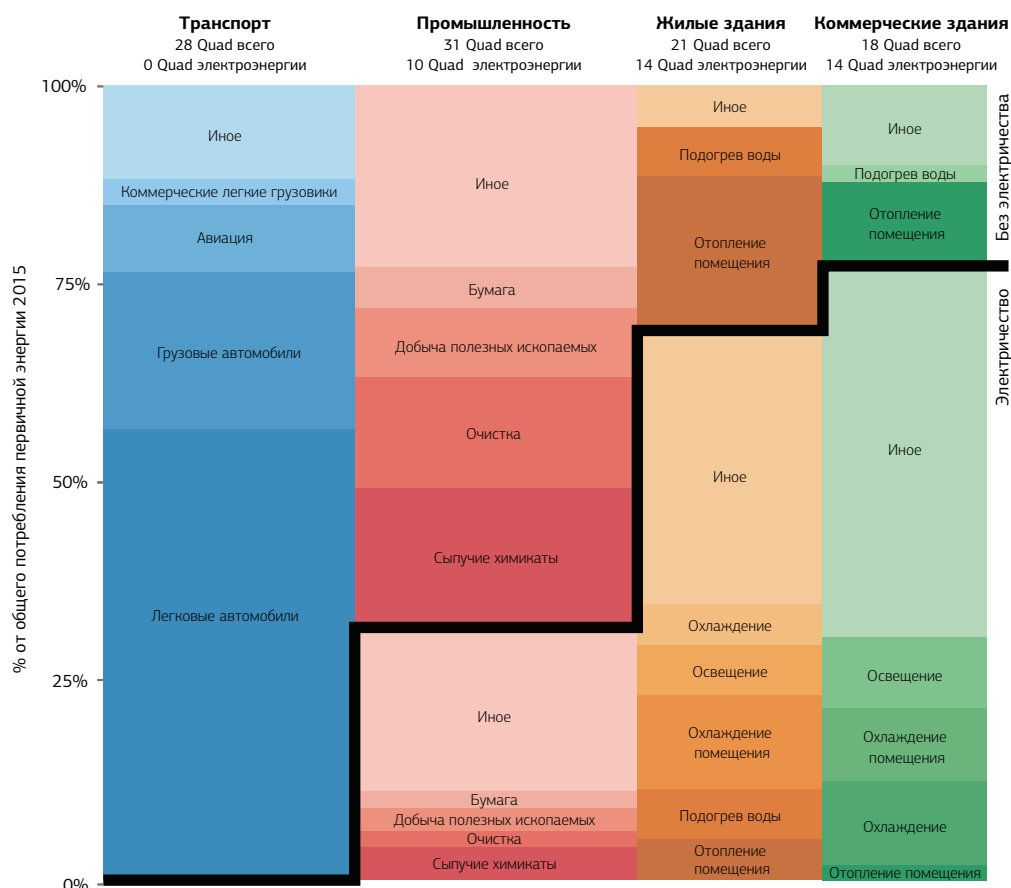
Источники: Hydrogen Council, McKinsey²⁰

Декарбонизацию других секторов экономики – промышленности, транспорта, энергообеспечения зданий – можно усилить, увеличивая объемы используемой ими электроэнергии, развивая «новую электрификацию». Тогда эта электроэнергия, произведенная в первую очередь за счет ВИЭ и, возможно, накопленная с помощью водородных технологий, начнет «вытеснять» ископаемые виды топлива в этих секторах.

Электроэнергия – несомненно, наиболее удобный энергоноситель, но у электрификации есть пределы. По данным NREL, электроэнергия обеспечивает более 60% энергии в США только в секторе зданий – жилых и общественных. Промышленность и – особенно – транспорт электрифицированы гораздо хуже, хотя в сегментах легковых автомобилей или производства сыпучих химикатов есть потенциал для усиления электрификации. В то же время, для прямого использования электроэнергии в авиации, дальних грузоперевозках, морском транспорте и в тяжелой промышленности есть серьезные барьеры.

²⁰ Hydrogen scaling up: A sustainable pathway for the global energy transition / Hydrogen Council, November 2017.

Рисунок 8 Доля электроэнергии в конечном энергопотреблении секторов экономики в США (темным цветом показаны сферы с наибольшим потенциалом прямой электрификации, светлым – с наименьшим)



Источник: NREL²¹

Барьеры в электрификации отдельных процессов и секторов, в свою очередь, создают барьеры и для глубокой декарбонизации экономики. Для их преодоления необходимо найти новый глобальный энергоноситель, который сочетал бы в себе удобство использования во всех секторах и минимальный углеродный след. Именно с этим и связано будущее водорода.

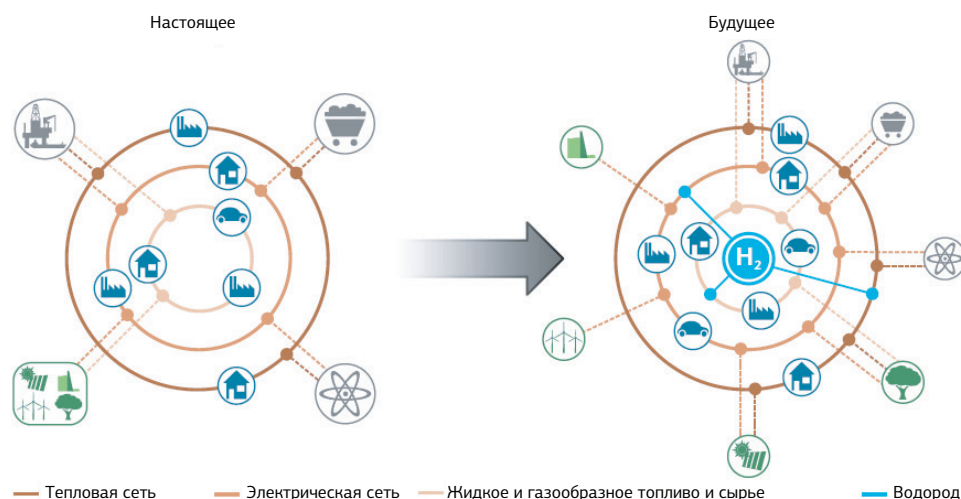
Новый глобальный энергоноситель

Действительно, водород может быть использован (рис. 9):

- в «большой» электроэнергетике (при этом он будет замещать природный газ и нефтепродукты),
- на транспорте (замещение нефтепродуктов);
- в секторе зданий (для отопления и электроснабжения, в том числе автономного, с замещением природного газа или нефтепродуктов);
- в промышленности – в качестве сырья и заменителя традиционных углеводородов.

²¹ Jadun, Paige, Colin McMillan, Daniel Steinberg, Matteo Muratori, Laura Vimmerstedt, and Trieu Mai. Electrification Futures Study: End-Use Electric Technology Cost and Performance Projections through 2050. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2019.

Рисунок 9 Место водорода как нового глобального энергоносителя в интегрированном энергетическом комплексе



Источник: IEA²²

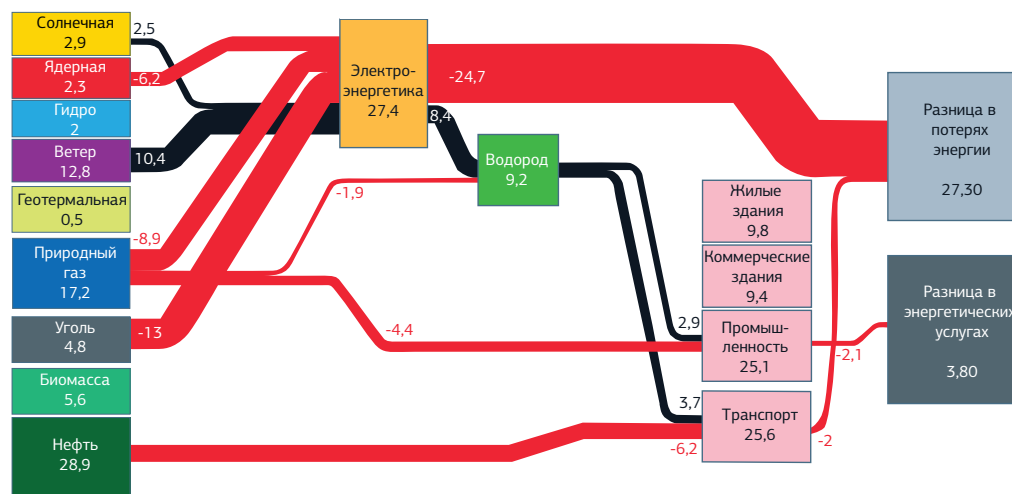
Водород также отличает относительное удобство долгосрочного масштабного хранения и транспортировки на любые расстояния, в том числе с использованием уже имеющейся инфраструктуры, связанной с природным газом (в том числе сжиженным). Транспортировка водорода, таким образом, становится альтернативой развитию магистральных электрических сетей – и это открывает новые возможности для довольно большого числа регионов мира, богатых возобновляемой энергией, но удаленных от центров потребления энергии.

Системный эффект также дополняется новыми возможностями для экономического развития – водородные технологии наукоемки, находятся в самом начале «кривой обучения», у них большой потенциал к росту эффективности и снижению стоимости.

В одном из сценариев интеграции водородных технологий в энергокомплекс США, рассматриваемых лабораториями Министерства энергетики этой страны, к середине века водород возьмет на себя роль второго после электроэнергии всеобщего энергоносителя (рис. 10). Более 90% энергии для производства водорода обеспечит электроэнергия, при этом потребность в первичной энергии угля, газа и нефти упадет на 73%, 34% и 18% соответственно, а доля ВИЭ (в первую очередь за счет ветра) возрастет в 4-5 раз.

²² Hydrogen and Fuel Cells Technology Roadmap / IEA, 2015.

Рисунок 10 Изменения в диаграмме энергопотоков в США в 2040 г. в случае интеграции водородных технологий – по сравнению со сценарием «как обычно» (красным отмечены сузившиеся потоки, черным – расширившиеся), квадриллионов ВТУ²³



Источники: Lawrence Livermore National Laboratory, DOE USA²⁴

Воплощение в жизнь этой амбициозной для водорода роли требует огромных усилий от правительств и бизнеса²⁵. Именно поэтому в последние годы можно наблюдать серьезный рост международной активности в этом секторе, анализу которой посвящен следующий раздел.

Статус программ развития водородных технологий

Стратегическое значение развитию водородных технологий придадут в правительствах целого ряда стран, а также в корпоративном секторе. Речь идет о нескольких сотнях крупных и небольших компаний по всему миру, участвующих в тысячах проектных инициатив.

В **Европейском Союзе** наибольшей активностью отличаются Германия²⁶ и Великобритания²⁷. Но в 2017 г. была запущена общеевропейская инициатива **Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU)**, которая по состоянию на май 2018 г. объединила уже 89 регионов и городов из 22 европейских стран (рис. 11). Участники этой европейской инициативы декларируют стремление использовать водородные технологии в своих энергетических стратегиях в рамках «энергетического перехода», в том числе, реализовать проекты общей стоимостью около 1,8 млрд евро в течение ближайших пяти лет.

²³ 1 квадриллион ВТУ = 25,21 млн. т.н.э.

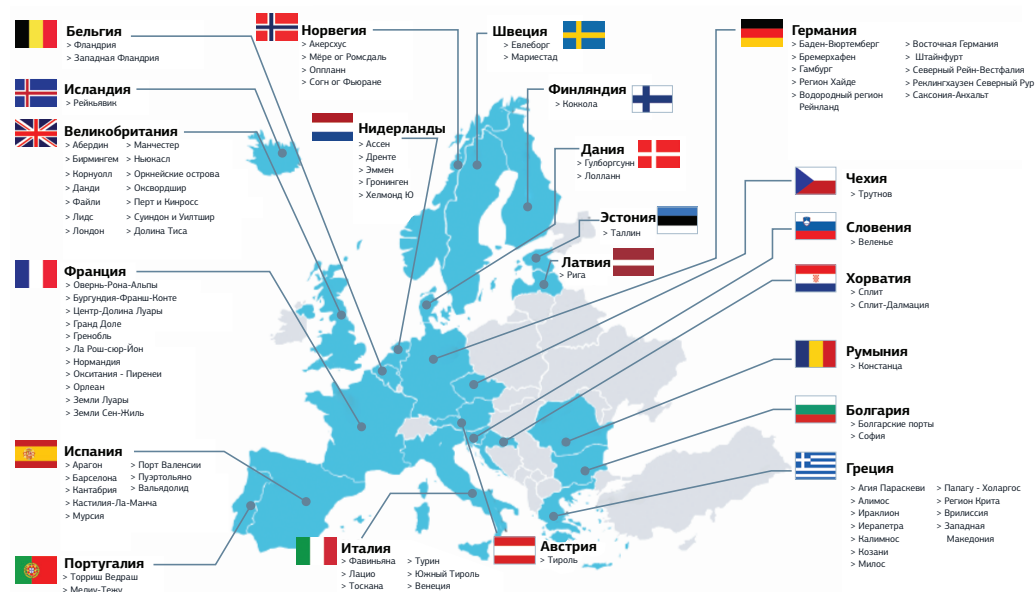
²⁴ H₂ at Scale: Deeply Decarbonizing our Energy System / DOE, April 2016.

²⁵ IEA. World Energy Outlook 2018.

²⁶ Немецкая программа NIP (The national innovation program hydrogen and fuel cell technology) стартовала в 2007 году, объем финансирования до 2017 г. составил около 700 млн евро

²⁷ Британская инициатива H2FC SUPERGEN (The Hydrogen and Fuel SUPERGEN Hub) стартовала в 2012 г. как площадка для объединения исследовательского сообщества. По состоянию на 2014 г. насчитывала 450 членов.

Рисунок 11 Члены европейской водородной программы FCH JU



Источник: FCH JU²⁸

Японская программа (дорожная карта) Strategic Roadmap for Hydrogen and Fuel Cells была запущена летом 2014 года. Цель программы звучит даже шире технологической или климатической повестки – разворачивание строительства «общества, основанного на водороде»²⁹. Дорожная карта содержит конкретные ключевые показатели по сразу нескольким технологиям технологической цепочки – в производстве, хранении, транспорте и использовании водорода – с вехами в 2020, 2025, 2030 и 2050 гг. Так, цель по объемам использования водорода в Японии – с нынешних 200 тонн в год до 10 млн. тонн в 2050 г. (рост в 50 тысяч раз!). Объем государственного финансирования программы в 2017 году составил около 310 млн евро, а общий объем до 2040 года оценивается в несколько миллиардов евро³⁰.

Лидерство Японии признано на международном уровне – в октябре 2018 года в Токио впервые состоялась тематическая встреча министров энергетики - Hydrogen Energy Ministerial Meeting, которую посетили представители 19 стран³¹, а также Евросоюза и Международного энергетического агентства. Лидеры договорились о четырех основных направлениях в международном сотрудничестве, нацеленном на развитие водородной экономики:

²⁸ Fuel Cells and Hydrogen for Green Energy in European Cities and Regions. A Study for the Fuel Cells and Hydro-gen Joint Undertaking / Roland Berger, October 2018.

²⁹ Challenges for Japan's Energy Transition. Basic Hydrogen Strategy / Agency for Natural Resources and Energy (ANRE), Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). October 2018, Japan.

³⁰ Case Study Report: Hydrogen Society (Japan) / Ville Valovirta, Joint Institute for Innovation Policy for the European Commission. February 2018.

³¹ Австралия, Австрия, Бруней, Канада, Китай, Германия, Италия, Япония, Нидерланды, Новая Зеландия, Норвегия, Польша, Катар, ЮАР, Южная Корея, Испания, ОАЭ, Великобритания, США, Евросоюз, МЭА.

- сотрудничество по технологиям, координация и гармонизация регулирования, кодексов и стандартов;
- содействие обмену информацией, совместным международным исследованиям и разработкам с акцентом на безопасность водорода и инфраструктуру для обеспечения его поставок;
- изучение и оценка потенциала водорода во всех секторах, включая его потенциал снижения выбросов CO₂ и других загрязнителей;
- разъяснительная работа, образование и популяризация.

Водородная программа **США** под разными названиями функционирует с 1970-х годов. В XXI веке программа получила второе дыхание – ежегодное финансирование **US DOE Hydrogen and Fuel Cells Program** достигает 120 млн долларов (в период 2004-2011 годов оно было примерно вдвое больше)³².

В течение 2018-начала 2019 годов о своих водородных стратегиях заявили Калифорния, Австралия и Южная Корея.

На **корпоративном уровне** наиболее известное объединение в области водородных технологий – Водородный Совет, **Hydrogen Council**. Организация, основанная в 2017 году в Давосе, к концу 2018 года довела число своих членов до 53 корпораций из 11 стран с общей численностью сотрудников 3,8 млн и годовым доходом 1,8 трлн евро. В своем программном исследовании Водородный Совет декларировал готовность своих членов инвестировать в течение 2018-2022 годов как минимум 1,9 млрд евро в год в НИОКР и развертывание рынков³³. Долгосрочное видение организации – создание к 2050 г. рынка водорода и водородных технологий объемом 2,5 трлн. долл., создание 30 млн рабочих мест и увеличение роли водорода как энергоносителя с 0% до 18% от конечного мирового потребления энергии.

Для сравнения, МЭА оценивает величину глобальных правительственных инвестиций в НИОКР в энергетическом секторе примерно в 25 млрд долл. в год, а величину корпоративных инвестиций – еще около 90 млрд долларов ежегодно³⁴. Лидируют суммарные бюджеты НИОКР автомобильных компаний (около 40 млрд долларов), а минимальный объем относится на АЭС (порядка 2 млрд долларов).

³² <https://www.hydrogen.energy.gov/budget.html>

³³ How hydrogen empowers the energy transition / Hydrogen Council, McKinsey. January 2017

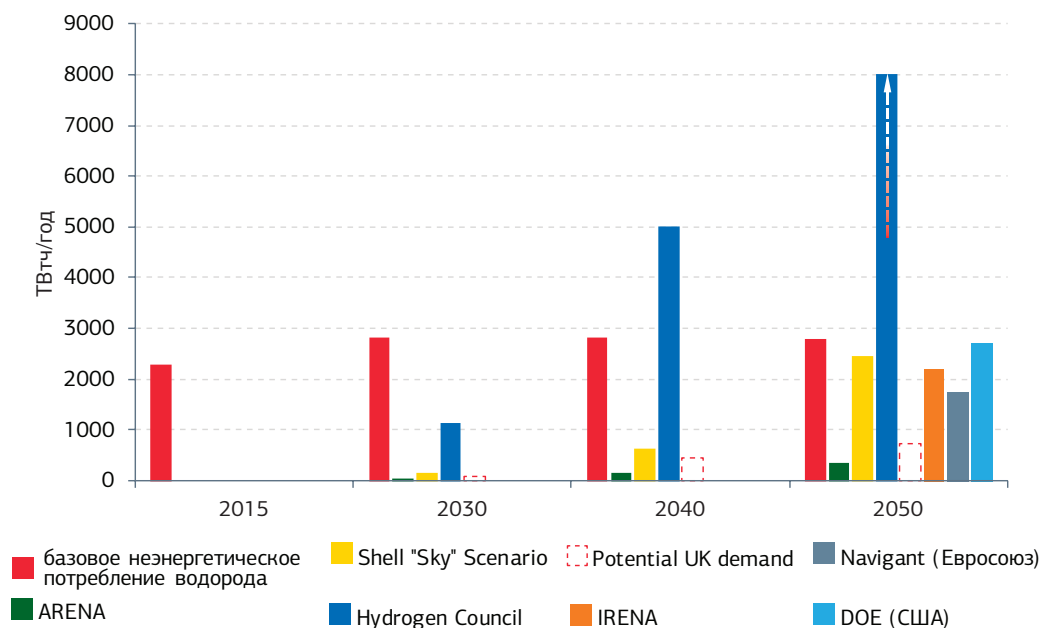
³⁴ IEA World Energy Investments 2019

Оценка инвестиций в НИОКР в водородных технологиях пока затруднена: они учитываются одновременно в секторах транспорта, хранения энергии, нефтегаза, электроэнергетики, энергетики зданий и т.д. Но не менее важный параметр – перспективный объем рынка водородных технологий.

Прогнозы мирового рынка водородных технологий

Большинство известных прогнозов глобального рынка водорода объединяют две характеристики – их противоречивость и несогласованность (рис. 12).

Рисунок 12 Прогнозы глобального рынка водорода к 2050 г., ТВт-ч



Источники: Hydrogen Council³⁵, Shell³⁶, ARENA³⁷, UK Committee on Climate Change³⁸, IRENA³⁹, Navigant⁴⁰, DOE⁴¹

Если консервативные оценки IRENA, Shell, ARENA близятся к нижней границе диапазона – около 500-2000 ТВт-ч водорода в 2050 году в глобальном масштабе – то Hydrogen Council ориентируется на число на порядок большее – 16100 ТВт-ч, или 18% мирового энергопотребления. Более сложные страновые и региональные оценки, сделанные DOE в 2016 году, UK Committee on Climate Change в 2018 году и Navigant в 2019 году, в сценари-

³⁵ Hydrogen scaling up: A sustainable pathway for the global energy transition / Hydrogen Council, November 2017.

³⁶ Shell Scenarios. Sky: The Emergence of a Hydrogen Economy / David Hone, Chief Climate Change Advisor, Shell International Ltd., November 2018.

³⁷ Opportunities for Australia from Hydrogen Exports, ACIL Allen Consulting for ARENA, August 2018.

³⁸ Hydrogen in a low-carbon economy / UK Committee on Climate Change, November 2018.

³⁹ IRENA (2018), Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition. / International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

⁴⁰ Gas for Climate. The optimal role for gas in a net-zero emissions energy system / Navigant Netherlands B.V., re-viewed by Kees van der Leun and Prof. Dr. Kornelis Blok. March 2019.

⁴¹ H₂ at Scale: Deeply Decarbonizing our Energy System / DOE, April 2016.

ях максимального использования водорода показывают его долю к 2050 г. в диапазоне 12-19% конечного потребления энергии в США, Великобритании и Евросоюзе соответственно.

По данным МЭА, в 2017 году сопоставимые доли в мировом конечном энергопотреблении, размером больше 12-19%, занимали только три ископаемых топлива – газ (22%), уголь (27%) и нефть (32%)⁴². Это означает, что к 2050 году роль водорода в мировом энергетическом секторе может оказаться сопоставима с ролью, которую сейчас играет каждый из этих ресурсов, и станет гораздо важнее нынешней роли гидроэнергетики, АЭС и биоэнергетики вместе взятых.

Так или иначе, речь идет о максимальном потенциале роста рынка водорода примерно в 6,5 раз (если говорить об абсолютных объемах его производства от уровня нынешнего, неэнергетического использования) – или с CAGR около 6% до 2050 г. Но корректнее говорить скорее о создании нового рынка, основанного на использовании водорода для декарбонизации мировой экономики – то есть водорода с минимальным углеродным следом, который сейчас почти не производится и не является товаром глобальной торговли.

Этот потенциал невозможно будет реализовать без коренного изменения и/или масштабирования всех технологий производственной цепочки. Их анализу посвящен следующий раздел.

⁴² IEA World Energy Outlook 2018.

ТЕХНОЛОГИИ ВОДОРОДНОЙ ЭКОНОМИКИ БУДУЩЕГО

Производство водорода: как отличить серый от зелёного

В наши дни водород в основном производится за счет паровой конверсии метана (SMR, steam methane reforming) – из природного газа или после газификации угля. Этот отработанный в промышленных масштабах, дешевый процесс еще долго не будет иметь никаких конкурентов по себестоимости получаемого водорода (1-2 долл./кг в зависимости от цены газа и угля).

Но в эпоху «энергетического перехода» не менее важной характеристикой процессов становится их углеродный след. Паровая конверсия метана приводит к эмиссии углекислого газа – 10 кг CO₂ / кг H₂. Поэтому такой **водород** называют **«серым»** – в зависимости от сырья (газ или уголь) он либо сопоставим с обычным природным газом, либо в 2,5 раза хуже него по этому показателю⁴³. Очевидно, для декарбонизации экономики лучше использовать природный газ, чем «серый» водород – поэтому он не может быть частью водородной экономики будущего.

Одна из альтернатив – производство «серого» водорода только в комбинации с технологиями по улавливанию и хранению углекислого газа (CCS – carbon capture and storage)⁴⁴. Полученный таким образом водород называют **«голубым»**. В отличие от SMR, технологии CCS еще далеки от полномасштабной коммерциализации. По данным Global CCS Institute, в 2018 году в мире насчитывалось лишь 18 крупных проектов с технологией улавливания CO₂, еще 5 было в стадии строительства и 20 – в различных стадиях разработки. В мире известны три проекта, в которых интегрированы паровая конверсия метана, а также частичное улавливание, транспорт и хранение CO₂ – это Port Arthur в США, Quest в Канаде и Tomakomai в Японии. По оценке IEAGHG⁴⁵, добавление CCS увеличивает CAPEX технологии SMR на величину до 87%, а OPEX – на величину до 33%. Приведенная стоимость получаемого при этом водорода растет почти в полтора раза – до 1,8 евро за кг, а цена утилизации CO₂ – до 70 евро за тонну CO₂.

В апреле 2019 года получил положительное заключение экологической экспертизы демонстрационный проект производства «голубого» водорода из бурого угля бассейна Латроб-Валли в Австралии с последующим экспортом водорода в Японию - Hydrogen Energy Supply Chain, развиваемый под управлением японской Kawasaki. Для Австралии это шаг

⁴³ Подробнее об углеродном следе «серого» водорода см.: Balcombe et al. (2018). The carbon credentials of hydrogen gas networks and supply chains, Renewable and Sustainable Energy Reviews, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118302983>.

⁴⁴ Еще один способ уменьшить углеродный след – частично использовать в качестве сырья биомассу/биогаз

⁴⁵ IEAGHG, “Techno-Economic Evaluation of SMR Based Standalone (Merchant) Plant with CCS”, 2017/02, February, 2017

к возможности использования огромных запасов бурого угля, причем в низкоуглеродной экономике. Этот пример показывает, что «голубой» водород имеет хорошие перспективы в странах-экспортерах ископаемого топлива, где цена его невелика – хотя коммерциализация технологии CCS потребует еще значительных усилий.

Вторая альтернатива «серому» водороду – **«зеленый»** водород, получаемый электролизом с помощью энергии с минимальным углеродным следом – в первую очередь, от ВИЭ.

Не всякий водород, получаемый электролизом, можно называть «зеленым»- всё зависит от углеродного следа используемой для этого электроэнергии. Так, большинство известных установок в Германии пока используют электроэнергию из энергосистемы, а не исключительно от ВИЭ, - и из-за в целом довольно высокого ее углеродного следа получаемый водород является скорее «серым». Подключение электролизера изолированно к ВИЭ может решить эту проблему – но в этом случае загрузка электролизера падает примерно вдвое: она не может быть выше коэффициента использования установленной мощности ВИЭ. Другой способ «озеленения» процесса электролиза – декарбонизация электроэнергетики, которая в той же Германии запланирована до уровня 100% к 2050 году.

Только «зеленый» водород может быть использован для использования от ВИЭ в других секторах помимо электроэнергетики – поэтому он является краеугольным камнем для водородной экономики в целом, вокруг него концентрируются исследования в большинстве водородных программ.

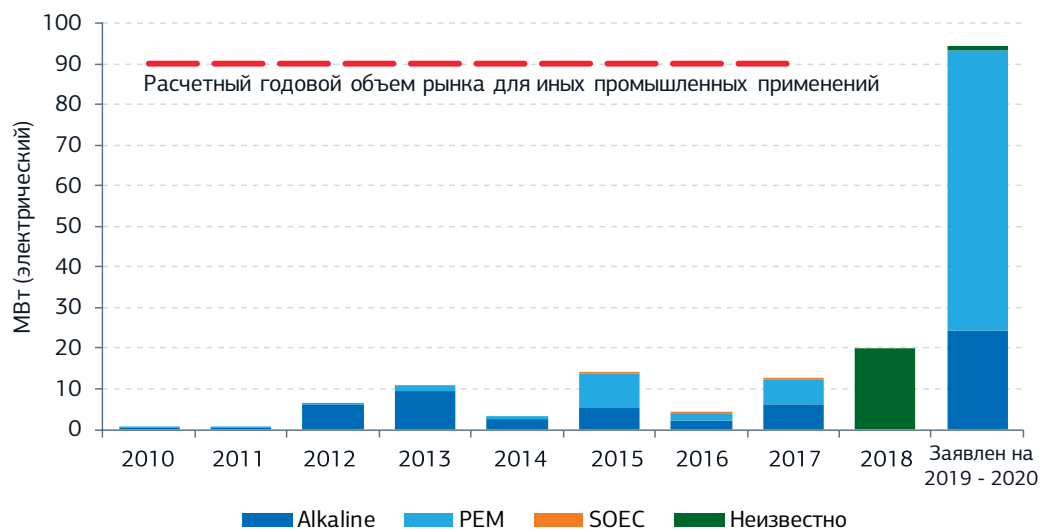
В то же время, энергокомпании с существенным портфелем АЭС тоже претендуют на свое место на глобальном рынке водорода. В апреле 2019 года французская EDF, владеющая 58 атомными энергоблоками, заявила о запуске дочернего бизнеса Hupacoms, который сосредоточится на поставках и обслуживании электролизеров, а также заправке водородного транспорта. Инвестиции EDF составили 16 млн евро, компания заявляет о 40 потенциальных проектах во Франции, Бельгии, Германии и Великобритании. Полученный таким образом водород на базе электроэнергии АЭС также будет иметь минимальный углеродный след.

Стоит отметить, что интерес к «зеленому» и «голубому» водороду явно растет. По данным МЭА, в течение последних семи лет в среднем в мире вводили в эксплуатацию около 10 МВт электролизеров ежегодно. В 2018 году введено уже 20 МВт, а до конца 2020 года ожидается ввод еще 100 МВт. Инвестиции в электролизеры растут – совокупная мощность установок может почти утроиться в ближайшие 2-3 года⁴⁶, достигнув отметки

⁴⁶ <https://www.iea.org/tcep/energyintegration/hydrogen/>

в 150 МВт. Для полноценной коммерциализации нужно перейти через границу в 90 МВт/год (рис. 13).

Рисунок 13 Вводы новых электролизеров разных типов в 2010-2018 гг. в мире



Источник: IEA⁴⁷

По оценке немецкой водородной ассоциации NOW GmbH⁴⁸, для того, чтобы обеспечить потребности в электролизерах одной Германии, в течение 10 лет нужно увеличить эту планку еще в 10-50 раз.

Электролизеры используют разные технологии. Электролизеры с протонными мембранами (PEM) в последние годы лидируют по новым вводам по сравнению с щелочными электролизерами (Alkaline) и, по оценке Frontier Economics⁴⁹, уже достигли коммерциализации. Твердооксидные электролизеры (SOEC) пока находятся в демонстрационной фазе, но, по некоторым оценкам, претендуют на прорыв в индустрии. Дальнейший вызов – масштабирование единичной мощности электролизеров от единиц мегаватт до десятков и сотен мегаватт.

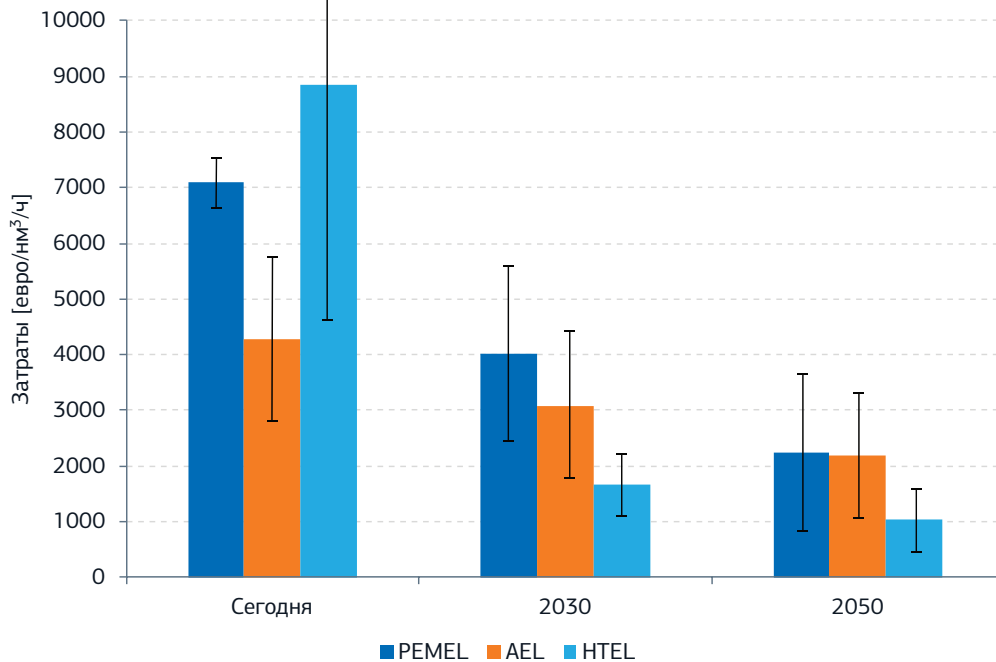
На сегодняшний день электролиз с электроэнергией от ВИЭ пока остается самой дорогой технологией производства водорода – до 3 раз дороже паровой конверсии метана, и целевой задачей всех национальных водородных программ является ее резкое удешевление. В то же время, важными преимуществами выступают практически нулевой углеродный след и отсутствие необходимости комбинировать электролиз с технологией улавливания и хранения CO₂ (CCS).

⁴⁷ IEA World Energy Investments 2018, IEA World Energy Investments 2019

⁴⁸ Brief Overview. Industrialisation of water electrolysis in Germany: Opportunities and challenges for sustainable hydrogen for transport, electricity and heat / National Organisation Hydrogen and Fuel Cell Technology – NOW GmbH. Berlin, October 2018

⁴⁹ International aspects of a Power-to-X roadmap. A report prepared for the World Energy Council Germany / Frontier Economics Ltd, October 2018

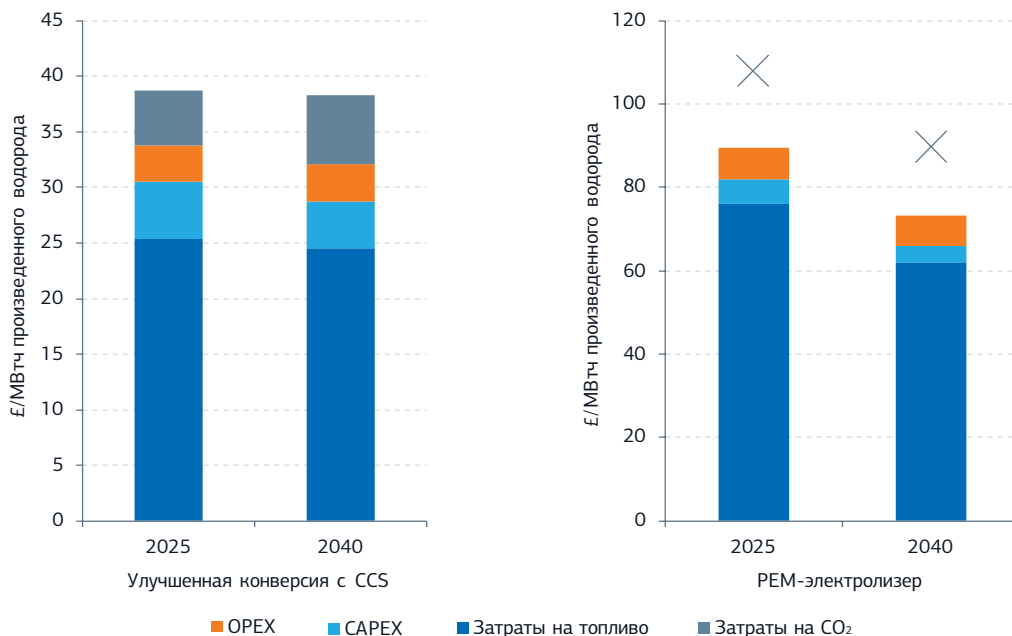
Рисунок 14 Прогноз изменения CAPEX электролизеров разных типов



Источники: NOW GmbH, Fraunhofer Institute, 2018⁵⁰

У электролизеров есть большой потенциал снижения стоимости, в особенности у твердооксидных и электролизеров с протонными мембранами (рис. 14). По данным UK Committee on Climate Change, есть потенциал и в росте эффективности (КПД) – с нынешних 67% до примерно 80% (у электролизеров с протонными мембранами и щелочных) и до 92% - у твердооксидных.

Рисунок 15 Приведенная стоимость «голубого» (слева) и «зеленого» (справа) водорода для условий Великобритании⁵²



Источник: UK Committee on Climate Change⁵²

⁵⁰ Hydrogen in a low-carbon economy / UK Committee on Climate Change, November 2018.

⁵¹ 1 МВт-ч = 30 кг водорода, 1 GBP = 1,13 EUR

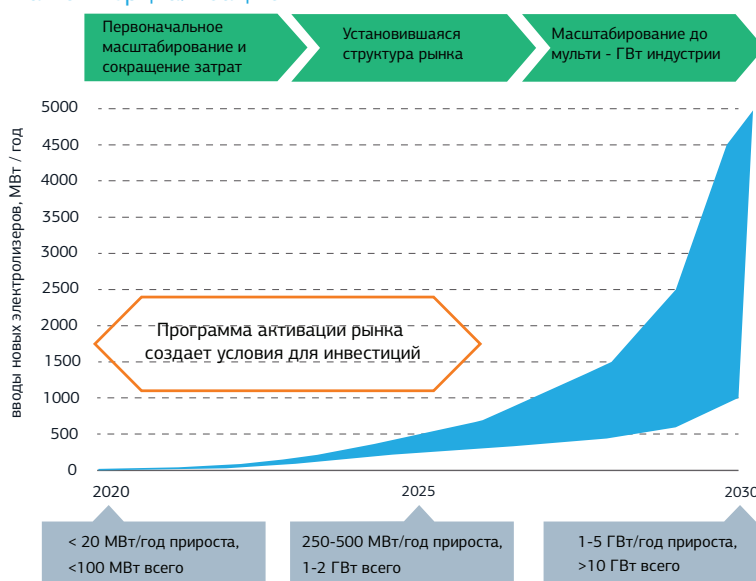
⁵² Hydrogen in a low-carbon economy / UK Committee on Climate Change, November 2018.

При этом предполагается, что для условий Великобритании к 2040 году паровая конверсия метана с CCS будет все еще более доступной по приведенной стоимости водорода, чем электролиз от ВИЭ (рис. 15) – хотя в обеих оценках есть большая доля неопределенности в отношении будущей эффективности технологий, стоимости CO₂, топлива и электроэнергии, степени загрузки электролизеров и т.д.

По оценке МЭА, на основе электролизеров, солнечных и ветряных электростанций в удаленных прибрежных зонах можно создавать эффективные гибридные системы, способные производить «зеленый» водород по приемлемой для экспорта цене. Так, в Австралии в пределах 50 км от береговой линии за исключением пустынь (вода необходима для электролиза) есть возможность производить водород общей энергетической ценностью около 100 млн т.н.э (около 3% нынешнего мирового рынка). Оценка выполнена исходя из цены электроэнергии 47 долл. / МВт·ч и загрузки электролизеров на 30-40%. Себестоимость водорода при этом может составить менее 3 долл. / кг, что близко к цене паровой конверсии метана с CCS⁵³.

Сократить себестоимость «зеленого» водорода может помочь ускоренное развитие рынка электролизеров и удешевление электроэнергии от ВИЭ. По оценке NOW GmbH, рынок электролизеров (не только немецкий, но и глобальный) находится в очень ранней фазе развития: объемы производства в год недостаточны для быстрого движения по «кривой обучения» - мало поставщиков компонентов, малая степень автоматизации и т.д. Рынок сможет достичь полномасштабной коммерциализации, если достигнет гигаваттного масштаба – то есть вырастет в 500-1000 раз (рис. 16). Меры стимулирования спроса на электролизеры в исследовании

Рисунок 16. Темпы развития рынка электролизеров, необходимые для выхода отрасли на коммерциализацию



Источники: NOW GmbH, Fraunhofer Institute, 2018⁵⁴

⁵³ IEA. World Energy Outlook 2018.

⁵⁴ Hydrogen in a low-carbon economy / UK Committee on Climate Change, November 2018.

NOW GmbH признаны гораздо более важными, чем инвестиции в НИОКР и демонстрационные проекты.

«Голубой» и «зеленый» водород, таким образом, могут дополнять друг друга: в период до 2040-2050 годов (когда их цена в среднем по миру сравняется) «голубой» водород может стать эффективным «мостом» для развития других элементов технологической цепочки.

Паровая конверсия метана и электролиз – это базовые технологии, вокруг которых, по мнению большинства исследователей, будет развиваться сектор производства водорода. Среди других способов можно выделить риформинг плазмы; риформинг на основе ионных мембран; конверсию метана с усилением сорбентом; микроканальные реакторы⁵⁵; разложение (пиролиз) метана с выделением углерода в твердом виде⁵⁶; высокотемпературные газоохлаждаемые ядерные реакторы и т.д. Эти технологии пока находятся на еще более ранних стадиях коммерциализации.

Транспорт водорода: танкеры против труб

Транспортировка водорода осуществляется уже на протяжении десятилетий – для нынешних масштабов рынка водорода эти технологии являются хорошо отработанными и обязательно найдут свое применение в будущем. Вместе с тем, многократный рост рынка потребует новых решений, – работающих с большими объемами водорода и дальними расстояниями (в том числе межконтинентального масштаба).

В любом случае, главная особенность транспорта водорода – разнообразие его способов (рис. 17), в каждом из которых есть свои аспекты энергозатрат, безопасности и удобства использования. В каждом конкретном проекте из этого множества можно подобрать оптимальные (по критерию минимальных затрат на всю логистическую цепочку) именно в данном случае технологии.

Наземный транспорт водорода в сжатом и сжиженном виде (автомобильный, железнодорожный и трубопроводный) – десятилетиями отработанная технология, которая является основной сегодня и останется таковой в среднесрочной перспективе.

Например, стандартный **«автоводородовоз»** перевозит набор из трубообразных резервуаров общей емкостью около 20-25 м³ сжатого водорода (давление 25 МПа), или примерно 0,5-1 тонны. Для перевозок в сжиженном виде используются танкеры с полезным грузом до 4 т водорода емкостью до 50 м³ – это особенно выгодно

⁵⁵ Introduction to hydrogen production / R.Navarro, R. Guil, J.Fierro // Compendium of Hydrogen Energy. Volume 1: Hydrogen Production and Purification. Ed. by V. Subramani, A. Basile and T. N. Veziroglu. - Woodhead Publishing, 2015.

⁵⁶ Испытания по пиролизу метана на лабораторной установке проводит в Германии команда исследователей из Karlsruhe Institute of Technology (KIT) и Institute of Advanced Sustainability Studies (IASS) <https://www.iass-potsdam.de/en/news/zero-emission-hydrogen-production-natural-gas-german-gas-industry-awards-prize-researchers>

Рисунок 17 Возможные способы транспортировки водорода

Источник: DNV GL⁵⁷

для транспорта на дальние расстояния (до 4 тыс. км)⁵⁸. В перспективе возможно развитие этого направления - переход от стали на композитные материалы (что уменьшает массу «тары» и устраняет соответствующие логистические ограничения), рост давления т.д.

Трубопроводы подходят для транспорта более крупных и постоянных объемов водорода, хотя и требуют значительных инвестиций. В мире по состоянию на 2016 год насчитывалось более 4,5 тыс. км водородопроводов - преимущественно в США и четырех странах Европы (рис. 18).

Для водорода не обязательно создавать собственную трубопроводную систему – можно использовать уже имеющуюся, созданную для природного газа, подмешивая водород в газ до определённого предела. Для многих стран Европы и США такая технология – всего лишь «хорошо забытое старое», - ведь с XIX до середины XX века во многих городах существовали системы газоснабжения «городским газом» (town gas), получаемым искусственно из угля. Содержание водорода в таком газе обычно составляло около 50%.

⁵⁷ Hydrogen as an energy carrier. An evaluation of emerging hydrogen value chains / DNV GL, 2018.

⁵⁸ Shell Hydrogen Study. Energy of the future? Sustainable Mobility through Fuel Cells and H₂ / Shell Deutschland Oil GmbH, Wuppertal Institut, 2017.

Рисунок 18 Протяженность водородопроводов в мире в 2016 г.

Источник: Shell⁵⁹

В различных странах допускаются разные доли подмешивания водорода в природный газ, - от 0.1% (в Бельгии, Новой Зеландии, Великобритании и США) до 10% в Германии и 12% в Нидерландах⁶⁰. Верхний предел определяется национальными технологическими стандартами, связанными с безопасностью газопроводов и оборудования, сжигающего газ. Исследования NREL показывают⁶¹, что планка в 15% может быть достигнута в имеющихся газотранспортных системах без каких-либо серьезных изменений, а в некоторых случаях она может быть серьезно превышена. По оценке «Газпром экспорта», в современных газопроводах типа «Северного потока» достижимо ограничение в 70%⁶².

Проект H21 North of England⁶³, который развивает местная газовая компания в партнерстве с Equinor, предполагает перевод газовых сетей и оборудования на стороне потребителей севера Англии на водород, строительство новых водородопроводов – в результате 3,7 млн. домов и бизнесов перейдут на использование водорода для отопления. Общая стоимость проекта оценивается в 28 млрд долларов – при этом выбросы CO₂ снизятся на 20 млн тонн в год.

Для масштабной европейской газотранспортной системы (рис.19) подмешивание 20% водорода, по данным МЭА, снизит⁶⁴ выбросы CO₂ на 60 млн тонн в год (на 7%). В то же время, по оценке Navigant, более предпочтительной для Европы опцией на начальном этапе может быть создание водородопроводов из соседних регионов (например, из Северной Африки)⁶⁵.

⁵⁹ International aspects of a Power-to-X roadmap. A report prepared for the World Energy Council Germany / Frontier Economics Ltd, October 2018

⁶⁰ IEA. World Energy Outlook 2018.

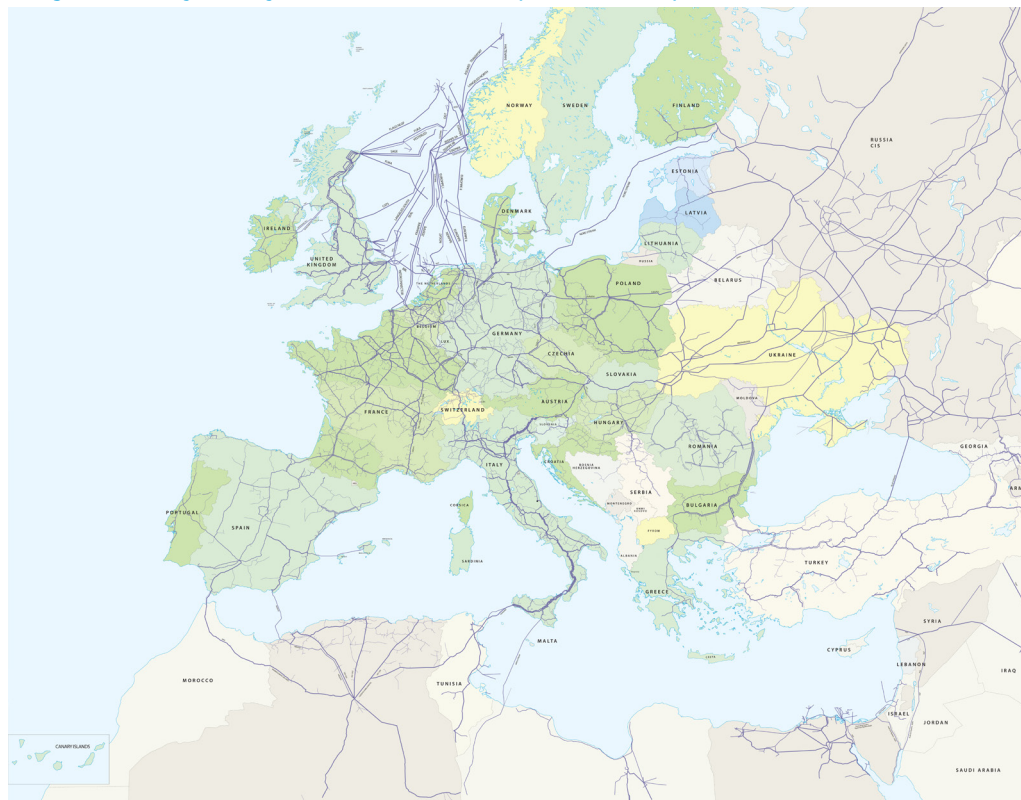
⁶¹ Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues. Technical Report / National Renewable Energy Laboratory, March 2013.

⁶² Blue Fuel - Gazprom Export Global Newsletter / 2018, Issue 48.

⁶³ H21 North of England Report 2018 / D. Sandler, H. Anderson. – November 2018, 544 p.

⁶⁴ IEA. World Energy Outlook 2018.

⁶⁵ Gas for Climate. The optimal role for gas in a net-zero emissions energy system / Navigant Netherlands B.V., reviewed by Kees van der Leun and Prof. Dr. Kornelis Blok. March 2019.

Рисунок 19 Существующая система газопроводов в Европе

Источник: Frontier Economics⁶⁶

Морской и речной транспорт возможен для водорода различных видов – сжатого, сжиженного и химически связанного. В небольших объемах (на автотанкерах с сжатым водородом с помощью паромов) речной транспорт применяется уже сейчас, но не имеет большого значения. Для создания глобального рынка водорода как энергоносителя потребуются другие технологии, сравнимые с индустрией сжиженного природного газа (СПГ) – например, крупнотоннажные морские танкеры с сжиженным водородом общим объемом 150-200 тыс. м³, которые бы использовали выпар (образующийся от нагрева водорода) для судовых двигателей. Разработки подобных судов начались в 1980-1990-х годах в Европе и Японии, но до готовых образцов пока не дошли. Вероятнее всего, первые водородные танкеры появятся в рамках упоминавшегося выше японско-австралийского проекта Hydrogen Energy Supply Chain или аналогичного японско-норвежского проекта – за цепочки поставок в этих проектах отвечает компания Kawasaki Heavy Industries, когда-то построившая первый в Японии СПГ-танкер⁶⁷. Небольшой демонстрационный танкер уже находится в разработке, а крупные корабли находятся в планах на 2020-е годы.

Транспорт сжиженного водорода в целом более затратен, чем СПГ, из-за большей стоимости кораблей, затрат энергии на сжижение и необходимости поддержания гораздо более низкой

⁶⁶ International aspects of a Power-to-X roadmap. A report prepared for the World Energy Council Germany / Frontier Economics Ltd, October 2018

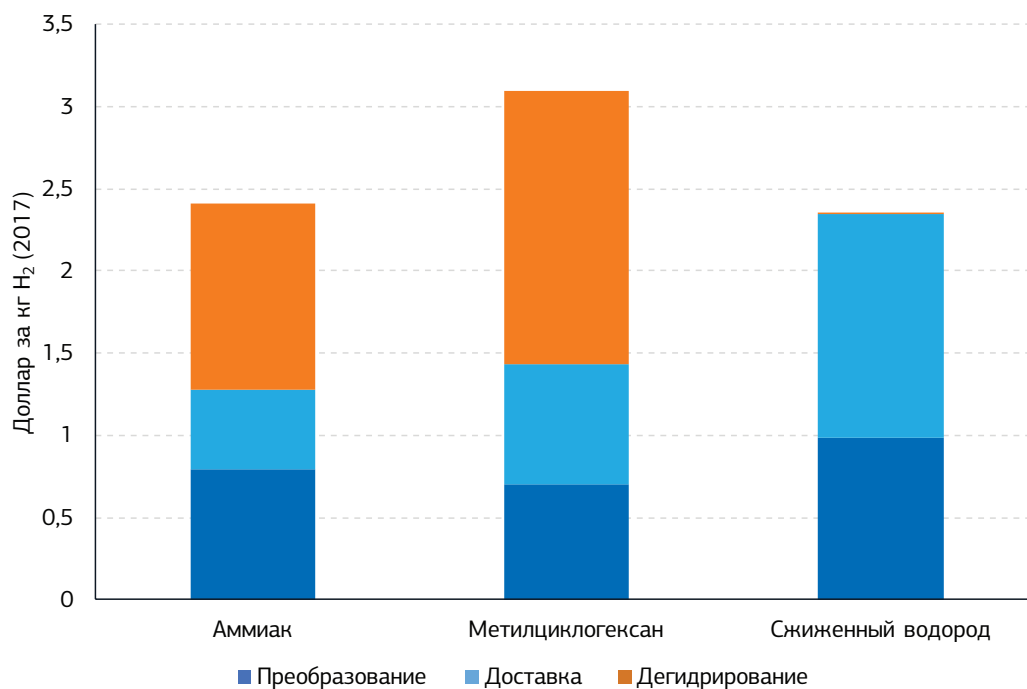
⁶⁷ Kawasaki Hydrogen Road / Режим доступа: <https://global.kawasaki.com/en/hydrogen/index.html>

температуры. Поэтому в экспортных проектах помимо сжижения рассматриваются еще две альтернативы:

- связывание водорода в аммиаке – с последующим сжижением и транспортом аммиака (далее аммиак может быть реализован как самостоятельный товар – глобальный рынок аммиака оценивается в 80 млрд долл., – либо разделен на водород и азот);
- связывание водорода в углеводородах, например в метилциклогексане – гидрирование толуола⁶⁸ – с последующим простым транспортом метилциклогексана и выделением из него водорода.

По оценке МЭА, для условий проекта экспорта водорода из Австралии в 2040 г. стоимость всех трех способов отличается не очень значительно – в пределах 2,6-2,8 долл./кг. В варианте с использованием аммиака есть возможность снизить стоимость до 1,5 долл./кг, если отказаться от выделения водорода из аммиака.

Рисунок 20 Стоимость морского транспорта водорода из Австралии в 2040 г.



Источники IEA⁶⁹

По оценке австралийских компаний, сжижение водорода позволяет сократить затраты на перевозку в 2-5 раз, а перевод его в аммиак – до 20 раз (рис. 21) по сравнению с вариантом сжатого водорода. При этом стоимость выделения аммиака из водорода не учитывается.

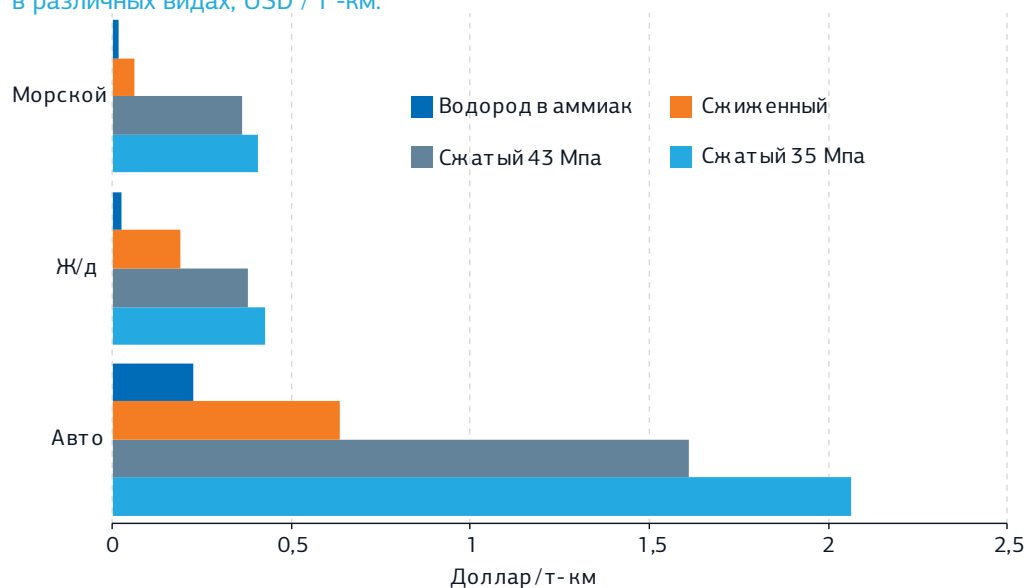
Как и в производстве водорода, стоимость транспорта будет зависеть от темпов развития технологий и снижения затрат. Морской транспорт водорода пока находится в самом начале этого пути: первая символическая отгрузка небольшого объема водорода

⁶⁸ Химическая реакция присоединения водорода к органическому веществу.

⁶⁹ IEA. World Energy Outlook 2018.

в связанном виде из Австралии в Японию состоялась в конце апреля 2019 года в рамках совместного исследовательского проекта университетов Квинсленда и Токио⁷⁰.

Рисунок 21 Удельная стоимость транспортировки водорода различными способами в различных видах, USD / т -км.



Источник: ARENA⁷¹

Хранение водорода – от баков до соляных пещер

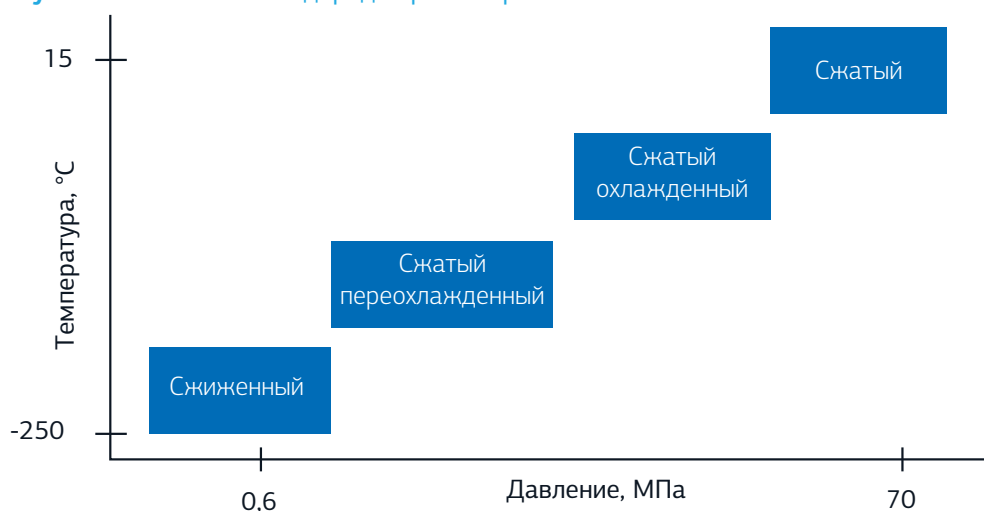
Возможность кратко- и долгосрочного хранения – это базовое преимущество водорода, как энергоносителя, по сравнению с электроэнергией.

Уже в наши дни хорошо отработаны технологии **физического хранения** водорода – в сжатом виде, в охлажденном виде или в их комбинации. В зависимости от вида физического хранения (рис. 22), давление водорода в емкости может меняться с 0,6 до 70 МПа (почти в 120 раз), а температура – снижаться с привычных нам 15-25 °С почти до абсолютного нуля (-250 °С).

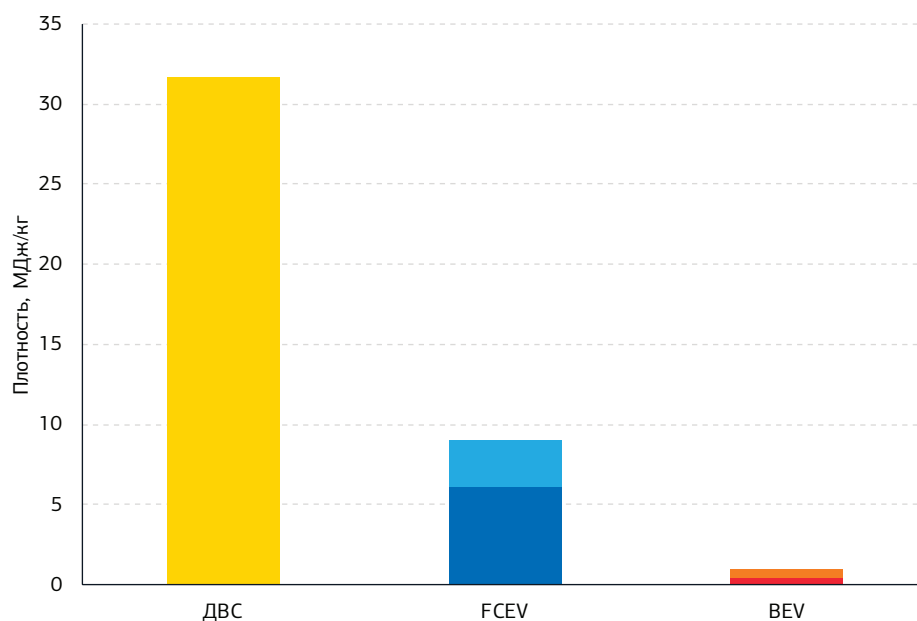
Водород **в сжатом виде** хранится, например, в баках «водородных» электромобилей (электромобилей на топливных элементах). Это хорошо отработанная технология. Ключевой вызов в этом сегменте – высокое давление в баллонах выражается в росте их массы (из-за толстых металлических стенок) и стоимости. Применение новых материалов (например, углеродного волокна) – один из возможных выходов. Пока что энергоемкость бака с бензином или керосином (в пересчете на массу топлива и оборудования) в несколько раз больше, чем у водородной системы – при этом показатели электромобилей на аккумуляторах ниже водородных еще в 6-8 раз (рис. 23)

⁷⁰ <https://www.redlandcitybulletin.com.au/story/5979927/locally-produced-hydrogen-exported-to-japan/>

⁷¹ Opportunities for Australia from Hydrogen Exports, ACIL Allen Consulting for ARENA, August 2018.

Рисунок 22 Состояние водорода при его хранении

Источники: Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО

Рисунок 23 Плотность различных систем хранения в транспорте, МДж/кг

Источник: Shell⁷²

Сжатие водорода позволяет хранить его не только в баках автомобилей, но и в промышленных масштабах под землей – в соляных пещерах, выработанных нефтегазовых месторождениях, водоносных горизонтах. Подземное хранение природного газа применяется уже десятилетиями и, хотя хранение водорода по землей пока находится на ранней стадии освоения – технология уже используется на нескольких объектах в США и Европе, в основном в старых газовых хранилищах. Соляные пещеры – наиболее перспективный сегмент, ведь их объем достигает от 50-100 до 1000 тыс. кубометров – еще предстоит освоить, и этому посвящены несколько пилотных проектов в Европе. Одна

72 Shell Hydrogen Study. Energy of the future? Sustainable Mobility through Fuel Cells and H₂ / Shell Deutschland Oil GmbH, Wuppertal Institut, 2017.

небольшая пещера, например, способна хранить водород общей энергоемкостью 50 ГВт-ч (примерно 5% от годового потребления электроэнергии в России).

Хранение **в охлажденном сжатом виде** – это относительно новая концепция для транспортного сектора, направленная на уменьшение объема баков для хранения и, соответственно, их удешевления. Достигается это охлаждением водорода до температуры жидкого азота (около $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$) с его последующим сжатием на станции, а затем заправкой. В процессе заправки баков электромобилей температура водорода увеличивается примерно на $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Эта технология позволяет сократить массу емкостей для хранения почти на 50% с соответствующим их удешевлением, но общая стоимость системы хранения остается значительной из-за энергозатрат.

Даже **в сжиженном виде**, при температуре около $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$, водород остается очень «неплотным»: в одном литре жидкости содержится всего 71 грамм водорода (в 10 раз меньше, чем у бензина). Например, 140-литровый водородный бак для легковой BMW, разработанный в 1970-х годах компанией Linde, содержал всего до 12 кг водорода при общей массе конструкции примерно 100 кг. Разница температур с окружающей средой столь велика, что потери водорода из-за нагрева емкости почти неизбежны даже с использованием сложной многослойной (в том числе вакуумной) изоляции - от 0,2 до 3% в день. Кроме того, сжижение требует энергозатрат в размере до 20-30% от энергоемкости сжижаемого водорода. Вместе с тем, эта технология уже давно используется в космонавтике (рис. 24).

Рисунок 24 Хранилище сжиженного водорода 3200 м³ в Космическом центре им. Кеннеди, США



Другое направление хранения водорода, отличное от изменения его температуры и давления, основано **на использовании материалов (materials-based)**. Эти технологии пока в начальной стадии разработки – достигнутая плотность хранения, время «зарядки/разрядки» и общая стоимость этих методов хранения

пока недостаточны для конкуренции с физическими методами. Среди таких методов выделяют гидридные (например, металл-гидриды – межузельные соединения водорода с металлами, в которых металл абсорбирует водород объемом до 900 раз больше собственного объема), а также жидкостные и поверхностные.

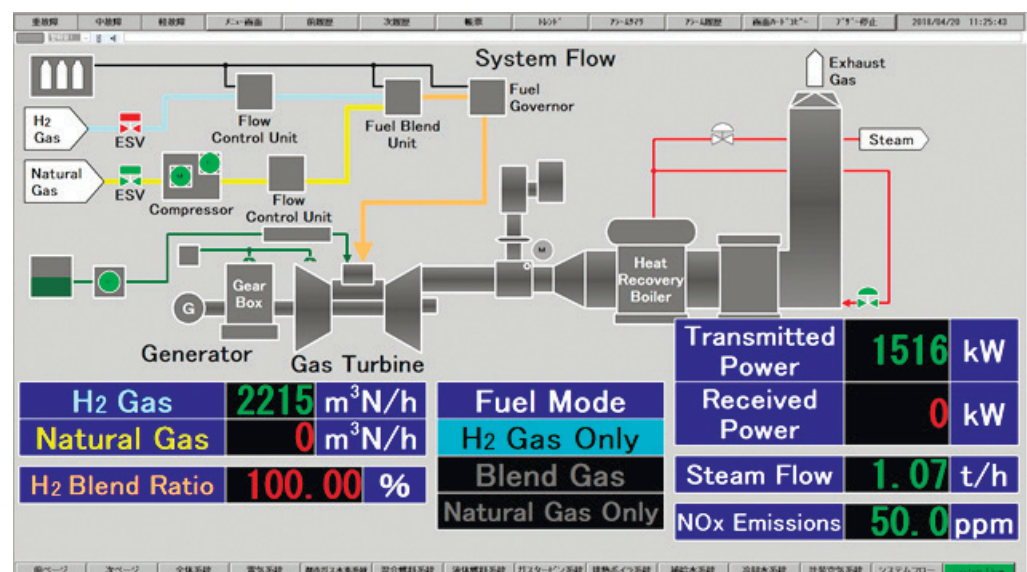
Водород в энергетике – в каждый дом?

Водород в энергетике может использоваться в тех же процессах, что и природный газ – как в мощных электростанциях с газовыми турбинами, так и в небольших отопительных котлах или домашних мини-электростанциях на топливных элементах.

«Водородная» газовая турбина – ключевая технология, критически необходимая для масштабного использования водорода в газовой электроэнергетике. По данным МЭА, почти 25% электроэнергии в мире производится на тепловых электростанциях из природного газа – а в России этот показатель достигает 47%. По оценке компании Mitsubishi Hitachi Power Systems (MHPS), одного из мировых лидеров рынка газотурбинных установок (ГТУ), на существующих ГТУ возможно увеличение доли водорода до 20% в смеси его с природным газом без существенных изменений в конструкции. MHPS участвует в пилотном проекте Nuon/Vattenfall, Statoil и Gasunie по переводу действующего энергоблока 440 МВт на базе газовой турбины на сжигание 100% водорода к 2025 году – речь идет о ТЭС Магнум в Гронингене (Нидерланды). Для реализации этого проекта потребуется опережающее развитие инфраструктуры – за производство «голубого» водорода отвечает Statoil, а Gasunie занимается вопросами транспорта его до станции.

Другая японская компания – Kawasaki – в апреле 2018 года во время испытаний уже довела долю водорода в топливном балансе газотурбинной ТЭЦ в г. Кобе до 100% (рис. 25).

Рисунок 25 Скриншот из системы управления первой в мире газотурбинной ТЭЦ на водороде во время ее испытаний, апрель 2018 (Кобе, Япония)



Источник: Kawasaki

Мини-электростанции на топливных элементах (fuel cell CHP) принципиально отличаются от ТЭС тем, что в них химическая энергия непосредственно преобразуется в электрическую (процесс, обратный электролизу) – соответственно, потребность в турбинах отпадает вовсе, а эффективность этого преобразования уже превышает 50-65% (то есть на уровне или чуть больше, чем у лучших мощнейших ТЭС на природном газе). Такие станции экологически чисты (в отличие от газотурбинных, которые даже при сжигании 100% водорода загрязняют атмосферу оксидами азота), бесшумны, вырабатывают еще и тепловую энергию (так называемые «когенерационные электростанции»), поэтому могут массово применяться в домохозяйствах – к тому же они компактны: внешне такая станция напоминает холодильник.

Наибольшую роль на рынке мощных электрохимических источников энергии играют твердооксидные (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) и фосфорнокислые (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC) топливные элементы (ТЭ). Они могут служить основой для создания электростанций мощностью от нескольких киловатт до десятков мегаватт, использовать не только чистый водород, но и природный газ, биогаз, синтетический газ. Гибкость к топливу позволяет разнести во времени распространение ТЭ в домохозяйствах и развитие водородной инфраструктуры – так, в частности, предусмотрено в японской водородной программе. Перспективными являются ТЭ с протонообменной мембраной (Proton-Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) и с расплавленным карбонатом (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) и др.

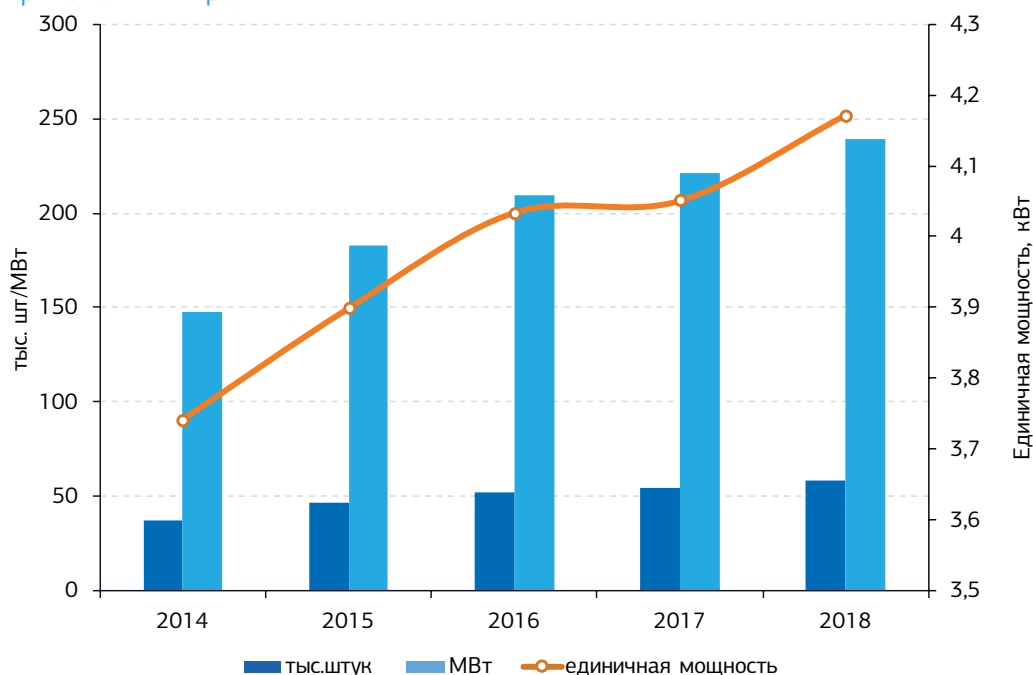
Рынок стационарных ТЭ находится на подъеме (рис. 26), поставки растут, хотя и не так быстро, как в транспортном сегменте, где ТЭ применяются в водородных электромобилях. В 2016 году Navigant Research прогнозировал⁷³ рост рынка стационарных ТЭ до 1 ГВт ежегодно в период до 2020 года, - но с большой вероятностью этот прогноз будет невыполнен.

Япония лидирует – в рамках одного только проекта Ene-Farm в 2018 году было установлено 50 тысяч домашних электростанций на ТЭ (к концу 2018 года всего в рамках этого проекта установлено почти 300 тысяч). В рамках Ene-farm домохозяйства получают субсидии за установку у себя когенерационных электростанций на ТЭ, а всего в 2018 году в федеральном бюджете Японии было предусмотрено около 70 млн долларов таких субсидий для жилого и коммерческого секторов. Этот рынок также развивается в Южной Корее, США и Германии – в первую очередь, благодаря мерам поддержки со стороны регуляторов. Компания BloomEnergy (Калифорния, США), основанная в 2001 году для развития технологий получения кислорода из атмосферы (в рамках марсианской программы NASA) в 2018 году вышла на Нью-Йоркскую биржу, имея 1500 сотрудников и выручку

⁷³ Navigant Research. Stationary Fuel Cells / 3Q 2016.

740 млн. долларов – уже в статусе лидера рынка ТЭ для домохозяйств и коммерческого сектора.

Рисунок 26 Ежегодные поставки топливных элементов для стационарного применения в мире



Источник: Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО по данным E4 Tech⁷⁴

Рынок стационарных ТЭ является частью растущего глобального рынка распределенной энергетики⁷⁵, внутри которого ТЭ конкурируют с другими видами распределенной генерации – ТЭС на природном газе, дизельном топливе, биомассе, солнечных, ветряных электростанциях и т.д. Топливные элементы, подобно традиционным ТЭС, могут изменять нагрузку в зависимости от спроса потребителей на энергию в широком диапазоне и, в то же время, нуждаются в регулярных поставках топлива. При этом они экологически чисты и могут обеспечивать (в случае работы на водороде) практически нулевой углеродный след вырабатываемой энергии – подобно солнечным и ветряным электростанциям. В итоге всё решает стоимостной фактор – и здесь у ТЭ динамика пока отстает от ВИЭ: за последние 8 лет ВИЭ сумели «отыграть» почти двукратный разрыв в приведенной стоимости электроэнергии (LCOE) с топливными элементами (рис. 27).

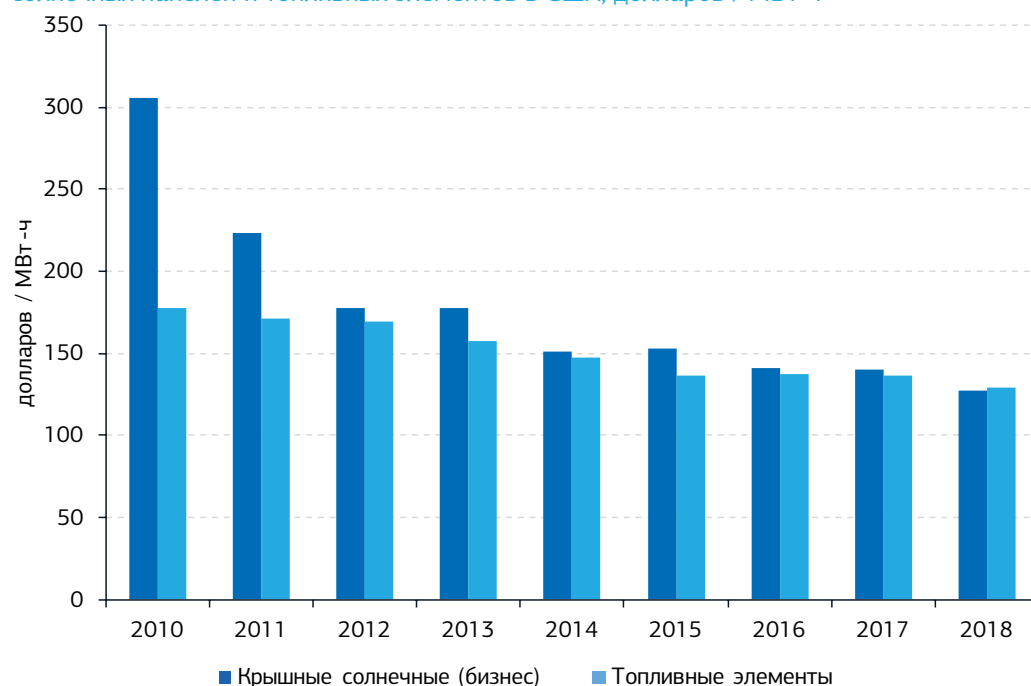
Динамика рынка стационарных ТЭ пока что недостаточна для реализации амбициозных планов, например, японской водородной программы (1,4 млн шт. установленных ТЭ к 2020 году, 5,3 млн к 2030 году) – пока что годовые объемы продаж стационарных ТЭ в мире лишь немного превышают 50 тыс. шт. в год. Для сравне-

⁷⁴ E4Tech. The Fuel Cell Industry Review 2018 / December 2018.

⁷⁵ Подробнее о распределенной энергетике см.: Распределенная энергетика в России: потенциал развития / Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО и др. // февраль 2018 г.

ния, объемы продаж солнечных мини-электростанций только для работы в изолированном от энергосистеме режиме (off-grid) составляют 25-30 млн. штук в год на протяжении 2014-2017 годов.

Рисунок 27 Средняя приведенная стоимость электроэнергии (LCOE) от крышных солнечных панелей и топливных элементов в США, доллары / МВт-ч



Источник: Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО по данным Lazard⁷⁶

Водород на транспорте – в конкуренции с Маском

Применение водорода в транспортном секторе возможно как с использованием двигателей внутреннего сгорания (ДВС) или турбин, так и с использованием топливных элементов. Водородные автобусы, машины и фургоны на ДВС появились еще в середине прошлого века, но топливные элементы в итоге получили большее распространение в мире благодаря отсутствию шума, выхлопов, а также высокой теоретической эффективности преобразования энергии⁷⁷.

Пространство возможных направлений использования водорода на транспорте и их возможные альтернативы сведены в таблицу 2.

⁷⁶ E4Tech. The Fuel Cell Industry Review 2018 / December 2018.

⁷⁷ Energy of the future? Sustainable mobility through Fuel Cells and H₂. Shell Hydrogen Study. Hamburg, 2017

Таблица 2. Использование водорода для разных типов транспорта

Тип транспортных средств	Предложения на рынке	Задачи	Преимущества	Недостатки	Альтернативы	Технич. готовность***
Мототранспорт	прототипы	низкая стоимость покупки и обслуживания, простота хранения, дальность пути	нет шума, выхлопов, дальность пути	высокая стоимость, дорогостоящая инфраструктура	мототранспорт на ДВС, на батареях	2-3
Легковые машины	технология доказана, мелкосерийное производство	сопоставимые с ДВС обслуживание, дальность пути, производительность, большое количество заправочных станций	нет шума и выхлопов, дальность пути сравнима с ДВС	высокая стоимость, дорогостоящая инфраструктура	автотранспорт на ДВС, электромобили	4
Каршеринг/такси	пилотные проекты*	сопоставимые с ДВС обслуживание, дальность пути, производительность, заправочные станции в рамках города	нет шума и выхлопов, субсидии от государства/города, имидж компании	высокая стоимость покупки и неотработанные механизмы обслуживания	автотранспорт на ДВС, электромобили	2-3
Малые грузоперевозки	в основном в США (50) и Германии, прототипы	хранение водорода с экономией места, надежность в эксплуатации, уменьшение стоимости	высокая эффективность, нет шума и выхлопов	меньшая дальность в сравнении с ДВС, высокая стоимость	дизельный транспорт, батареи	2-3
Автобусы	технология доказана и протестирована (Европа, Северная Америка, Азия)	надежное использование с коротким временем заправки, отсутствие лимитов на вес и количество людей для общественного транспорта	300-450 км дальность, нет необходимости для инфраструктуры в городе	дальность все еще мала для междугородних перевозок	автобусы на дизеле, газу, батареях	3-4
Промышленные грузовики	более 11 тыс машин** (Северная Америка), демонстрационные проекты в Европе и Японии	заправочные станции для больших объемов, длительное использование в несколько смен	высокая производительность и продуктивность, отсутствие выхлопов	малый вес, иногда необходимо дополнительное увеличение веса	батареи (внутри), газ, бензин, дизель (снаружи)	4-5
Железнодорожный транспорт	пилотные проекты	необходимое и надежное производство водорода	отсутствие линий электропередач и жд путей-проводников, отсутствие шума	необходимо много места для топлива, высокая стоимость	дизельные, гибридные, электропоезда	2-3
Морской транспорт	использование топливных элементов для производства электричества на борту, пилоты для малых кораблей	отсутствие выхлопов и загрязнения, доступная стоимость на систему и топливо	высокая эффективность, отсутствие выхлопов и загрязнения	высокая стоимость систем и топлива	дизель, турбины для газа	1-2
Авиация	использование для электричества на борту, первые летательные аппараты малой мощности	надежность, компактность, легкость	эффективный преобразователь энергии, многофункциональный	большой объем хранения топлива, высокая стоимость	углеводородное авиационное топливо	1-2
Космос	установленная технология с 1950-60х годов, высокая надежность, малая часть коммерческих перелетов	надежность, высокая производительность	технология давно используется, надежность, высокая производительность	необходимо охлаждение, высокие объемы для хранения топлива, насосы	ракетное топливо	5

* проект HYPER такси во Франции, 600 машин к 2020 году

** погрузочно-разгрузочные машины

*** 1 – экспериментальные установки протестированы в соответствующей среде

2 – прототип тестируется в соответствующей среде

3 – прототип используется

4 – продукт, конечная система доказали функциональную возможность применения

5 – продукт, конечная система используются в среде

В водородном транспорте уже сейчас есть не только пилотные проекты и прототипы, но и мелкосерийное производство (легковые автомобили). Ниже представлены некоторые описания и технические характеристики демонстрационных проектов, а также компании производители, уже представившие на рынке свои продукты.

Легковые электромобили помимо сжатого водорода и топливных элементов имеют в системе буферную аккумуляторную батарею для холодного старта и поддержки пиковых нагрузок и ускорений. Выходная мощность серийных моделей 70-130 кВт, максимальная скорость 160 км/ч (лимитирована системой программного контроля), потребление водорода 0.76-1 кг H₂/100км, водород под давлением 700 бар, дальность 385-750 км. На данный момент максимальной дальностью в 750 км на одной заправке обладает Honda Clarity, автомобиль находится в серийном производстве. В марте 2019 года в Китае был представлен прототип электромобиля с топливными элементами с дальностью хода 1000 км, ведется их подготовка к серийному производству.

Для сравнения, наиболее «дальнобойная» модель аккумуляторного электромобиля (BEV) Tesla, по данным компании, может проехать на одной зарядке до 590 км.⁷⁸

Стоимость наиболее распространенных моделей на рынке Honda Clarity – 51,000 евро, Toyota Mirai – 78,600 евро, Hyundai ix35 Fuel Cell – 65,400 евро. В списке производителей подобных автомобилей также Audi, BMW, Daimler, Ford, GM, Mercedes-Benz. Потенциальными потребителями является частные пользователи, сервисы такси, аренды автомобилей и «каршеринговые» компании. Тем не менее для дальнейшего развития индустрии необходимо развитие инфраструктуры и дальнейшее снижение затрат, что требует значительных инвестиций как со стороны частных компаний, так и со стороны государства.

По оценке Hydrogen Council, имеющийся сейчас почти двукратный разрыв в стоимости владения FCEV по сравнению с автомобилем на ДВС может быть сокращен до 10% между 2025 и 2030 г. Столь существенное падение стоимости (80%) может быть достигнуто за счет эффекта масштаба – как в производстве машин, так и в заправочной инфраструктуре. Аналогичные оценки есть и у других исследователей⁷⁹. Поскольку водородные электромобили находятся в начале «кривой обучения», можно ожидать, что рост их рынка будет сопоставим с ростом рынка электромобилей на аккумуляторах – в котором за 8 лет с 2010 по 2018 г. число электромобилей на дорогах увеличилось с 12 тысяч до 5 млн (для сравнения: в 2018 г. на дорогах в мире было около 11 тыс. FCEV).

⁷⁸ <https://www.tesla.com/models>

⁷⁹ Low-carbon cars in Europe: A socioeconomic assessment / Cambridge Econometrics, July 2018.

Рисунок 28 Примеры автомобилей на водородном топливе

Источники: сайты компаний-производителей Toyota, Hyundai, Honda, Mercedes-Benz

Ряд стран декларирует стремление развить парк водородных электромобилей до 1 млн. к 2030 году – в сумме эти планы приближаются к отметке в 4,6 млн (табл. 3). На фоне имеющегося парка машин на ДВС (более 1 млрд.) это пока небольшой показатель, зато он сопоставим с количеством электромобилей в 2018 году (около 5 млн.)

Таблица 3. Национальные цели по распространению водородных автомобилей на топливных элементах, тыс. шт.

	2020	2022	2023	2025	2028	2030
США	13	40				
Калифорния						1 000
Япония	40			200		800
Франция		5			20 – 50	
Китай	5			50		1 000
Нидерланды	2					
Корея			81			1 800

Источник: IEA⁸⁰

Автобусы являются важным примером использования водородной энергетики в сфере общественного транспорта. Для производства «водородных» автобусов используют стандартные шасси с электродвигателем в качестве привода – а электроэнергию для его работы вырабатывают топливные элементы (в гибридной модификации автобус также оснащают накопителем электроэнергии). Мощность превышает 100 кВт, удельное потребление водорода составляет 8-14 кг/100 км, что при КПД 51-58% обеспечивает среднюю дальность 250-450 км. Сжатый

80 <https://www.iea.org/tcep/energyintegration/hydrogen/>

водород хранится в баллонах с давлением 350 бар. Существующие модификации водородных автобусов обладают вместительностью 75-105 человек, а средняя стоимость составляет 625 тыс. евро. Лидеры этого рынка - Daimler EvoBus, Van Hool, VDL, Solaris, Toyota, Writghtbus, Ballard, Hydrogenics и др.

Есть примеры использования водорода и на **железнодорожном** транспорте – так, в Германии дизельный поезд заменили водородным производства Alstom. Выходная мощность такого поезда 400 кВт, система работает в гибриде с электрическими батареями. Максимальная скорость 140 км/ч, потребление водорода 0.25-0.3 кг/км, дальность 600-800 км, водород находится под давлением 350 бар. Вместимость поезда 300 человек, из которых 150 мест сидячие. Стоимость одного поезда около 5.1-5.6 млн евро без учета инфраструктуры. Компания Alstom поставляет не только сам поезд и осуществляет обслуживание, но также и устанавливает заправочные станции и создает инфраструктуру совместно с компанией заказчиком. Возможным пользователем данной услуги в ближайшем будущем могут быть государственные органы, региональные поставщики железнодорожных услуг, железнодорожные компании (частные и государственные).

Категория **малого грузового транспорта**, включающая в себя мусоровозы, малотоннажные грузовики служб доставки, вилочные погрузчики, и др., является перспективной зоной для применения водородной энергетики. Мощность может варьироваться от 2,5 – 4,5 кВт у погрузчиков, до 30 – 80 кВт у грузовиков и мусоровозов. Скорость малотоннажных грузовиков достигает 100-130 км/ч, дальность – 200-300 км. Средняя продолжительность работы у менее мощных погрузчиков составляет 8 часов. На этом рынке работают компании CAT, Linde, Renault/Symbio Fcell, E-Trucks Europe, FAUN Kirchoff, ULEMCo и др. Потребителями продукции являются логистические и складские компании, муниципальные службы, службы доставки и почтовые сервисы.

Скутеры (мопеды) на водородном топливе могут достигать скорости 50-70 км/ч, максимальная дальность составляет 350 км при средней скорости 30 км/ч. Выходная мощность 3-4 кВт, КПД топливного элемента 53% (при номинальной мощности 3.9 кВт). На этом рынке работают компании APFCT, Suzuki. Потребителями продукции являются как частные пользователи, так и сервисные городские службы. Стоимость подобного скутера в среднем составляет 3,100 евро.

Велосипеды на водороде используют топливные элементы, сжатый водород и электрический мотор для поддержки при кручении педалей. Скорость около 25-35 км/ч, дальность более 100 км, выходная мощность 0.1 – 0.25 кВт, водород под давлением 200-350 бар. Масса такого велосипеда 24-35 кг. Лидеры рынка - Linde, Gernweit, Clean Air mobility, Pragma Industries,

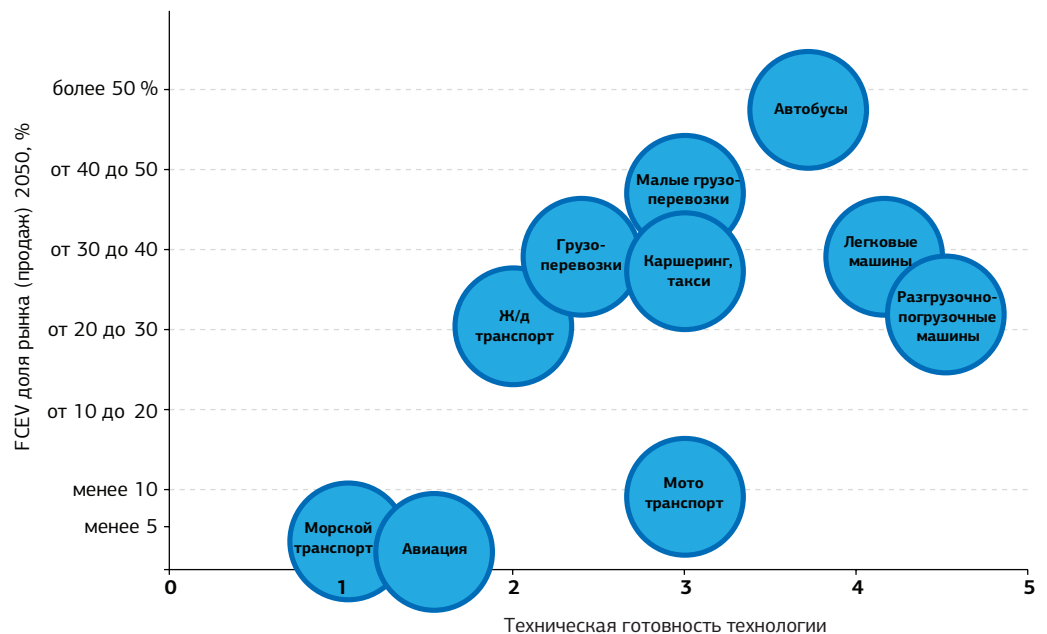
Atawey (инфраструктура). Потребителями продукции являются как частные пользователи, так и службы доставки, сервисы аренды велосипедов в городе.

Проработанные концепции и пилотные проекты также существуют в сфере **грузового транспорта** для применения в проектах региональной логистики и доставки. В этом сегменте выделяется сфера ритейла, к примеру, доставка продуктов в магазины, так как транспорт часто перемещается по одному и тому же маршруту в рамках региона/города. Выходная мощность грузового транспорта на данный момент составляет 250-750 кВт, потребление водорода 7.5 – 15.7 кг H₂/100 км, дальность пути 320 – 1 200 км, водород находится под давлением 350 бар. В данных конфигурациях также присутствует батарея емкостью от 30 до 320 кВт ч. Этот сегмент развивают компании Esoro, Kenworth, Nikola, Navistar, Toyota, Scania/ASKO на базе топливных элементов от PowerCell, Hydrogenics, Ballard, US Hybrid, Toyota, NuCellSys.

Другие сегменты транспорта - строительная, уборочная техника, легкие самолеты, катера, малые корабли, паромы, и др. – также развиваются, хотя и в меньшей степени.

Из сопоставления прогнозов рыночной доли к 2050 г. и технической готовности в наши дни следует (рис. 29), что уже сейчас хорошие перспективы для роста есть у автобусов, малых грузовиков, легковых машин и погрузочной техники.

Рисунок 29 Прогнозы рыночной доли водородного транспорта в зависимости от технической готовности его сегментов



Источник: анализ А. Глаголевой (Сколтех) по данным Hydrogen Council и Shell

Заправочные станции – базовая инфраструктура для водородного транспорта, без которой он не будет развиваться. В этом смысле ситуация аналогична электротранспорту – с той лишь разницей, что электрозарядки проще разместить в общественных местах,

но время зарядки отличается в десятки раз (водородные электромобили заправляются в течение нескольких минут, а батарейные – от 1-2 на немногочисленных сверхбыстрых зарядках до нескольких часов на быстрых). По состоянию на 2019 г. в мире насчитывается более 300 заправочных станций и 5 тыс. единиц транспорта, работающего на водороде – в первую очередь, в США, Западной Европе, а также Японии. К 2030 г. планируется увеличение числа зарядок примерно на порядок (табл.4). Примерная стоимость одной заправочной станции составляет около 1 млн долл.⁸¹

Таблица 4. Национальные цели по распространению водородных заправок, шт.

	2020	2022	2023	2025	2028	2030
США	80	100				
Калифорния				200		1 000
Япония	160			320		
Франция		100			400-1000	
Китай	100			300		500
Нидерланды	100			400		1000
Корея			310			
Германия			400			

Источники: IEA⁸², H₂Mobility⁸³

Заправочные станции состоят из системы хранения водорода, охлаждения, компрессора и раздаточных устройств заправки автомобилей. Стандарты, по которым проектируются заправочные станции, являются международными, а модульная структура позволяет адаптировать производительность и размер станций под прогнозируемый объем потребления. Важно соблюдать единые стандарты у производителей заправочных станций и водородного транспорта для обеспечения их совместимости.

Как и в других сегментах рынка водородных технологий, в транспорте важна роль практического международного сотрудничества. Например, проект JIVE 2017 года (Joint Initiative for Hydrogen Vehicles Across Europe) подразумевает внедрение более 140 автобусов по 9 выбранным локациям в Европе и спонсируется Евросоюзом в объеме 106 млн евро. Проект решает для выбранного региона проблему «курицы или яйца» - заправочной инфраструктуры или машин. В 2015 году на похожий проект (ZEMOTION) по созданию 21 нового автобуса был выделен 41 млн евро, в 2012 году на демонстрационные проекты (HIGH V.LO-CITY) – 29.2 млн евро. General Motors и Honda вместе работают над уменьшением стоимости машин и инфраструктуры.

⁸¹ Hydrogen: the next wave for electric vehicles? McKinsey & Company. November 2017.

⁸² <https://www.iea.org/tcep/energyintegration/hydrogen/>

⁸³ CEP 2019 <https://cleanenergypartnership.de>

- древесная биомасса перерабатывается, образующиеся в процессе углеводы используются в химии;
- электроэнергия от офшорных ветряных электростанций (ВЭС) преобразуется электролизерами в водород и кислород;
- кислород и водород используются в химии (водород – для производства «зеленого» метанола), а кислород еще и участвует в газификации переработанной биомассы с местных полей площадью более миллиона гектаров;
- газификация биомассы позволяет получить синтетический газ — чистую смесь водорода, CO_2 и CO . Туда же добавляется и «зеленый» водород от ВЭС;
- из синтез-газа получают азотную кислоту, метанол, этилен, пропилен, бутилен — вещества, которые могут полностью вытеснить нефть и природный газ с их устойчивых позиций сырья для химической промышленности;
- синтез-газ можно отправлять на сжижение (био-СПГ), заправлять им автотранспорт и использовать для прочих классических нужд.

Инициаторы проекта заявляют о стремлении приблизить стоимость синтетического газа к стоимости природного. Первоначальные инвестиции в проект — 50 млн. евро, из них 15 млн. евро обеспечиваются грантами Евросоюза.

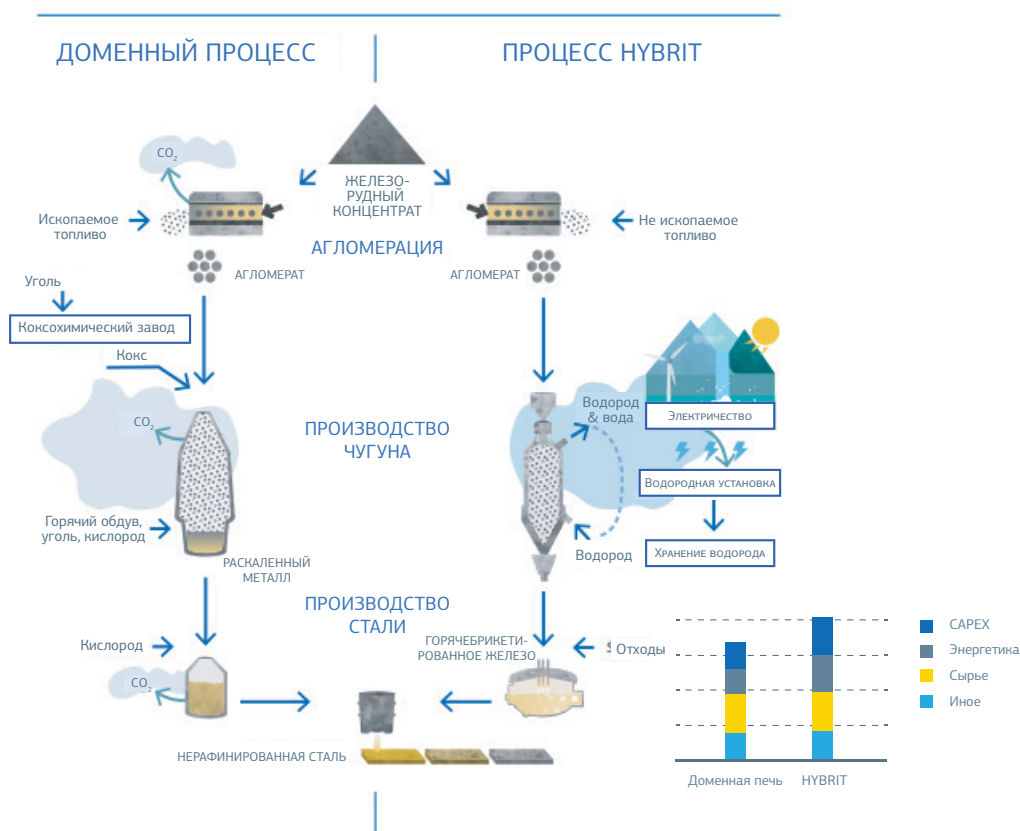
В рамках этой большой концепции компании начинают развивать отдельные проекты. В феврале 2019 года химическая компания Nouryon и газовая Gasunie начали рассматривать проект производства «зеленого» водорода (3 тыс. тонн в год) для химического кластера в г. Делфзейл – в целях производства биометанола. Инвестиционное решение по проекту ожидается в течение 2019 года.⁸⁴

Декарбонизацию в металлургии связывают с переходом на прямое восстановление железа (с отказом от коксохимических и доменных процессов, потребляющих уголь и природный газ). Проект HYBRIT в Швеции посвящен именно этому – причем ключевую роль в новом процессе будет играть водород (рис. 31). В 2018 году началось сооружение пилотной площадки в г. Лулео, а цель проекта – коммерциализировать технологию к 2035 году.

Себестоимость стали по новой технологии, по результатам технико-экономического обоснования, пока выше на 20-30%, чем по традиционной технологии – хотя многое будет определяться динамикой цен на кокс, электроэнергию и CO_2 .

⁸⁴ <https://www.chemport.eu/news/article/green-hydrogen-as-feedstock/>

Рисунок 31 Проект HYBRIT в Швеции: технологическая цепочка и сравнение структуры себестоимости стали по сравнению с обычным методом



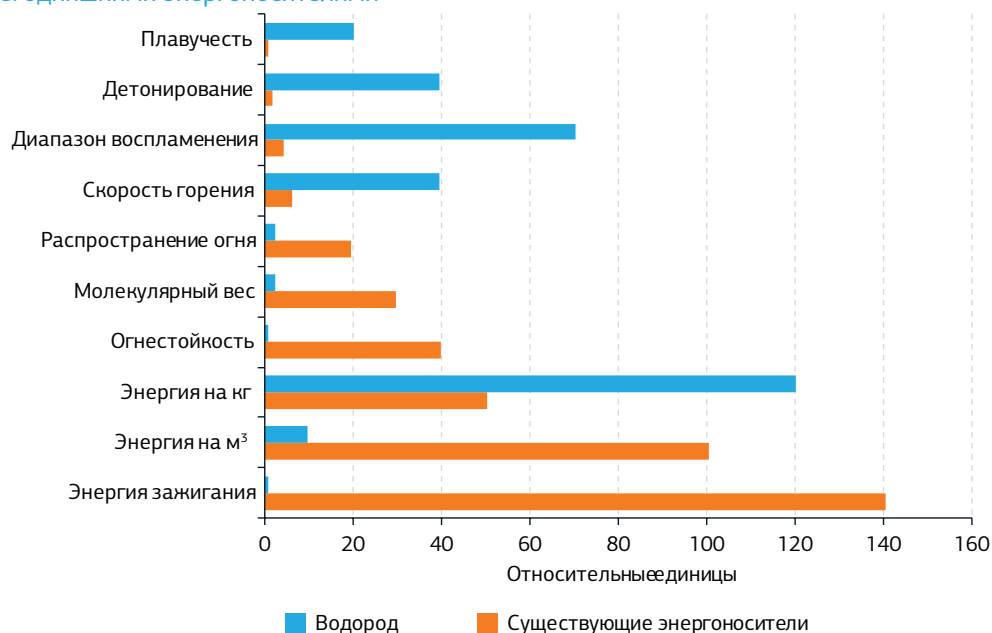
Источник: HYBRIT⁸⁵

Безопасность и техническое регулирование

Безопасность водородных технологий – важная тема для дискуссий в течение многих десятилетий. В публичном пространстве принято вспоминать катастрофу дирижабля Гинденбург в 1937 г. или даже аварию на Чернобыльской АЭС в 1986 г. Со времен первой аварии прошло уже больше 80 лет, количество водородных автобусов уже идет на сотни, водородные заправочные станции располагаются в непосредственной близости от жилых зданий. Чернобыльский реактор, возможно, был разрушен взрывом смеси водорода и кислорода – но смесь эта образовалась из-за целой цепочки ошибочных действий персонала станции и, вероятно, конструктивных особенностей реактора, – вряд ли возможно «винить» водород еще и в этой катастрофе.

Водород используется в промышленности десятилетиями, – возможно, это новый энергоноситель, но точно не новый газ. Его свойства давно и хорошо изучены – они серьезно отличаются и от метана, и от пропана, и от бензина (рис. 32).

⁸⁵ HYBRIT: fossil-free steel. Summary of findings from HYBRIT Pre-Feasibility Study 2016–2017.

Рисунок 32 Характеристики «безопасности» водорода в качественном сравнении с сегодняшними энергоносителями

Источник: John H.S. Lee, McGill University⁸⁶

Водород – менее рискованный энергоноситель с точки зрения пожаробезопасности и термических воздействий, но может быть ответственен за более значительные эффекты, связанные с изменением давления.

От углеводородов водород отличается:

- большими пределами детонационной способности и воспламеняемости;
- низкими значениями энергии зажигания и детонации;
- бесцветным пламенем;
- быстрым рассеиванием, способностью к диффузии.

Ответом на эти вызовы, очевидно, является применение нужных технологий:

- Водород взрывоопасен только в смеси с воздухом в определенных условиях (особенно в закрытых помещениях) – в отличие, например, от ацетилена, взрывоопасного и без воздуха. Бак сжатого водорода не более опасен, чем бак с бензином или керосином – ведь в последний труднее ограничить доступ воздуха (ставший причиной катастрофы рейса TWA800 в 1996 году, унесшей жизни 230 человек);
- Пламя от горения водорода чаще всего невидимо -но для его обнаружения уже используют специальные датчики;
- Охрупчивание металлов из-за диффузии водорода в их структуру действительно может происходить, особенно в местах пластической деформации металлов (вмятинах, трещинах) – поэтому важно корректно подбирать

⁸⁶ John H.S. Lee. The Detonation Phenomenon / Cambridge University Press, 2008. – 402 p.

конструкционные материалы, способные воспринимать нагрузки. К тому же, композиты вообще не восприимчивы к охрупчиванию;

- Водород – всепроникающий газ, он может со временем «просочиться» через любой материал, - но это не означает, что его нельзя хранить: утечки через клапаны хранилищ не имеют практического значения и т.д.

Безопасность водородных технологий – важная составляющая часть национальных водородных программ. Например, в рамках европейской программы FCH JU существует инициатива European Hydrogen Safety Panel. Глобальный характер водородной экономики будущего требует усиления международного сотрудничества – в том числе, гармонизации национальных стандартов по всей технологической цепочке при активном участии поставщиков водорода, оборудования для его производства, хранения, транспортировки, пользователей водорода, независимых экспертов, организаций по надзору за безопасностью продукции и т.д. Поэтому у технического регулирования – ключевая роль в деле обеспечения безопасности водородных технологий.

Стандартизацией на международном уровне занимается профильный комитет ISO - ISO/TC 197⁸⁷.

⁸⁷ <https://www.iso.org/committee/54560.html>

МЕСТО РОССИИ В ГЛОБАЛЬНОЙ ВОДОРОДНОЙ ЭКОНОМИКЕ

Стимулы

Россия пока (за точечными исключениями) остается в стороне от международных сообществ и партнерств, развивающих водородные технологии, хотя университеты и институты РАН имеют значительные взаимосвязи с коллегами во многих странах. В первую очередь, это объясняется тем, что климатическая повестка и декарбонизация пока играют малозначительную роль в энергетической стратегии страны.

Национальное регулирование сферы выбросов парниковых газов находится в стадии формирования, ближайшие акты уровня федерального закона или указа президента ожидаются в 2019-2020 годах, национальная стратегия низкоуглеродного развития находится в разработке. Среди стейкхолдеров пока доминирует осторожное, консервативное отношение как в целом к проблеме антропогенной природы глобального изменения климата, так и к целесообразности России брать на себя серьезные обязательства по сокращению выбросов парниковых газов. Всё это вместе существенно сдерживает развитие не только водородных, но вообще любых низкоуглеродных технологий (возобновляемой энергетики, энергоэффективности, электротранспорта и т.д.).

В России пока отсутствует не только национальная водородная программа, но даже и видимая координация различных исследовательских групп и интересантов. Тем не менее, существуют заделы и научные разработки в сферах производства, хранения и транспортировки водорода, а также его использования на мобильном транспорте. Кроме того, Россия располагает огромным потенциалом для производства водорода и его экспорта в глобальном масштабе. Поэтому о водородных технологиях говорят в положительном ключе как на крупнейших российских форумах⁸⁸, так и в рамках обсуждения инновационных стратегий крупнейших российских компаний. Анализу этих аспектов посвящен настоящий раздел.

Технологии и стейкхолдеры

На стороне **производства**, как и во всем мире, в России существуют отработанные технологии получения «серого» водорода. Они используются на нефте- и газоперерабатывающих заводах (конверсия метана), электростанциях (электролиз) – причем весь производимый водород используется на месте – например, для повышения качества переработки углеводородов или в системах охлаждения генераторов электростанций.

⁸⁸ Президент России В.В. Путин во время Российской энергетической недели 2017: «Мы, безусловно, думаем, и в практическом плане будем реализовывать и проекты водородной энергетики».

Крупнейший производитель электролизеров – ПАО «Уралхиммаш» (г. Екатеринбург) – выпускает установки производительностью от 4 до 300 кубометров водорода в час.

Крупнейшие российские энергетические компании – «Газпром» и «Росатом» – работают над технологиями получения водорода с минимальным углеродным следом – за счет адиабатической конверсии метана⁸⁹ и высокотемпературных атомных реакторов⁹⁰. Технологии находятся в стадии предварительных научных разработок или (в отношении адиабатической конверсии метана) – тестирования на опытной лабораторной установке.

На стадии лабораторного тестирования у российских разработчиков находятся такие технологии, как

- получение водорода окислением алюминия в воде (Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, ОИВТ РАН);
- топливные процессоры для конверсии природного газа и дизельного топлива в обогащенную водородом топливную смесь и выделения из нее чистого водорода (Филиал «Центральный научно-исследовательский институт судовой электротехники и технологии» («ЦНИИ СЭТ») ФГУП «Крыловский государственный научный центр»)⁹¹.

Научными разработками в сфере электролиза занимаются Курчатовский институт и исследовательские центры Российской академии наук, например, Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения РАН.

Сфера **транспорта и хранения** водорода развита в меньшей степени, поскольку он потребляется в месте производства. «Газпром», владелец и оператор газотранспортной системы России, провел исследования, показывающие возможность добавления водорода в транспортируемый природный газ в диапазоне 20-70%⁹² - но реальные эксперименты еще предстоит провести. Научные и опытные разработки в сфере сжижения и транспорта водорода в сжиженном состоянии выполнило НПО «Гелиймаш»⁹³ для космической программы России и ПАО «Криогенмаш»⁹⁴.

⁸⁹ О.Е. Аксютин и др. Вклад газовой отрасли в формирование энергетической модели на основе водорода. / Вести газовой науки – научно-технический сборник. Охрана окружающей среды, энергосбережение и охрана труда в нефтегазовом комплексе. Спецвыпуск – 2017 г., стр. 12.

⁹⁰ Н.Н. Пономарев-Степной и др. Атомный энерготехнологический комплекс с высокотемпературными газоохлаждаемыми реакторами для масштабного экологически чистого производства водорода из воды и природного газа. / Газовая промышленность, №11 – 2018 г.

⁹¹ <http://www.niiset.ru/index.php/vodedprod>

⁹² Blue Fuel - Gazprom Export Global Newsletter / 2018, Issue 48.

⁹³ <http://geliymash.ru/production/vodorodnye-ozhizhiteli/>

⁹⁴ <http://www.cryogenmash.ru/catalog/vodorodnoe-oborudovanie/>

Научные разработки в сфере хранения водорода на основе гидридов металла есть у Института проблем химической физики РАН.

В сфере **использования** водорода несколько исследовательских центров и компаний развивают технологии топливных элементов:

- Институт проблем химической физики РАН (водородно-воздушные топливные элементы с протонообменной мембраной);
- Центр автономной энергетики Московского физико-технического института (твердооксидные топливные элементы);
- Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения академии наук (твердооксидные топливные элементы);
- Топливная компания Росатома «ТВЭЛ» (в том числе «Завод электрохимических преобразователей, НПО «Центротех», Свердловская обл.) – твердооксидные топливные элементы для автономного энергоснабжения удаленных от инфраструктуры объектов.

Электрические автобусы и легковые машины с аккумуляторами (BEV) уже появились в российских городах – но водородный транспорт на топливных элементах пока не получил никакого распространения. Прототипы легкого грузовика «Газель» с двигателями внутреннего сгорания на смеси бензина и водорода (переоборудованные из оригинального бензинового варианта) в 2006 году совершили пробег по маршруту Москва- Нижний Новгород- Казань- Нижнекамск- Чебоксары- Москва – основной целью проекта было привлечение общественного внимания к теме транспорта на водороде.

В 2018 году «Российская венчурная компания», Фонд Сколково и Агентство стратегических инициатив организовали конкурс технологических проектов «Первый элемент», целью которого стало преодоление глобальных технологических барьеров в перспективном сегменте водородной энергетики на топливных элементах российскими учеными, разработчиками и производителями энергетических установок. В рамках конкурса ведется создание двух прототипов энергетических установок на водородных топливных элементах для транспортных средств (небольших воздушных и наземных мощностью около 2 и 50 кВт соответственно), сравнимых по эффективности с традиционными источниками энергии на транспортных средствах. Победители конкурса получают гранты в объеме до 140 млн. рублей (около 2 млн евро)⁹⁵.

В сфере **стандартизации** водородных технологий работает Некоммерческое партнерство «Национальная ассоциация

⁹⁵ <http://1element.upgreat.one>

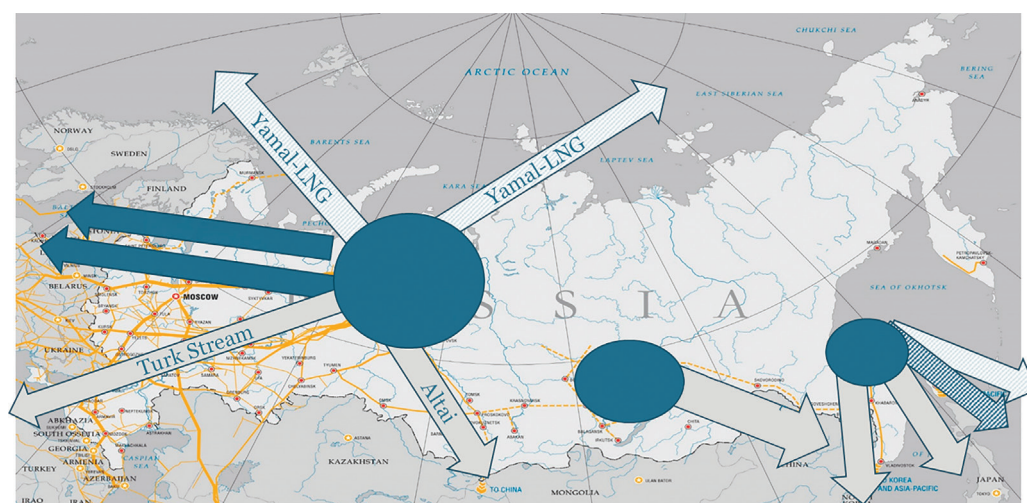
водородной энергетики»⁹⁶ (НАВЭ), силами которой созданы и актуализированы более 20 российских аналогов международных стандартов в области водородных технологий.

Ресурсы

Россия - один из крупнейших в мире поставщиков углеводородов: №2 по экспорту нефти, №1 по экспорту газа и №3 по экспорту угля в мире⁹⁷ и находится в лидерах по их запасам.

Уже имеющаяся газотранспортная инфраструктура (с учетом новых проектов газопроводов) и растущая отрасль сжиженного природного газа (СПГ) создает долгосрочные предпосылки для развития производства «голубого» водорода (рис. 33) с минимальными затратами на сырье и экспорта его трубопроводным транспортом и в сжиженном виде. По оценкам «Газпрома», транспорт водорода по экспортным газопроводам влечет за собой некоторые риски нарушения долгосрочных контрактных обязательств, связанных с качеством газа, а также необходимость дополнительных инвестиций в газотранспортной системе. Поэтому компания рассматривает альтернативу – производство водорода из природного газа уже после транспортировки последнего по магистральной трубе⁹⁸. При этом рынок сбыта произведенного таким образом водорода в Европе, по данным Bloomberg, «Газпром» оценивал в 153 млрд евро к 2050 году.⁹⁹ При этом важно отметить, что хорошие шансы работы на этом рынке будут иметь поставщики «зеленого» или «голубого» водорода – что с учетом имеющихся технологий оставляет одну альтернативу: паровая конверсия метана с CCS.

Рисунок 33 Схема транспортных потоков экспорта природного газа из России



Источники: Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО

⁹⁶ <http://h2org.ru>

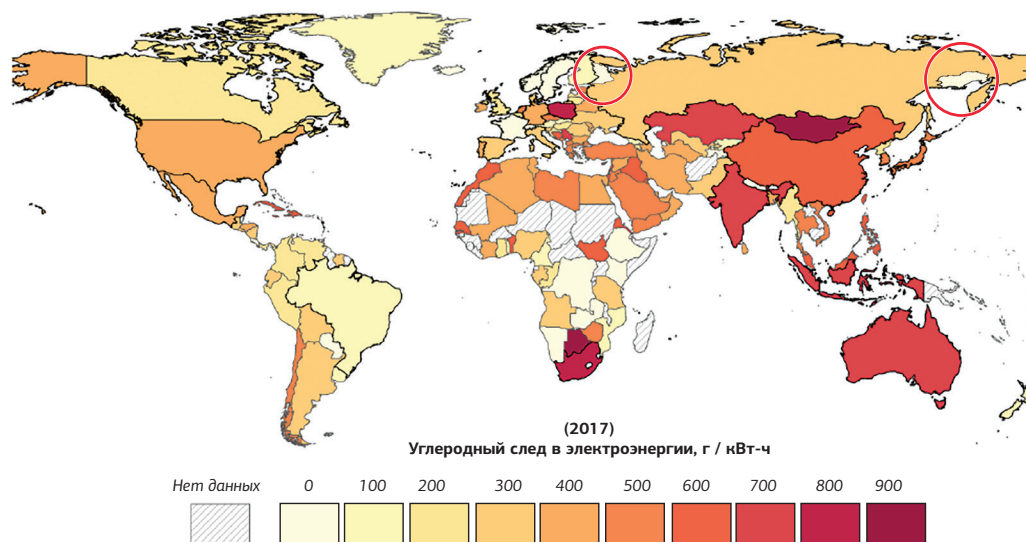
⁹⁷ данные МЭА и ВР за 2017 год.

⁹⁸ General and Contractual Risks of Hydrogen Decarbonization – presentation for EU-Russia Gas Advisory Council’s Work Stream on Internal Market Issues (GAC WS2)/ Gazprom, Brussels, March 2019.

⁹⁹ <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-11-08/russia-looks-to-hydrogen-as-way-to-make-gas-greener-for-europe>

Россия занимает четвертое в мире место по производству электроэнергии, располагая при этом генерацией с одним из самых низких углеродных следов в мире. В структуре генерации доминируют ТЭС на природном газе (около 48%), а АЭС (18%) и ГЭС (17%) превышают долю угольных ТЭС (16%). В результате углеродный след в электроэнергии в России меньше, чем в США, Китае, Австралии, Индии, Японии, Германии и других странах (рис. 34).

Рисунок 34 Углеродный след в электроэнергии в странах мира



Источники: Staffell¹⁰⁰, Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО

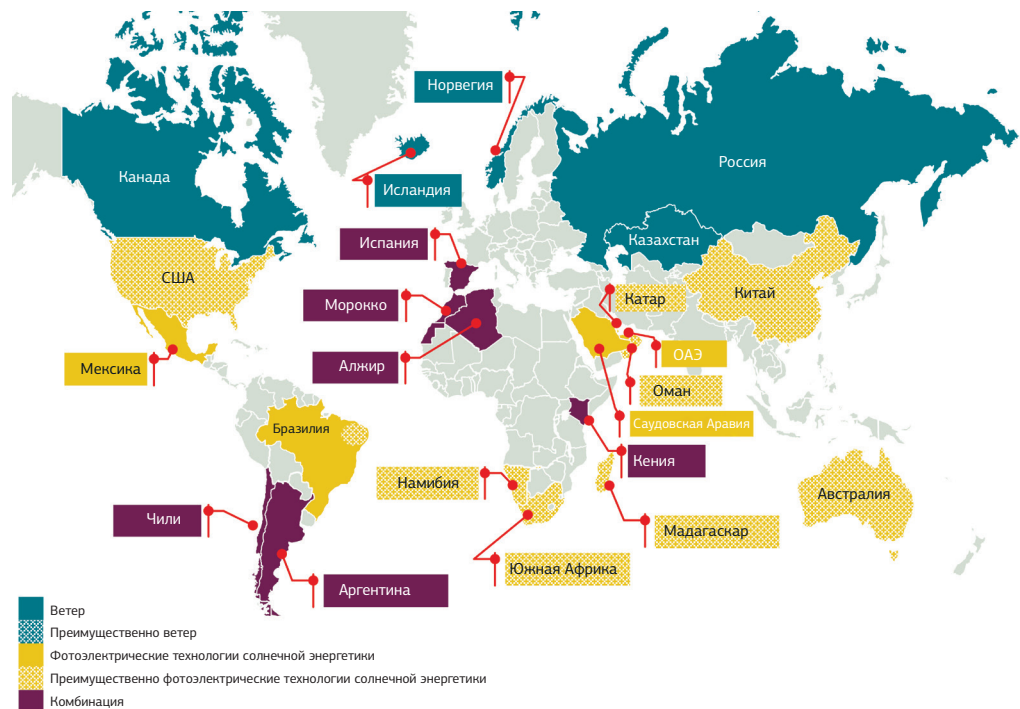
При этом в отдельных российских регионах, например, в Карелии (где доминирует АЭС) или в Магаданской области (где доминирует ГЭС), углеродный след в несколько раз меньше среднероссийского.

Это открывает возможности для производства водорода с помощью электролиза с использованием электроэнергии из энергосистемы региона – при этом водород будет фактически «зеленым» даже без развития солнечной и ветряной энергетики. Это привлекает интерес международных игроков: так, по соглашению, подписанному на Восточном экономическом форуме осенью 2017 года, Kawasaki Heavy Industries должна актуализировать технико-экономическое обоснование проекта экспорта водорода, произведенного в Магаданской области, в Японию. Этот проект пока не получил развития, но по мере развития инфраструктуры на Дальнем Востоке и удешевления технологий электролиза и логистики водорода интерес к подобным инициативам, очевидно, будет только расти. С другой стороны, их развитию мешает несовершенство нормативной базы, в том числе «зеленых сертификатов» в электроэнергетике.

¹⁰⁰ I. Staffell, M. Jansen, A. Chase, E. Cotton and C. Lewis (2018). Energy Revolution: Global Outlook. Drax: Selby.

Еще большие возможности открываются перед Россией в случае реализации потенциала возобновляемой энергетики - в первую очередь, ветряной. Хотя доля ветроэнергетики в энергобалансе России в ближайшие годы будет несущественной (менее 1%), общий потенциал этого сектора в стране оценивается в 17,1 тыс. ТВт·ч¹⁰¹, что в 16 раз превышает общий объем генерации в России в 2018 году. Именно поэтому в исследованиях глобального потенциала технологии power-to-x Россию относят к «скрытым чемпионам» (рис. 35), в которых огромный потенциал сочетается с отсутствием интереса к нему со стороны государства и стейкхолдеров.

Рисунок 35 Крупнейшие по потенциалу страны-поставщики энергоресурсов по схеме PtX



Источник: Frontier Economics¹⁰²

Внутренний спрос на водород

Пока декарбонизация не стала мейнстримом в российской энергетической политике, драйвером для развития спроса на водород может выступать **транспортный сектор**. В крупных российских городах автотранспорт является основным загрязнителем воздуха оксидами азота, серы, бенз(а)пиреном и другими опасными веществами – поэтому города начинают всерьез рассматривать электротранспорт как решение экологических проблем. Так, Москва до конца 2019 года закупит 300 электробусов и планирует покупать ежегодно столько же до 2021 года, после чего это количество может возрасти.

¹⁰¹ Обзор российского ветроэнергетического рынка за 2018 год / Российская ассоциация ветроиндустрии (РАВИ), март 2019 г.

¹⁰² International aspects of a Power-to-X roadmap. A report prepared for the World Energy Council Germany / Frontier Economics Ltd, October 2018

Водородный электротранспорт (FCEV) может быть предпочтительнее аккумуляторного (BEV) в российских условиях, поскольку в этом случае исключается негативное влияние низких температур наружного воздуха на запас хода. Кроме того, в России есть компании, университеты и исследовательские центры, которые занимаются технологиями топливных элементов и системами хранения водорода (к сожалению, системы хранения электроэнергии для электробусов пока закупаются в Китае). Например, в 2015 году проект создания пилотной водородной заправочной станции и автобусного маршрута был предложен для Екатеринбурга - учитывая близость города к основным разработчикам технологий¹⁰³.

Второе возможное направление – **автономная энергетика** на базе топливных элементов для труднодоступных объектов: вышек сотовой связи, оборудования, которое обслуживает магистральные газопроводы и нефтепроводы, удаленных поселков и т.д. Как и в других странах, это направление локально может первоначально развиваться с использованием технологий ТЭ и природного газа (при его наличии).

Конкурентоспособность водородных технологий по сравнению с газомоторным транспортом, аккумуляторными электромобилями, ветряными или солнечными электростанциями, электростанциями на СПГ или сжиженных углеводородных газах – предмет анализа в каждом конкретном случае, с учетом возможных изменений в стратегии низкоуглеродного развития России.

Российская водородная программа как ответ на глобальные вызовы

Проведенный выше качественный анализ показывает, что водородные технологии в глобальном масштабе неизбежно будут развиваться – в первую очередь потому, что без них невозможно достичь целей по борьбе с глобальным изменением климата, которые уже поставили перед собой правительства многих десятков государств.

В России есть не только огромные неиспользованные ресурсы для встраивания в новый глобальный рынок, но и собственные теоретические технологические разработки (правда, пока далекие от коммерциализации) и перспективный внутренний спрос.

Зародившийся мировой водородный рынок, очевидно, будет конкурировать с рынками углеводородов, на которых позиции России кажутся сейчас незыблемыми – и в этом смысле стратегия игнорирования или даже борьбы с новым может казаться привлекательной в краткосрочной перспективе. Но в долгосрочной перспективе такая стратегия создаст риски замедления темпов роста национальной экономики – не только из-за падения

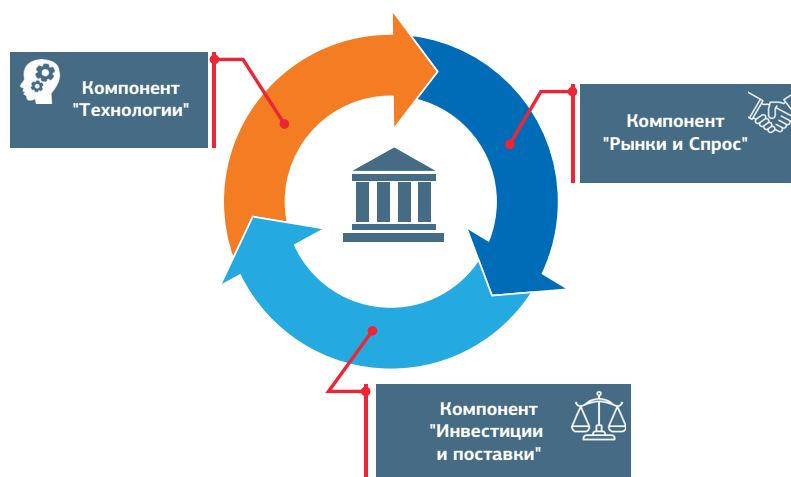
¹⁰³ <http://h2org.ru/images/stories/rauvtek2015.pdf>

спроса на углеводороды, но и в связи с торможением развития инновационного сектора в промышленности.

Ответом на эти глобальные вызовы может стать встраивание водородных технологий в российскую энергетическую стратегию и стратегию низкоуглеродного развития – или принятие отдельной национальной водородной программы.

Frontier Economics выделяет три основных столпа, на которых может устойчиво развиваться глобальный водородный рынок (рис. 36). Эти принципы могут быть полезны и при формировании российской национальной водородной программы.

Рисунок 36 Три основания для глобального водородного рынка



Источник: Frontier Economics¹⁰⁴

Во-первых, важно обеспечить **технологическое развитие** – освоение и снижение стоимости всех элементов цепочек монетизации «зеленого» водорода, а также дополняющих технологий – улавливания и хранения CO₂, паровой конверсии метана и т.д.

Во-вторых, необходима **поддержка рынка и устойчивого спроса** на водород – прежде всего, для потребителей, которые заинтересованы покупать «зеленый» водород и его производные.

В-третьих, ключом к успеху является **привлечение международных инвестиций**, создание механизмов компенсации коммерческих, валютных, межкультурных и страновых рисков.

Российская программа, базируясь на этих трех столпах, может также включать следующие элементы:

- **Развитие пилотных проектов по экспорту водорода:**
 - ◊ Экспорт водорода в Японию, Европу
 - ◊ Запуск международных проектов с участием России

¹⁰⁴ International aspects of a Power-to-X roadmap. A report prepared for the World Energy Council Germany / Frontier Economics Ltd, October 2018

- **Развитие водородных кластеров на внутреннем рынке:**
 - ◊ создание нескольких опорных «водородных кластеров» - с ориентацией на рынки сбыта и центры компетенций, - Москва, Санкт-Петербург, Новосибирск, Красноярск, Екатеринбург и др.
- **Развитие водородных фундаментальных и прикладных исследований:**
 - ◊ инвентаризация имеющихся заделов и координация НИОКР
 - ◊ специализация на тех сферах, в которых у России уже есть разработки, и на тех, которым уделяется меньше внимания в других национальных программах;
 - ◊ концентрация на рынках будущего и избежание «изобретения велосипеда» - на основе предварительного анализа статуса водородных технологий и прогноза по их развитию за рубежом;
- **Образование в области водородных технологий**
- **Популяризация**
- **Стандартизация и сертификация**
- **Государственная координация:**
 - ◊ управление и координация на высоком политическом уровне, ведущая роль федерального министерства (с созданием отдельного департамента внутри министерства энергетики);
 - ◊ ключевые показатели эффективности по переделам и годам реализации программы с механизмами их корректировки;
 - ◊ создание единой информационной платформы;
 - ◊ создание системы мер стимулирования крупного и малого бизнеса (налоги, льготы, заказы) и локализации технологий.
- **Международное сотрудничество:**
 - ◊ Технологические партнерства
 - ◊ Вхождение в международные водородные организации и платформы.

Определение позиции государства по этому вопросу во многом определит отношение к нему крупных компаний, многие из которых уже имеют планы и разработки в области водородных технологий, но пока не отдают им приоритета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Balcombe et al. (2018). The carbon credentials of hydrogen gas networks and supply chains, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118302983>.
2. Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues. Technical Report / National Renewable Energy Laboratory, March 2013.
3. Blue Fuel - Gazprom Export Global Newsletter / 2018, Issue 48.
4. Brief Overview. Industrialisation of water electrolysis in Germany: Opportunities and challenges for sustainable hydrogen for transport, electricity and heat / National Organisation Hydrogen and Fuel Cell Technology – NOW GmbH. Berlin, October 2018
5. Carbon Capture and Storage Institute. The CCS Global Status report 2018.
6. Case Study Report: Hydrogen Society (Japan) / Ville Valovirta, Joint Institute for Innovation Policy for the European Commission. February 2018.
7. Challenges for Japan's Energy Transition. Basic Hydrogen Strategy / Agency for Natural Resources and Energy (ANRE), Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). October 2018, Japan.
8. Costs of Making Hydrogen Available in Supply Systems Based on Renewables / T. Grube, B.Hohlein // *Hydrogen and Fuel Cells*. Springer, 2016.
9. Dena. Powerfuels: A missing link to a successful global energy transition. Berlin, April 2019.
10. E4Tech. The Fuel Cell Industry Review 2018 / December 2018.
11. Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Kadner, S., Minx, J. C., Brunner, S., ... Zwickel, T. (2014). Technical Summary. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
12. Energy of the future? Sustainable mobility through Fuel Cells and H₂. Shell Hydrogen Study. Hamburg, 2017
13. EU EDGAR Database (Joint Research Centre (European Commission), 2018.
14. Fuel Cells and Hydrogen for Green Energy in European Cities and Regions. A Study for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking / Roland Berger, October 2018.

15. Gas for Climate. The optimal role for gas in a net-zero emissions energy system / Navigant Netherlands B.V., reviewed by Kees van der Leun and Prof. Dr. Kornelis Blok. March 2019.
16. General and Contractual Risks of Hydrogen Decarbonization – presentation for EU-Russia Gas Advisory Council’s Work Stream on Internal Market Issues (GAC WS2)/ Gazprom, Brussels, March 2019.
17. H₂ at Scale: Deeply Decarbonizing our Energy System / DOE, April 2016.
18. H21 North of England Report 2018 / D. Sandler, H. Anderson. – November 2018, 544 p.
19. How hydrogen empowers the energy transition / Hydrogen Council, McKinsey. January 2017
20. HYBRIT: fossil-free steel. Summary of findings from HYBRIT Pre-Feasibility Study 2016–2017.
21. Hydrogen and Fuel Cells Technology Roadmap / IEA, 2015.
22. Hydrogen as an energy carrier. An evaluation of emerging hydrogen value chains / DNV GL, 2018.
23. Hydrogen in a low-carbon economy / UK Committee on Climate Change, November 2018.
24. Hydrogen scaling up: A sustainable pathway for the global energy transition / Hydrogen Council, November 2017.
25. Hydrogen Supply and Demand: Past, Present, and Future / D. Brown (NREL). GasWorld, April 2016.
26. Hydrogen: Current Use and Future Development / DECHEMA, IEA Hydrogen Workshop, February 2019.
27. Hydrogen: the next wave for electric vehicles? McKinsey & Company. November 2017.
28. IEA World Energy Investments 2018
29. IEA World Energy Investments 2019
30. IEA. World Energy Outlook 2018.
31. IEAGHG, “Techno-Economic Evaluation of SMR Based Standalone (Merchant) Plant with CCS”, 2017/02, February, 2017
32. International aspects of a Power-to-X roadmap. A report prepared for the World Energy Council Germany / Frontier Economics Ltd, October 2018
33. Introduction to hydrogen and its properties / H. Idriss, M. Scott, V. Subramani // Compendium of Hydrogen Energy

34. Introduction to hydrogen production / R.Navarro, R. Guil, J.Fierro // Compendium of Hydrogen Energy. Volume 1: Hydrogen Production and Purification. Ed. by V. Subramani, A. Basile and T. N. Veziroglu. - Woodhead Publishing, 2015.
35. IRENA (2018), Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition. / International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
36. Jadun, Paige, Colin McMillan, Daniel Steinberg, Matteo Muratori, Laura Vimmerstedt, and Trieu Mai. Electrification Futures Study: End-Use Electric Technology Cost and Performance Projections through 2050. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2019.
37. John H.S. Lee. The Detonation Phenomenon / Cambridge University Press, 2008. – 402 p.
38. Low-carbon cars in Europe: A socioeconomic assessment / Cambridge Econometrics, July 2018.
39. N.Stetson, S. McWhorter, C.Ahn (DOE, SRNL, CIT). Introduction to hydrogen storage / Compendium of Hydrogen Energy. Volume 2: Hydrogen Storage, Distribution and Infrastructure. Edited by R. Gupta, A. Basile and T. Veziroglu - Woodhead Publishing, 2016.
40. Navigant Research. Stationary Fuel Cells / 3Q 2016.
41. New Energy Outlook 2017. / Bloomberg New Energy Finance.
42. Opportunities for Australia from Hydrogen Exports, ACIL Allen Consulting for ARENA, August 2018.
43. Power-Industry Transition, Here and Now: Wind and Solar Won't Break the Grid: Nine Case Studies / G. Wynn, Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA). USA, 2018.
44. Shell Hydrogen Study. Energy of the future? Sustainable Mobility through Fuel Cells and H₂ / Shell Deutschland Oil GmbH, Wuppertal Institut, 2017.
45. Shell Scenarios. Sky: The Emergence of a Hydrogen Economy / David Hone, Chief Climate Change Advisor, Shell International Ltd., November 2018.
46. Staffell, M. Jansen, A. Chase, E. Cotton and C. Lewis (2018). Energy Revolution: Global Outlook. Drax: Selby.
47. Study on hydrogen from renewable resources in the EU / Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), July 2015.
48. Volume 1: Hydrogen Production and Purification. Edited by V. Subramani, A. Basile and T. N. Veziroglu. - Woodhead Publishing, 2015.

49. World Bank and Ecofys. 2018. “State and Trends of Carbon Pricing 2018 (May)”, by World Bank, Washington, DC.
50. ГОСТ Р 56276-2014/ISO/TS 14067:2013. Национальный стандарт Российской Федерации. Газы парниковые. Углеродный след продукции. Требования и руководящие указания по количественному определению и предоставлению информации.
51. Н.Н. Пономарев-Степной и др. Атомный энерготехнологический комплекс с высокотемпературными газоохлаждаемыми реакторами для масштабного экологически чистого производства водорода из воды и природного газа. / Газовая промышленность, №11 – 2018 г.
52. О.Е. Аксютин и др. Вклад газовой отрасли в формирование энергетической модели на основе водорода. / Вести газовой науки – научно-технический сборник. Охрана окружающей среды, энергосбережение и охрана труда в нефтегазовом комплексе. Спецвыпуск – 2017 г., стр. 12.
53. Обзор российского ветроэнергетического рынка за 2018 год / Российская ассоциация ветроиндустрии (РАВИ), март 2019 г.
54. Перспективы России на глобальном рынке водородного топлива. экспертно-аналитический доклад. / Инфраструктурный центр Energy Net. МОСКВА, 2018.
55. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина. ИНЭИ РАН–Московская школа управления СКОЛКОВО – Москва, 2019.
56. Распределенная энергетика в России: потенциал развития / Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО и др. // февраль 2018 г.
57. Юлкин М.А. Низкоуглеродное развитие: от теории к практике / М. А. Юлкин. – М., 2018. – 80 с.

Авторские права и предупреждение об ограниченной ответственности

Авторские права на все материалы, опубликованные в данном исследовании, за исключением особо оговоренных случаев, принадлежат Центру энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО. Незаконное копирование и распространение информации, защищенной авторским правом, преследуется по Закону. Все материалы, представленные в настоящем документе, носят исключительно информационный характер и являются исключительно частным суждением авторов и не могут рассматриваться как предложение или рекомендация к совершению каких-либо действий. Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО не несет ответственности за любые потери, убытки либо другие неблагоприятные последствия, произошедшие в результате использования информации, содержащейся в настоящей публикации, за прямой или косвенный ущерб, наступивший вследствие использования данной информации, а также за достоверность информации, полученной из внешних источников. Любое использование материалов публикации допускается только при оформлении надлежащей ссылки на данную публикацию.

©2019 Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО. Все права защищены.



СКОЛКОВО
Московская школа управления

Московская школа управления СКОЛКОВО — одна из ведущих частных бизнес-школ России и СНГ, основанная в 2006 году по инициативе делового сообщества. В состав партнеров-учредителей школы входят 10 российских и международных компаний и 11 частных лиц, лидеров российского бизнеса. Линейка образовательных продуктов Московской школы управления СКОЛКОВО включает программы для бизнеса на всех стадиях его развития – от стартапа до крупной корпорации, выходящей на международные рынки.

Все образовательные программы бизнес-школы построены по принципу «обучение через действие» и включают в себя теоретические блоки, практические задания, проектную работу и международные модули. С 2006 года бизнес-школа СКОЛКОВО проводит корпоративные программы, направленные на развитие индивидуальных управленческих компетенций и решение бизнес-задач компаний. В 2008 году состоялся запуск программы СКОЛКОВО Executive MBA для руководителей высшего звена и собственников бизнеса. В 2009 году стартовала программа СКОЛКОВО MBA. В 2012 году запущена Стартуп Академия СКОЛКОВО – программа для молодых предпринимателей. В июне 2013 года была открыта программа для руководителей среднего бизнеса – СКОЛКОВО Практикум для директоров.

Бизнес-школа СКОЛКОВО также является центром экспертизы и притяжения для тех, кто делает ставку на Россию и работу на рынках с быстро меняющейся экономикой. В бизнес-школе работают пять исследовательских центров, которые занимаются изучением наиболее актуальных проблем различных отраслей, осуществляют консалтинговые услуги, предлагают образовательные программы, а также способствуют формированию образовательной повестки школы в целом.

Московская школа управления СКОЛКОВО
Новая ул., д.100, Сколково, Одинцовский район,
Московская область, Россия, 143025
Тел.: +7 495 539 30 03
Факс: +7 495 994 46 68
E-mail: Info@skolkovo.ru
Website: www.skolkovo.ru

Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО фокусируется на исследованиях и распространении знаний в сфере энергетики, организации энергетического диалога между российскими и зарубежными органами власти, лидерами энергетического бизнеса и экспертного сообщества, а также на разработке рекомендаций для сбалансированной государственной политики в энергетическом секторе развивающихся стран.

Партнеры Центра – ведущие российские и международные нефтегазовые, угольные и теплоэнергетические компании. Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО также сотрудничает с мировыми энергетическими центрами экспертизы, такими как: Международное Энергетическое Агентство, Oxford Institute for Energy Studies (OIES), King`s Abdulla Petroleum Research Center (KAPSARC), Center for Global Energy Policy (University of Columbia), Energy Academy Europe (EAE), University of Singapore, Institute of Energy Economics of Japan (IEE) и другими.

