



Информационно-
аналитический
бюллетень
ПАО «Мосэнерго»

ЭНЕРГЕТИКА ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ



Выпуск № 2 / 2023

ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА:
ЗА И ПРОТИВ

УДК 620.9:502/504
ББК 31+20.1
Э 40

Издание выходит с 2022 года

Главный редактор академик РАН **А.В. Клименко**

Э 40

Экология, энергетика, энергосбережение : бюллетень /
под редакцией академика РАН А.В. Клименко. — Москва :
ПАО «Мосэнерго», 2023. —

ISBN 978-5-383-01681-7

Вып. 2. Водородная энергетика: за и против / [В.А. Кулагин,
Д.А. Грушевенко]. — 2023. — 36 с.

ISBN 978-5-383-01683-1

Выпуск посвящен проблематике развития водородной энергетики. Определена текущая роль водорода в энергосистемах, выявлены перспективные направления использования водорода в секторах конечного потребления энергии и в тепло- и электроэнергетике. Проведен сравнительный анализ основных способов производства водорода (конверсия углеводородных газов, газификация угля, электролиз воды). Проанализированы основные способы транспортировки и хранения водорода. Сформированы логистические цепочки поставки водорода для различных групп потребителей. Проведен анализ конкурентоспособности водорода с альтернативными решениями по энергоснабжению в секторах потребления. Выявлены возможные регуляторные механизмы, способные стимулировать или, напротив, ограничить потребление водорода в зависимости от источника его происхождения.

**УДК 620.9:502/504
ББК 31+20.1**

ISBN 978-5-383-01683-1 (вып. 2)
ISBN 978-5-383-01681-7

© ПАО «Мосэнерго», 2023
© Кулагин В.А., Грушевенко Д.А., 2023

ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: ЗА И ПРОТИВ

СОДЕРЖАНИЕ

Введение. От XVIII века до наших дней	3
1. Место водорода в энергетике	7
2. Технологии производства водорода	11
3. Технологии транспортировки и хранения водорода	17
4. Экономика производственно-сбытовых цепочек водорода и конкурентоспособность	25
5. Экологические ограничения. «Цвета» водорода	33
Заключение	35

ОБ АВТОРАХ



КУЛАГИН
Вячеслав Александрович
Заведующий отделом исследования
энергетического комплекса мира
и России ИНЭИ РАН р



ГРУШЕВЕНКО
Дмитрий Александрович
Старший научный сотрудник ИНЭИ РАН



К 2023 г. БОЛЕЕ 30 ГОСУДАРСТВ ПРИНЯЛИ
НАЦИОНАЛЬНЫЕ ПРОГРАММЫ ПО РАЗВИТИЮ
ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Введение

От XVIII века до наших дней

Водород — самый распространенный химический элемент на Земле. Человечеству он известен очень давно, выделение водорода в лабораторных условиях с обнаружением его горючих свойств относится к XVIII в. В 1833 г. наука представила человечеству способ получения водорода из воды с использованием электроэнергии — был открыт метод электролиза. Позже в ряде стран стали проводиться работы, связанные с использованием водорода в качестве топлива, исследовались возможности перевода двигателей внутреннего сгорания на водород, а также электрохимические устройства, получающие электроэнергию из водорода без процесса горения.

В первой половине XX в. исследования в области водородной энергетики велись коллективами ученых в СССР, Германии, Англии, США. Успешно водород стали применять в качестве несущего газа для дирижаблей, использовавшихся в военных целях во время Первой мировой войны и в пассажирских перевозках на большие расстояния, в том числе для трансатлантических полетов. Во время Второй мировой войны водород использовали не только для заправки дирижаблей, но и в качестве топлива в автомобильных двигателях внутреннего сгорания. В частности, в условиях сильнейшего дефицита горюче-смазочных материалов, в блокадном Ленинграде на водородное топливо было переведено порядка 500 автомобилей, также применялись автодрезины, работающие на водороде. В послевоенный период водород на транспорте не пользовался большой популярностью. Мировой рынок энергоносителей для автомобильных моторов и судовых энергетических установок завоевали более дешевые нефтяные топлива, а дирижабли на водороде и гелии уступили место самолетам.

Новая страница истории водородной энергетики связана с нефтяным кризисом начала 70-х гг. XX в. Работа велась по двум основным направлениям:

- исследование возможностей применения водорода в качестве замены нефти, которая на тот период являлась основным энергоносителем;
- оценка способа повышения маневренности атомных электростанций (АЭС) с использованием водорода.

Стимулами к развертыванию научных исследований по использованию водорода как энергоносителя стали, с одной стороны, острая нехватка нефтепродуктов в США и Европе из-за эмбарго на поставки со стороны ближневосточных стран и ставшая популярной на тот момент теория скорого «пика» нефти, газа и угля, с другой — вышедшая на общемировой уровень климатическая и экологическая повестка, продиктованная высокой степенью загрязнения воздуха, особенно в крупных городских агломерациях, и увеличением содержания в воздухе газов, вызывающих парниковый эффект. Именно это время можно охарактеризовать



периодом становления водородной энергетики как научно-технического направления, изучающего проблемы получения, хранения, транспортировки и использования водорода. Очевидные на первый взгляд преимущества водорода, а именно его практически неисчерпаемый запас в природе и минимальное количество вредных выбросов в процессе использования, стали стимулами для его продвижения в качестве главной альтернативы нефтяным топливам на транспорте. Однако окончание нефтяных кризисов в конце 1980-х гг. и установление цен нефти на десятилетний период (1990-е гг.) на достаточно низком уровне снова дестимулировали проработку вопросов масштабного применения водорода на транспорте.

Исследования конца 1970-х гг. были направлены преимущественно на разработку водородных технологий как способа хранения электрической энергии, вырабатываемой на АЭС. Топливные ячейки рассматривались как основной способ аккумулирования энергии, вырабатываемой АЭС, в периоды низкого спроса, что позволило бы обеспечить маневренность атомных станций. Однако для большинства стран мира низкая доля АЭС в энергобалансе не являлась критичной, балансирование системы происходило благодаря использованию других источников генерации. А те страны, где вопрос стоял достаточно остро, например Франция, Япония и США, сделали ставку на строительство гидроаккумулирующих электростанций, которые были более конкурентоспособны по себестоимости.

Несмотря на то что масштабное использование водорода в качестве энергоносителя на протяжении всей истории человечества сталкивалось с определенными трудностями и водородные решения все время проигрывали альтернативам, использование водорода в нефтегазопереработке (гидрокрекинг и гидроочистка) и химии (производство аммиака, азотных удобрений) оказалось привлекательным и еще в 1970-х гг. достигло миллионов тонн.

В 2000-х гг. активное развитие установок на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ, например ветровая и солнечная энергия), характеризующихся высокой стохастичностью выработки, вновь остро поставило вопрос балансировки нагрузки сетей. Параллельно во многих

странах и на международном уровне низкоуглеродная повестка вошла в состав ключевых приоритетов развития. Ученые и представители бизнеса в очередной раз задумались о возможностях использования водорода для решения поставленных задач.

Электроэнергия, полученная из ВИЭ (в периоды низкого спроса или на полном цикле работы), стала рассматриваться как источник производства так называемого «зеленого» водорода (о том, какого «цвета» может быть водород, см. раздел «Экологические ограничения»). Одновременно с этим высокие цены на нефть в конце первой — начале второй декады XXI в. подталкивали к поиску альтернативы традиционным нефтепродуктам в транспортном секторе. Большая часть автопроизводителей сосредоточилась на разработке электромобилей, но отдельные автоконцерны возобновили поиск приемлемых «водородных» решений. Дополнительным стимулом для роста интереса к водородной повестке стал энергетический кризис в Европе в 2022 г. В планах по преодолению самого кризиса и его последствий в ЕС роли водорода уделяется отдельное внимание.

К 2023 г. более 30 государств приняли национальные программы по развитию водородной энергетики, 145 международных корпораций, включая крупнейших игроков энергетического сектора (BP, Shell, Chevron, Total), автопрома (Honda, Daimler, Kawasaki, Hyundai, Toyota), промышленности и машиностроения (Siemens, Liebherr, Honeywell), стали членами международного Водородного совета. Крупные международные экспертные организации в области энергетики — International Energy Agency (IEA), International Renewable Energy Agency (IRENA) — в своих исследованиях прогнозируют, что в ближайшие 20—30 лет объемы потребления водорода вырастут в несколько раз, в первую очередь именно из-за его энергетического использования.

В октябре 2020 г. Правительством России был утвержден план мероприятий «Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года», в августе 2021 г. утверждена Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации, которая определяет цели, задачи, стратегические инициативы и меры, направленные на развитие водородной энергетики в стра-

не, на среднесрочный период до 2024 года, долгосрочный период до 2035 года и ориентиры на перспективу до 2050 года. Стратегической целью в Концепции названа реализация имеющегося потенциала нашей страны в области производства, экспорта, использования водорода и промышленной продукции для водородной энергетики, а также превращение Российской Федерации в одного из мировых лидеров по их производству и экспорту. Достижение целей предполагается достичь посредством запуска пилотных проектов по производству и использованию водорода, создания консорциумов, формирования инфраструктуры для его хранения и транспортировки. Концепция рассчитана на три этапа. На первом этапе продолжительностью 3,5 года предусматривается создание водородных кластеров и реализация пилотных проектов по производству и экспорту водорода до 0,2 млн т к 2024 г. Определены три территориальных кластера: северо-западный, восточный и арктический (возможно формирование четвертого — на юге страны), а также меры государственной поддержки. На втором этапе (2025—2035 гг.) ожидается реализация первых коммерческих проектов по производству водорода и рост его экспортных объемов до 2 млн т (по оптимистичному сценарию — 12 млн т) в 2035 г. На третьем этапе (2036—2050 гг.) ожидаются широкое промышленное использование водорода на внутреннем рынке и выход РФ в лидеры по его мировому экспорту (15 млн т к 2050 г., при оптимистичном сценарии — 50 млн т).

Направление «Водородная энергетика» с 2018 г. определено в качестве приоритетного направления научно-технологического развития Госкорпорации «Росатом». В ближайшее время компания планирует испытать пилотную установку по производству водорода на АЭС и в качестве одного из партнеров принять участие в строительстве полигона по отработке технологий внедрения водорода на железнодорожном транспорте. На Восточном экономическом форуме в 2019 г. Росатом, РЖД, администрация Сахалинской области и Трансмашхолдинг договорились о реализации пилотного проекта по запуску на Сахалине пассажирских поездов, работающих на водороде. Для реализации проекта должны быть решены технические вопросы получения водорода на Сахалине, его транспортировки, заправки и обслуживания поездов. Однако действие междуна-

родных санкций и выход из проекта французской Air Liquide привели к разрыву логистических цепочек и нарушению поставок, что, по некоторым оценкам, увеличит стоимость создания рельсового водородного подвижного состава примерно на 20—25 %. Сроки реализации проекта уже перенесены на 2025 г.

В декабре 2021 г. в рамках Соглашения между ПАО «Газпром» и Правительством Российской Федерации согласована и подписана «дорожная карта» по развитию водородной энергетики и декарбонизации промышленности и транспорта на основе природного газа. Документ предполагает развитие конкурентоспособных отечественных технологий производства водорода из природного газа, его хранения, транспортировки и применения, масштабирование перспективных технологий и запуск пилотных проектов. В рамках Восточного экономического форума — 2021 ПАО «Газпром», Сахалинская область и Госкорпорация «Росатом» заключили соглашение о сотрудничестве в реализации проекта строительства в Сахалинской области завода по производству водорода из природного газа методом паровой конверсии метана с улавливанием углекислого газа.

В 2021 г. ПАО «НОВАТЭК» объявил о нескольких инициативах в области водорода: строительстве Обского ГХК с производством аммиака и водорода, соглашениях об экспорте «аммиака как носителя водорода» с немецкой компанией Uniper, запуске совместного производства водорода с Северсталью, производстве водорода с TotalEnergies. Но уже в 2022 г. эти планы пришлось пересматривать и откладывать из-за проблем с развитием сотрудничества с европейскими партнерами.

Растущий интерес к водороду, особенно в контексте глобальных усилий по декарбонизации и переходу к низкоуглеродному развитию мировой энергетики, отражен в документах стратегического планирования значительного числа стран мира, в том числе и России, которые ставят задачи более пристального рассмотрения существующих технологий производства, хранения и транспортировки водорода, оценки потенциальных секторов и объемов потребления, конкурентоспособности водорода в сравнении с другими источниками энергии.



ИМЕЮЩИЕСЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЗВОЛЯЮТ
ВЫДЕЛИТЬ ЦЕЛЫЙ РЯД ПОТЕНЦИАЛЬНО
ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ВОДОРОДА

1 Место водорода в энергетике



Современный уровень технологического развития человечества позволяет производить водород множеством различных способов. На практике для его производства, как целевого продукта, чаще применяется высокотемпературная конверсия углеводородных газов, парокислородная конверсия угля или электролиз воды. Достаточно большие объемы водорода и водородсодержащего газа производятся каталитическим риформингом бензинов на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ), однако водород является лишь побочным продуктом этого процесса и, как правило, за пределы НПЗ не выходит, а сразу подается на соседние установки для осуществления гидрогенизационных процессов (гидроочистка, гидрообессеривание, гидрокрекинг).

В настоящее время роль водорода как энергоносителя весьма незначительна, точные оценки столь малы, что не отображаются в мировых энергетических балансах. Относительно слабо развиты и водородные системы хранения. Практически весь объем современного мирового потребления водорода (94 млн т в 2021 г.) приходится на его сырьевое использование.

По данным на 2019 г. ведущее место в общемировом потреблении водорода (до 47 %) занимает нефтегазовый сектор: водород применяется в процессах гидроочистки и гидрокрекинга нефтяных фракций, каталитического риформинга и в нефтехимическом синтезе. Вторым по объемам потребления сектором является нефтехимия и химическая промышленность, где водород необходим главным образом при производстве аммиака и метанола, альдегидов и кетонов, спиртов, соляной кислоты, полиэтиленовых и пропиленовых пленок высокой прочности. В металлургии водород используют в процессах прямого восстановления металлов. Эти отрасли, лидируя по доле в совокупном потреблении водорода, обеспечивают основной прирост мирового спроса на него (рис. 1). Кроме того, он находит применение в металлообработке, обработке стекла и кварца, в электронной, пищевой и фармацевтической промышленности и пр. Учитывая растущую потребность мировой экономики в продукции химического синтеза и магистральное направление на декарбонизацию металлургии, в частности, за счет перехода от термических процессов получения стали к прямому восстановлению железа, будет сохраняться рост спроса на водород как на сырье.

Несмотря на то что в современных энергетических системах водород практически не используется, уже имеющиеся технологии позволяют выделить целый ряд потенциально перспективных направлений его энергетического применения:

1. Место водорода в энергетике

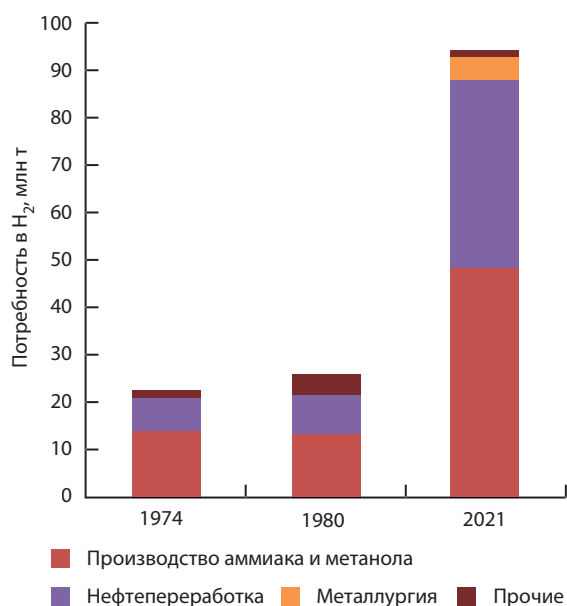


Рис. 1.
Спрос на водород по секторам потребления^{1, 2}

1. В транспортном секторе:

- в *дорожном транспорте*. Собственные технологии водородных силовых установок с топливными элементами имеют крупные японские концерны Toyota и Honda, которые выпускают серийные образцы водородных автомобилей, активно ведутся аналогичные разработки немецкими концернами Audi, BMW, американскими Ford и Daimler. Существуют технологии использования водорода в традиционных двигателях внутреннего сгорания, однако они значительно менее популярны у автопроизводителей;

- в *авиации*. Эксперименты с водородными силовыми установками проводились еще в 1980-х гг.: например, в 1988 г. в СССР в небо поднялся самолет ТУ-155 с водородной силовой

установкой на борту. Жидкий водород использовался в качестве топлива в космических программах по запуску Shuttle и «Бурана». Несмотря на это, в современных реалиях применение водорода в чистом виде сопряжено с рядом технологических сложностей. В первую очередь это связано с большой материалоемкостью водородных хранилищ. Водородные баки занимают значительное пространство фюзеляжа, тем самым снижая полезный объем для перевозимого груза. Разработки водородных самолетов не останавливаются в ряде стран мира, но в перспективе до 2050 г. Международная ассоциация гражданской авиации (ИКАО) делает ставку на так называемые синтетические устойчивые топлива (SAF), к которым относятся в том числе и топлива, производимые смешением экологически чистого водорода и CO₂;

- на *морском транспорте*. Исследования водородных силовых установок в данном сегменте пока находятся в зачаточном состоянии. Даже единственный в мире танкер, осуществляющий трансконтинентальную перевозку жидкого водорода (Suiso Frontier), использует для движения дизельные силовые установки. Однако водородсодержащая продукция — аммиак и метанол — может потребляться даже в имеющихся двигателях без их значительной доработки и считается перспективным направлением развития водородной энергетики.

2. В электро- и теплоэнергетике:

- при производстве электроэнергии на топливных элементах;

- при производстве тепловой и электрической энергии на ТЭЦ по двум направлениям:

- в смеси с метаном для повышения эффективности сгорания газа и, как следствие, для повышения КПД станций (подобные исследования активно проводятся во всем мире, включая Россию);

- самостоятельно (в виде водорода). Пилотные проекты таких станций запускались в Японии, Германии, Норвегии. Однако, как признают сами компании, реализовывавшие эти проекты (Siemens Energy, Equinor, SSE, Mitsubishi), они оказались нерентабельными и по затратам, и по сво-

¹ Введение в водородную энергетику / Э.Э. Шпильрайн, С.П. Малышенко, Г.Г. Кулешов; под ред. В.А. Легасова. М.: Энергоатомиздат, 1984. 264 с.

² Neil Ford. Nuclear hydrogen economics could favor small modular designs [Electronic resource]. URL: <https://analysis.nuclearenergyinsider.com/nuclear-hydrogen-economics-could-favor-small-modular-designs>

ей энергетической эффективности. Так, если израсходовать 10 кВт·ч электрической энергии на производство водорода, а потом сжечь его для получения электрической энергии, то получим всего около 4 кВт·ч¹. Но проектные решения продолжают дорабатываться;

- для накопления энергии. В основном рассматривается использование водорода в сочетании с ВИЭ или атомной энергией для решения проблемы балансировки нагрузки. Избы-

точные объемы произведенной энергии можно использовать для того, чтобы посредством электролиза получать водород, который будет выполнять роль хранилища энергии и в периоды ее дефицита станет сырьем для электростанций;

- в коммунально-бытовом секторе теоретически могут применяться маломощные водородные установки на топливных элементах самостоятельно или в сочетании с водородными накопителями;

- в промышленном секторе вместо традиционных энергоносителей может использоваться водород как источник энергии для последующих ее преобразований.

¹ L. Collins. Why hydrogen-fired power plants 'will play a major role in the energy transition' [Electronic resource], URL: <https://www.rechargenews.com/energy-transition/why-hydrogen-fired-power-plants-will-play-a-major-role-in-the-energy-transition/2-1-1045768>





НАИБОЛЕЕ ШИРОКО РАСПРОСТРАНЕНО
ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДА ПАРОВОЙ
КОНВЕРСИЕЙ МЕТАНА

2 Технологии производства водорода



В настоящее время существует множество технологий получения водорода. Рассмотрим три самых распространенных способа производства водорода в промышленных масштабах.

1. Высокотемпературная конверсия углеводородных газов считается наиболее экономически выгодной. Технология получения водорода из метана, этана, пропана и бутана широко применяется на нефтеперерабатывающих, газоперерабатывающих и нефтехимических предприятиях. На крупнотоннажных установках при высоких и сверхвысоких температурах углеводородное сырье смешивается с перегретым водяным паром, в результате чего происходит расщепление углеводородов на углекислоту и водород. Данная технология является наиболее отработанным и самым дешевым способом производства водорода, хотя, важно оговориться, себестоимость производства водорода критично зависит от стоимости исходного сырья. Наиболее широко распространено получение водорода паровой конверсией метана (ПКМ).

2. Парокислородная конверсия угля: способ основывается на производстве синтетических газов процессом Фишера—Тропша, известным с 20-х гг. прошлого века. Он занимает второе место по объему производимого водорода в мире. Углеродсодержащее сырье при температурах более 800 °С и давлении свыше 4 МПа смешивается с перегретым водяным паром, в результате образуется водород и оксид углерода. При относительной дешевизне этот способ производства водорода считается самым неэкологичным из-за высокой энергоемкости, а также из-за высокого уровня выхода углеродистых соединений, загрязняющих окружающую среду.

3. Электролиз воды — способ расщепления воды на водород и кислород с помощью постоянного электрического тока, значительно менее распространенный, чем первые два. Формально, это единственный способ получения экологически чистого водорода без сопутствующих выбросов (в том случае, если исходная электрическая энергия произведена на безуглеродной станции), но одновременно самый дорогой из масштабированных до промышленного уровня процессов его получения. Себестоимость водорода зависит от стоимости исходной используемой электроэнергии и затрат на использование электролизера, которые в значительной степени зависят от динамики его загрузки.

Кроме традиционного низкотемпературного электролитического метода получения водорода из воды активно исследуются также другие способы, перспективность которых связывают с электроэнергетикой:

- электрохимический — электролиз растворов кислот и щелочей. В настоящее время метод является даже более электроемким, чем обычный электролиз. Однако он вызывает интерес, вследствие того что помимо водорода в процессе образуются достаточно ценные продукты, в частности тяжелая вода;

- **термохимический** — разложение водяного пара на водород и кислород без электроэнергии при очень высоких температурах (около 3000 °С) или при более низких (от 800 до 1000 °С) в процессе последовательного проведения каскада химических реакций. Не в последнюю очередь интерес к этим процессам объясняется потенциальной возможностью использовать для их осуществления теплоту высокотемпературного ядерного реактора, исключая стадию электролиза. Однако для таких установок не до конца решена проблема наличия материалов, способных выдержать высокие температуры;

- **термоэлектролитический** — еще один потенциальный метод получения водорода, но уже из водяного пара на АЭС. Предполагается, что часть водорода можно производить, используя энергию перегретого пара, часть — путем электролиза, на который расходуется электроэнергия, произведенная на АЭС. Тем самым повышается привлекательность электролиза по показателю энергоэффективности, однако не решена проблема отсутствия материалов. Для электродов предлагается использовать довольно дорогие оксиды лантана, стронция и кобальта, в качестве электролита — огнеупорный диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия.

Однако эти способы, как и многие другие, пока недостаточно исследованы и далеки от масштабного внедрения в промышленность, поэтому на данном этапе целесообразно более детально рассмотреть вопросы экономичности трех основных масштабно применяемых процессов.

Доминирование технологии производства водорода, получаемого конверсией углеводородных газов, обусловлено широким распространением установок риформинга на нефтеперерабатывающих заводах, используемых для производства высококачественных компонентов бензинов и ароматических соединений. Водород, получаемый риформингом, фактически является побочным продуктом, который, как правило, сразу включают в производственный цикл и подают в качестве технологического сырья для применения в гидропроцессах на тех же НПЗ или на связанных с ними химических комплексах.

Многолетняя отработка технологий конверсии углеводородных газов сначала в нефтяной, а затем и в газовой промышленности создала задел, благодаря которому сегодня водород, производимый на установках паровой конверсии метана (ПКМ), является одним из самых дешевых, хотя затраты сильно зависят от стоимости входящего сырья (рис. 2).

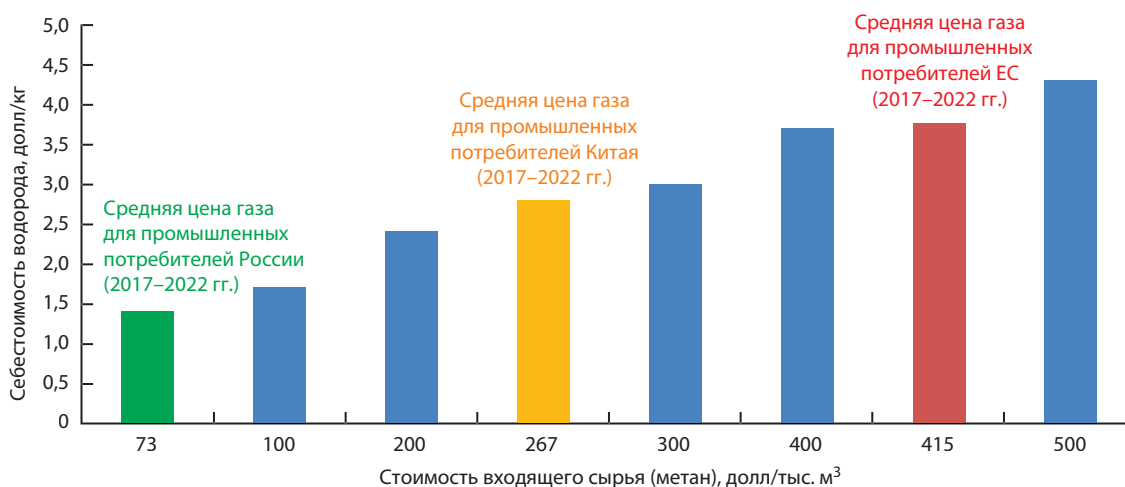


Рис. 2.
Себестоимость производства водорода методом ПКМ в зависимости от цены исходного сырья (метана)

Средние затраты на производство водорода из угля в Китае путем получения и последующего разделения синтез-газа (страна лидирует по объемам производства этим методом) оцениваются в 0,9—1,46 долл/кг без улавливания CO₂, получаемого в процессе, и в 1,44—2,11 долл/кг с улавливанием.

При получении водорода посредством электролиза воды на экономичность процесса оказывают влияние стоимость исходной электроэнергии, а также динамика загрузки мощностей самого электролизера. Такой способ производства водорода рассматривается как наиболее целесообразный

при использовании избыточных объемов электроэнергии, генерируемой ВИЭ или АЭС. В этом случае водород выполняет роль хранилища энергии, он используется в период ее дефицита.

Выработка электроэнергии из возобновляемых источников сопряжена с независимыми от человека естественно изменяющимися природными условиями (ветер или безветрие, высокая солнечная активность или пасмурная погода, сезонность и пр.). В одних случаях производятся избыточные объемы электроэнергии, а в других — возникают провалы в производстве. Причем часто именно в пиковые часы спроса, например в вечернее

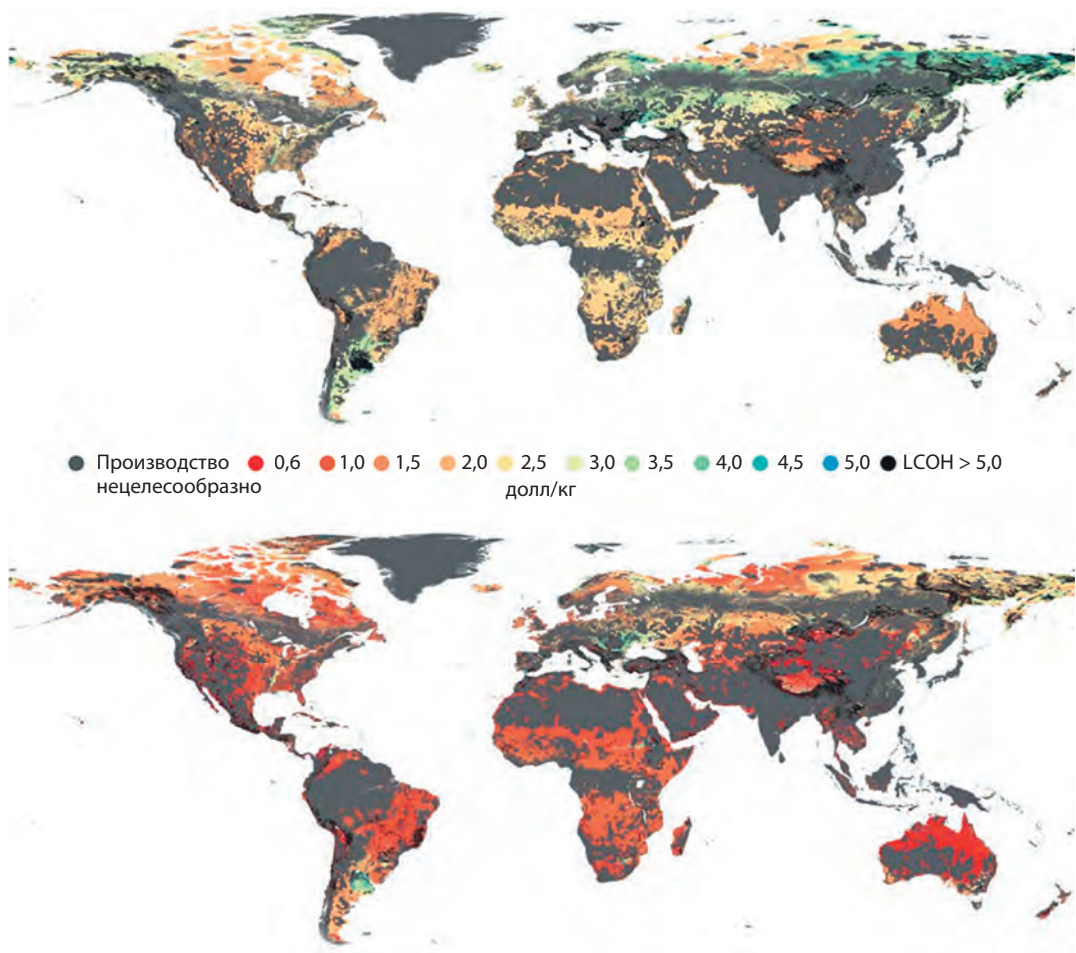


Рис. 3.
Прогноз стоимости производства водорода, долл/кг, с использованием энергии солнечных и ветровых электростанций (наземных и шельфовых) в 2030 г. (вверху) и в 2050 г. (внизу): LCON — нормированная стоимость производства

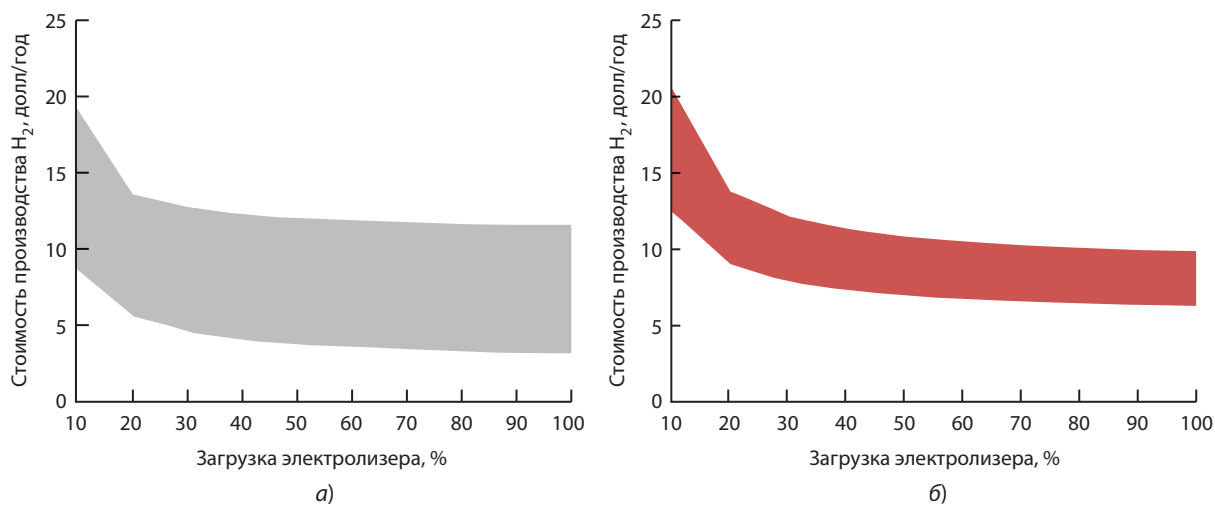


Рис. 4.

Изменение среднемировой нормированной стоимости производства водорода с помощью электроэнергии, сгенерированной на ВЭС (а) и АЭС (б), в зависимости от степени загрузки электролизера

время, выработка энергии на отдельных видах ВИЭ ограничена. В таких условиях невозможно достичь 100%-ной загрузки электролизера. А при снижении его загрузки до 10 % удельные затраты на производство каждого килограмма водорода могут возрасти в 1,5—3 раза. Также необходимо учитывать высокую вариативность затрат на производство энергии, вырабатываемой на возобновляемых источниках, в зависимости от страны, что связано с различиями в природных условиях, а именно с интенсивностью солнечного излучения, силой ветра, сезонными изменениями и другими факторами. В настоящее время полная себестоимость производства водорода с помощью ВИЭ находится в диапазоне 3,3—19,1 долл/кг в зависимости от географической локации, используемого оборудования, динамики загрузки оборудования и его стоимости. В перспективе, по оценкам IRENA, в отдельных регионах по мере удешевления технологий затраты могут составить менее 3 долл/кг (см. рис. 3)¹.

Водород на АЭС может быть произведен по себестоимости от 6 до 20 долл/кг. Работа

атомных станций имеет высокую стабильность выработки энергии, водород в данной ситуации способен прийти на помощь в решении проблемы балансировки нагрузки при провалах спроса.

Однако важно понимать, что в случае с АЭС также не достигается 100%-ная загрузка электролизера, что тоже увеличивает удельные затраты при производстве водорода. На рис. 4 показано, как влияет уровень загрузки электролизера на стоимость полученного водорода. Диапазон стоимости при конкретной загрузке электролизера обусловлен как стоимостью самого электролизера (от 800 до 1800 долл/кВт мощности), так и нормированной (выровненной) стоимостью электроэнергии (LCOE — *Levelised Cost of Energy*), расходуемой на электролиз. Учитывая большой разброс в исходном LCOE себестоимости, у ветровой электростанции (ВЭС) формируется более широкий диапазон нормированной себестоимости производства водорода, чем у АЭС.

Таким образом, итоговая себестоимость водорода зависит не только от эффективности технологических решений и затрат на создание и эксплуатацию производящих его установок, но и от следующих факторов:

¹ IRENA (2022), Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part I — Trade outlook for 2050 and way forward, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

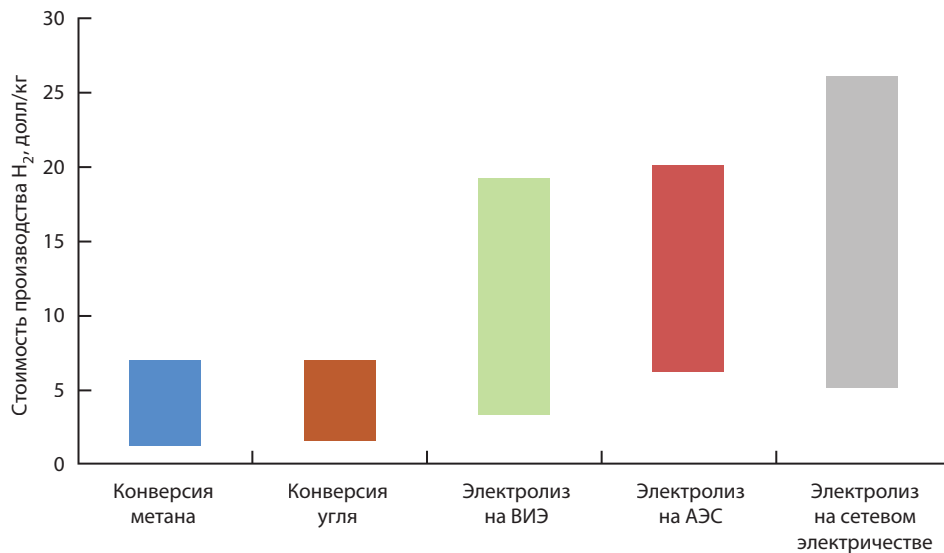


Рис. 5.
Диапазоны затрат в мире на производство водорода различными способами

- при его производстве из углеводородных газов или твердого сырья — от стоимости исходного сырья;
- при его производстве методами электролиза — от стоимости электрической энергии, динамики загрузки и стоимости электролизера.

Всего в мире по состоянию на 2022 г. (рис. 5) затраты на производство водорода оцениваются в диапазоне от 1 долл/кг (из ископаемых топлив) до 19 долл/кг (если водород производится при низкой загрузке электролизера с использованием сетевого электричества в развитых странах — импортерах энергоносителей).





ЛЮБОЙ СПОСОБ ТРАНСПОРТИРОВКИ
И ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА ТРЕБУЕТ ОСОБОГО
ВНИМАНИЯ К ТРЕБОВАНИЯМ БЕЗОПАСНОСТИ

3 Технологии транспортировки и хранения водорода



На конечную стоимость водорода у потребителя, помимо факторов, определяющих производственные затраты, влияет и то, в каком виде будет храниться водород и какой будет выбран метод его транспортировки до потребителя (если это необходимо). Не стоит забывать, что любой способ транспортировки и хранения водорода требует особого внимания к требованиям безопасности. При контакте с воздухом он образует взрывоопасную смесь — гремучий газ и поэтому относится к числу веществ, имеющих высокий класс опасности.

Способы хранения и транспортировки водорода можно разделить на физические и химические. К физическим способам относятся хранение и транспортировка чистого водорода в газообразном или жидком виде. Характерной особенностью химических способов является связывание водорода с другими соединениями с образованием металлогидридов и неметаллических гидридов, хранение в структуре клатратных гидратов. Условно к транспортировке водорода химическими способами также может быть отнесено его перемещение в виде органических соединений: метано-водородной смеси, метанола и аммиака — с последующим выделением водорода у потребителя. Рассмотрим эти способы подробнее.

Физические способы

Газообразный вид. Технологии транспортировки водорода в газообразном виде не допускают его взаимодействия с окружающей средой и предполагают использование узкоспециализированных трубопроводов или специальных газгольдеров и баллонов, в которых он находится в сжатом состоянии.

Водородопроводы. Учитывая способность водорода охрупчивать металлы, к водородопроводам выдвигаются особые требования по материалам. Несколько водородопроводов в мире уже построены и действуют в Нидерландах, США и Великобритании. Объявлено о планах строительства и в нескольких других странах. По оценкам Международного энергетического агентства (МЭА), самое рациональное техническое решение — это водородопроводы диаметром 20 и 48 дюймов, позволяющие в зависимости от мощности компрессоров транспортировать 50—130 тыс. т и 630—1900 тыс. т водорода в год соответственно. По оценкам IRENA, капитальные затраты на строительство 20-дюймовых газопроводов составляют от 600 до 1600 тыс. долл/км, на строительство 40-дюймовых — от 1500 до 4400 тыс. долл/км.

Водородопроводы также должны отвечать повышенным требованиям безопасности: например, для предотвращения утечек и выбросов водорода в окружающую

среду необходима установка высокочувствительной автоматики и большого количества запорной арматуры и клапанов, способных отсечь подачу водорода на коротких участках трубы. Особую опасность водородопроводы представляют как объекты критической инфраструктуры, которые могут быть поражены в результате терактов или в период военных действий.

Баллоны с компримированным водородом. Самый традиционный способ транспортировки газообразного водорода, широко применяемый во всем мире при поставках небольшими партиями, — использование специальных баллонов с многослойными утолщенными стенками. В емкостях со сжатым водородом должно поддерживаться давление от 3,5 до 35 МПа и температура от –40 до +40 °С. Вмещающие от 100 до 700 кг водорода контейнеры транспортируют автомобильным или железнодорожным транспортом. Такой способ имеет высокую материалоемкость (на каждый килограмм транспортируемого водорода приходится порядка 20 кг материала, из которого изготовлен баллон), что делает крайне высокими удельные затраты на транспортировку таким методом. Перевозку баллонов с водородом осуществляют при обязательном наличии внутри контейнера распорок и специальной обвязки, что необходимо из соображений безопасности, контейнеры специальным образом маркируются.

Департамент энергетики США оценивает стоимость транспортировки автомобильным транспортом 1 кг водорода в газообразном состоянии на расстояние в 100 км в 3—5 долл., по железной дороге — 2,1—2,4 долл. Установка по декомпрессии водорода дополнительно увеличивает стоимость поставки на 0,4—0,8 долл/кг.

Жидкий водород. Транспортировка жидкого водорода имеет технологические сложности, поскольку в таком состоянии он остается в узком температурном диапазоне от точки кипения — 20,4 К (–252,75 °С) до точки замерзания — 13,96 К (–259,19 °С), но это позволяет в 4—5 раз снизить массу материала резервуара для транспортируемого водорода по сравнению с перевозкой в газовых баллонах. Потери водорода при транспортировке в криогенных цистернах из-за несовершенства теплоизоляции составляют примерно

0,5 % в сутки от объема транспортируемого водорода. Кроме того, до 15 % теряется при однократном захлаживании криогенной емкости.

Департаментом энергетики США затраты на сжижение водорода оцениваются в 2,75 долл/кг, затраты на регазификацию жидкого водорода — в 0,39 долл/кг. На короткие расстояния жидкий водород перевозится в специально оборудованных автоцистернах или железнодорожным транспортом. Затраты на такую транспортировку сопоставимы с баллонной.

Для морской транспортировки жидкого водорода на большие расстояния используются криотанкеры, первый из которых, Suiso Frontie, уже выполняет рейсы из Австралии в Японию. Стоимость фрахта уже существующего водородного танкера участниками проекта не раскрывается, а диапазон оценок стоимости транспортировки в будущем находится в чрезвычайно широком диапазоне: по оценке Еврокомиссии, стоимость перевозки на каждые 100 км составит от 0,012 до 0,07 долл/кг водорода, IEA — 0,04 долл/кг водорода, IRENA — 0,06 долл/кг водорода.

Транспортировка водорода в жидком виде позволяет снизить риски взрыво- и пожароопасности при перевозках. Однако, учитывая чрезвычайно низкую температуру, при которой транспортируется водород в криобаках, имеются угрозы холодового поражения.

Химические способы

В жидком аммиаке. Водород может транспортироваться в смеси с азотом (аммиак) с последующим выделением непосредственно у грузополучателя. Стоимость «погружения» водорода в аммиак составляет от 0,2 до 2,1 евро/кг водорода^{1, 2}. Показатель высокочувствителен к исходной стоимости азота, применяемой конкретной технологии, тоннажа установки, расходов на за-

¹ J. Collis, R. Schomacker. Determining the Production and Transport Cost for H₂ on a Global Scale // Energy Res., 27 May 2022.

² European Union, 2021 — JRC124206 Assessment of Hydrogen Delivery Options [Electronic resource]. URL: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/system/files/2021-06/jrc124206_assessment_of_hydrogen_delivery_options.pdf

холаживание. Последующее выделение водорода — от 1,2 до 2 евро/кг. Аммиак перевозится по морю узкоспециализированными танкерами-химовозами, стоимость фрахта которых составляет около 40 тыс. долл/день. В среднем такой танкер вмещает 200 тыс. т продукта или, в пересчете на чистый водород, 35,3 тыс. т водорода. Технология уже отработана, такие суда используются. Среди химических способов транспортировки водорода этот, наравне с транспортировкой в углеводородах, можно считать самым отработанным.

Важно помнить, что сам по себе жидкий аммиак также является опасным веществом: вызывает сильные ожоги при попадании на кожу, легко воспламеняется при наличии открытого источника огня, может взрываться при нагревании емкости, токсичен при вдыхании.

В углеводородах. Водород может быть транспортирован в структуре углеводородов специализированным автотранспортом, железнодорожными цистернами или нефтяными танкерами. Как правило, в англоязычной литературе для описания этого метода транспортировки используется аббревиатура LOHC (*liquid organic hydrogen carrier* — жидкий органический носитель водорода). Под транспортировкой в LOHC понимается целая цепочка: гидрирование углеводородов под давлением при низкой температуре с выделением тепла, перевозка получившейся смеси и ее дегидрирование у получателя. Для этого процесса требуются значительные объемы тепла, при этом образуются сопутствующие выбросы. Очевидные плюсы технологии: LOHC могут поставляться по нефтепроводам, обычными нефтяными танкерами и химовозами, а также авто- и железнодорожным транспортом. Минусы: на стороне грузополучателя требуется наличие высокотехнологичного оборудования для выделения водорода и образуются вредные выбросы. В качестве перспективных «органических контейнеров» для водорода рассматриваются этилкарбазол, метилциклогексан, дибензилтолуол, бензилтолуол, нафталин, тетрагидрофуран, муравьиная кислота, бензол, толуол, метанол. Стоимость производства «органических контейнеров» в зависимости от сложности гидрирования и стоимости исходного гидрируемого вещества варьируется в диапазоне от 0,3 долл/кг (для метанола) до 44 долл/кг для N-этилкарбазола. Стоимость «погружения» во-

дород в такие контейнеры невысока — меньше 0,5 долл/кг, а вот стоимость «изъятия» колеблется от 0,6 до 4 долл/кг¹. Учитывая, что перевозка может осуществляться обычным нефтеналивом, она недорога относительно всех других способов.

По безопасности такой способ транспортировки сравним с привычной перевозкой бензина или дизельного топлива.

В метано-водородной смеси. Обычные газопроводы могут быть использованы для транспортировки водорода, но в смеси с природным газом, чтобы минимизировать негативное воздействие на металл газопровода и опасность взрыва. На входе в трубопровод смесь должна быть обогащена водородом. На выходе из системы газопроводов требуется обратное выделение водорода для дальнейшего его использования потребителем, кроме случаев использования там, где возможно сжигание метано-водородной смеси (МВС), в частности на электростанциях. Добавление водорода ведет к росту энергопотребления компрессоров из-за меньшей, чем у метана, плотности перекачиваемой смеси. Как результат, растут операционные затраты на перекачку. Тем не менее, если рассматривать МВС как способ транспортировки непосредственно водорода, себестоимость транспортировки составит около 0,1 долл/кг на 100 км при 30%-ном объемном содержании водорода в МВС (рассчитано исходя из средней стоимости транспортировки природного газа 2 долл/тыс. м³ на 100 км с учетом изменения плотности транспортируемой газовой смеси и затрат при добавлении водорода в метан).

В металлгидриде. Хранение и транспортировка водорода в виде металлгидридов — еще одна довольно изученная, но не применяемая широко на практике технология, при которой атомы водорода встраиваются в кристаллическую решетку металлов, как правило магния, натрия, лития, лантана, титана и пр. Данный способ транспортировки в целом не высокзатратный в силу значительно меньшей материалоемкости контейнеров по сравнению с резервуарами для

¹ Assessment of Hydrogen Delivery Options [Electronic resource] // European Union, 2021 — JRC124206. URL: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/system/files/2021-06/jrc124206_assessment_of_hydrogen_delivery_options.pdf

жидкого водорода и существенно меньшими затратами на создание гидридных соединений, чем на сжижение водорода. Массовая доля водорода в весе гидридной установки составляет примерно 5—10 %. Выделение чистого водорода из гидрида происходит в процессе термической диссоциации — химической реакции обратимого разложения вещества, вызываемой повышением температуры. Основными составляющими затрат при хранении водорода в виде металлгидридов являются стоимость непосредственно используемого металла и обеспечения температуры диссоциации. Например, гидрид магния при относительной дешевизне металла имеет высокую температуру диссоциации, а именно 560—570 K (286,85—296,85 °C). Значительно более дорогой гидрид ванадия хорошо отпускает водород уже при температуре 270 K (−3,15 °C). Некоторые гидриды отдают водород при нагреве до 100 °C. Исследуются возможности использования для транспортировки водорода наноструктурированных гидридов — гранулированных гидридных соединений, которые позволяют еще больше снизить материалоемкость процесса. Стоимость создания гидридных соединений колеблется около 1 долл/кг, транспортировка автомобильным или железнодорожным транспортом оценивается в диапазоне от 1,5 до 2 долл/кг, что на 10—30 % дешевле транспортировки водорода в баллонах. Способ транспортировки и хранения водорода в форме металлгидридов достаточно безопасный, поскольку при нормальных условиях водород не выделяется из соединений, а следовательно, не взрывоопасен. Наиболее значительным преимуществом гидридного способа хранения водорода в сравнении с физическими методами является относительно небольшой объем резервуара и широкий диапазон температуры диссоциации. Эти свойства еще на рубеже XX и XXI вв. взяли на вооружение компании Тойота и GM: водород подавался непосредственно в силовой агрегат автомобиля, в качестве топливных баков использовались гидридные установки. Широкого распространения данная технология, однако, не получила из-за значительной массы металлических установок, уступающих по весу баллонам с сжиженным водородом.

Клатратные гидраты. Еще один химический способ хранения водорода — в структуре клатратных гидратов. Клатратные гидраты — это со-

единения включения, где молекула вещества-«гостя» (в данном контексте — водорода) включена в полость (полиэдрические пустоты) кристаллической решетки, состоящей из молекул «хозяина» (воды). Клатратные гидраты обладают способностью аккумулировать большие объемы газа и этим интересны в аспекте хранения и транспортировки водорода. Однако хранение чисто водородных гидратов возможно только при очень высоком давлении — свыше 100 МПа, при уменьшении которого они теряют свою стабильность, и пониженной температуре (обычно 0—5 °C). Решение данной проблемы возможно посредством получения двойных клатратных гидратов, содержащих молекулы двух «гостей», например водорода и метана, что значительно повышает стабильность соединения. Недостатком этого решения является существенное уменьшение емкости гидрата по водороду, поскольку часть полости занята сопутствующим вспомогательным компонентом. Кроме того, вследствие многократного использования сопутствующего компонента он должен производиться без больших затрат и в достаточном объеме. Существенным недостатком использования двойных клатратных гидратов является то, что в процессе их распада образуются оксиды углерода.

Подземное хранение водорода. Отрабатываются варианты подземного хранения водорода в соляных кавернах, однако есть ряд проблем, требующих дальнейшего исследования, в частности: необходимость применения специфических материалов из-за высокой агрессивности к металлам как самого водорода, так и его соединений с подземными водами и солями, не до конца изучено и взаимодействие водорода с минералами пород, из которых состоит каверна.

Конкурентоспособность различных способов транспортировки водорода

Приведенные оценки позволяют выявить набор решений по транспортировке водорода для разных потребителей.

Для розничных потребителей с небольшими непостоянными объемами спроса (до 45 тыс. т

водорода в год) и расстоянием от источника поставок водорода менее 70 км, не подключенных к водородным сетям, подойдут баллоны. Но очень велика зависимость затрат на транспортировку от пройденного расстояния, особенно с учетом того, что перевозка осуществляется узкоспециализированными малотоннажными колесными транспортными средствами.

Для стационарных потребителей (групп потребителей) выбор способа транспортировки зависит от совокупных объемов потребления:

- от 45 до 130 тыс. т водорода в год: если существует возможность прокладки трубопроводов, лучшим решением будут 20-дюймовые системы водородопроводов, они оказываются конкурентоспособнее других альтернатив на расстояниях транспортировки до 200 км;
- 130—600 тыс. т в год: возможны решения с несколькими 20-дюймовыми ветками и дожимными компрессорами или использование трубопроводов большего диаметра с частичной загрузкой. Здесь выбор нужно делать исходя из

особенностей конкретных проектов и потенциала подключения других потребителей в зоне работы трубопровода;

- 600—1900 тыс. т в год: если прокачку до потребителей нужно осуществлять на расстояние свыше 200 км, целесообразно строительство мощной 48-дюймовой трубопроводной системы.

На рис. 6 показано, как меняются затраты на транспортировку водорода в зависимости от расстояния до потребителя и выбранного способа транспортировки. Расчеты, по результатам которых построены графики, проведены для объемов транспортировки, превышающих 45 тыс. т водорода в год. Затраты учитывают капитальные расходы на строительство инфраструктуры и операционные расходы на транспортировку водорода всеми способами, кроме МВС. Стоимость транспортировки водорода в МВС рассчитана при условии, что транспортируемая смесь содержит 30 % (по объему) водорода, а затраты на прокачку составляют 2 долл. за 1 тыс. м³ газа (средняя себестоимость прокачки по современным газопроводам). Учитывая

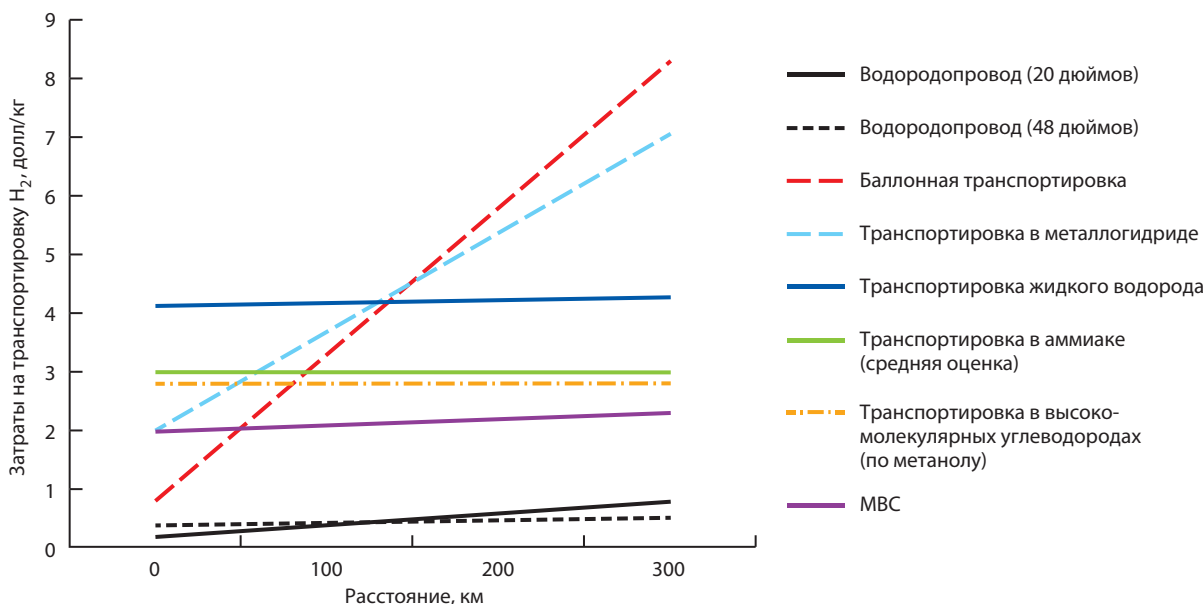


Рис. 6. Сравнение конкурентоспособности различных способов транспортировки водорода на расстояние до 300 км

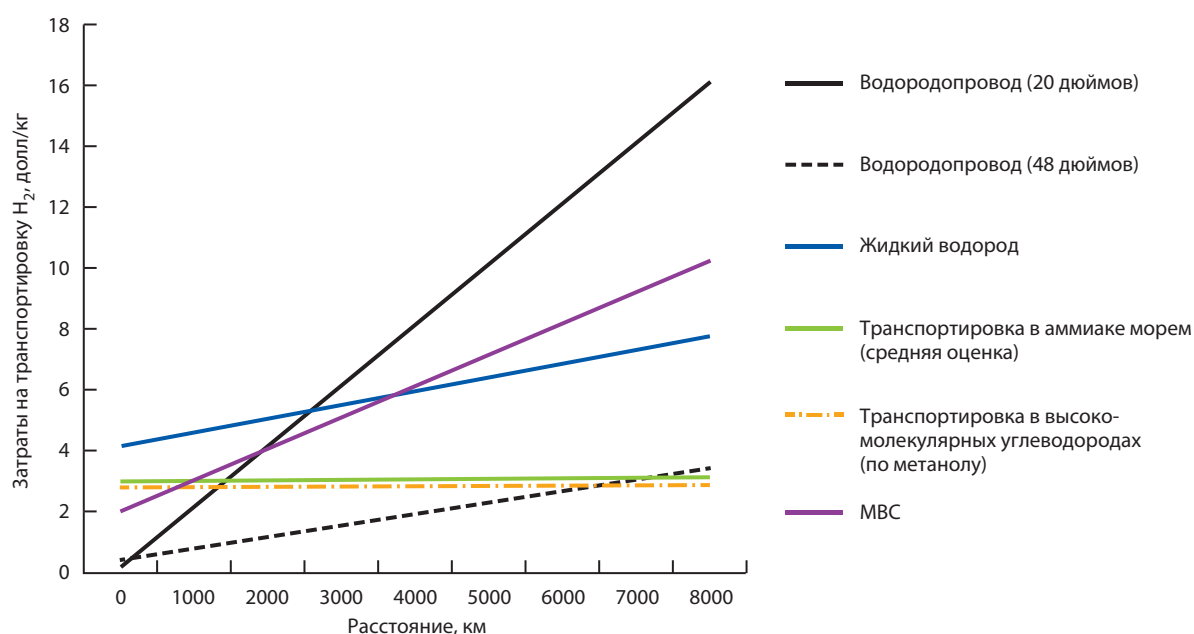


Рис. 7.

Сравнение конкурентоспособности различных способов транспортировки водорода на расстоянии свыше 300 км

повышенные требования к качеству материалов газопровода для MBC, транспортировка смеси с высоким содержанием водорода по старым, полностью амортизированным системам технически неосуществима.

Только на дистанциях свыше 6000—7000 км может появляться потенциальная возможность конкурировать с трубопроводами у технологий транспортировки в высокомолекулярных углеводородах и аммиаке.

Таким образом, для межрегиональных поставок на большие расстояния остаются три альтернативных способа: крупные водородопроводы (где это возможно и расстояние менее 7000 км), аммиак, высокомолекулярные углеводороды. Дальнейшие поставки, т.е. поставки до конкретного потребителя, осуществляются по описанным выше решениям для малых расстояний. На рис. 7 представлены результаты расчета стоимости транспортировки для объемов поставок свыше 130 тыс. т водорода в год с учетом тех же условий, что и для поставок 45 тыс. т в год (см. рис. 6).

Транспортировка водорода в MBC оказывается дороже, чем по водородопроводам. Однако, учитывая возможность использовать уже построенную газовую инфраструктуру, может быть приемлемым вариант, например, прокачки метано-водородной смеси из России в Европу по сохранившейся ветке «Северного потока», которая подходит по техническим характеристикам для транспортировки MBC.

Рисунки 6 и 7 отражают текущий уровень развития технологий (табл. 1). Учитывая, что все способы транспортировки сейчас проходят отработку, апробацию и совершенствуются, есть разные взгляды на перспективы рассматриваемых решений.

Анализ исследований различных международных организаций показал следующее:

- есть консенсус по конкурентоспособности водородопроводов, но Еврокомиссия видит их привлекательными для расстояний транспортировки до 3000 км, IRENA — для расстояний от 3000 до 8000 км, IEA — до 8000 км;

Таблица 1

Ключевые характеристики наиболее перспективных способов транспортировки водорода

Способ транспортировки	Массовая доля водорода в общей массе транспортируемого вещества/контейнера, %	Опасность	Потери при хранении, % в день	Выбросы	Стоимость транспортировки, долл/кг, на расстояние, км		
					100	от 100 до 2000	от 2000 до 8000
Баллоны со сжатым водородом	5	Высокая	1—3	Нет	0,8—4,0	10—50	50—150
Водородопроводы (20 дюймов)	100	Возрастает с повышением мощности трубопровода	< 0,5	NO	~ 0,2	0,2—4,2	4,2—16,0
Водородопроводы (48 дюймов)					~ 0,4	0,4—1,2	1,2—3,4
Жидкий водород	~ 20	Средняя	0,06—3, дополнительно 15 % при захлаживании	Нет	~ 4,2	4,2—5,0	5,0—7,8
MBC	~ 23	Низкая	< 0,5	CO, CH ₄	2,0	2,1—4,1	4,1—10,2
Аммиак	~ 17	Высокая	< 0,5	NO	1,4—4,1 (в зависимости от стоимости погружения в аммиак)	1,43—4,13	1,6—4,3
ЛОHC*	4—7	Низкая	< 0,5	CO, CH ₄	1,1—4,5 (в зависимости от стоимости погружения в ЛОHC)	1,1—4,7	1,1—4,7
Металлогидрид	5—10	Отсутствует	< 0,5	Нет	2—3,7	3,7—36	37—120

* ЛОHC — жидкие органические носители водорода (*liquid organic hydrogen carrier*).

• для расстояний за пределами зоны конкурентоспособности водородопроводов IRENA видит наиболее привлекательными решения с использованием аммиака, МЭА — высокомолекулярных углеводородов, Еврокомиссия — криотранспорта, однако оговаривается, что на расстояниях свыше 16 тыс. км такой способ проигрывает аммиаку и высокомолекулярным углеводородам.

кулярных углеводородов, Еврокомиссия — криотранспорта, однако оговаривается, что на расстояниях свыше 16 тыс. км такой способ проигрывает аммиаку и высокомолекулярным углеводородам.



ВЫПОЛНЯЯ РОЛЬ ХРАНИЛИЩА ЭНЕРГИИ,
ВОДОРОД КОНКУРИРУЕТ С РАЗЛИЧНЫМИ
ВИДАМИ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

4 Экономика производственно- сбытовых цепочек водорода и конкуренто- способность



Затраты на производство, транспортировку и хранение водорода позволяют формировать производственно-сбытовые цепочки, благодаря которым водород может использоваться в различных секторах энергетики и составлять конкуренцию другим топливам и технологическим решениям.

Для водорода могут быть организованы три типа производственных цепочек, которые, с учетом существенных затрат на транспортировку, будут заметно различаться по конечной себестоимости водорода для потребителя:

1. Цепочки с потреблением водорода в местах производства:

- цепочки, замкнутые с объектами генерации цепочки, когда водород вырабатывается электролизом в периоды производства избыточной энергии, хранится и используется для производства электроэнергии при ее нехватке;
- цепочки с потребителями, расположенными в непосредственной близости от объектов производства водорода: например, в непосредственной близости от электролизера построена водородная заправка для автомобилей или станция bunkering судов, стоит теплоэлектростанция, где водород используется для производства тепла или электрической энергии.

2. Цепочки с удаленными потребителями, когда для того, чтобы доставить водород до крупного потребителя (порта, электростанции), необходимо преодолеть значительное расстояние.

3. Цепочки с удаленными розничными потребителями, когда водород нужно поставить небольшому по объемам потребления объекту. При этом, как правило, требуется пройти два этапа транспортировки — в крупных объемах и малых для розницы.

На конце каждой цепочки в принципе может быть один и тот же набор потребителей: транспортные средства (автомобили, а потенциально — суда и авиация), объекты генерации тепловой и электрической энергии (рис. 8).

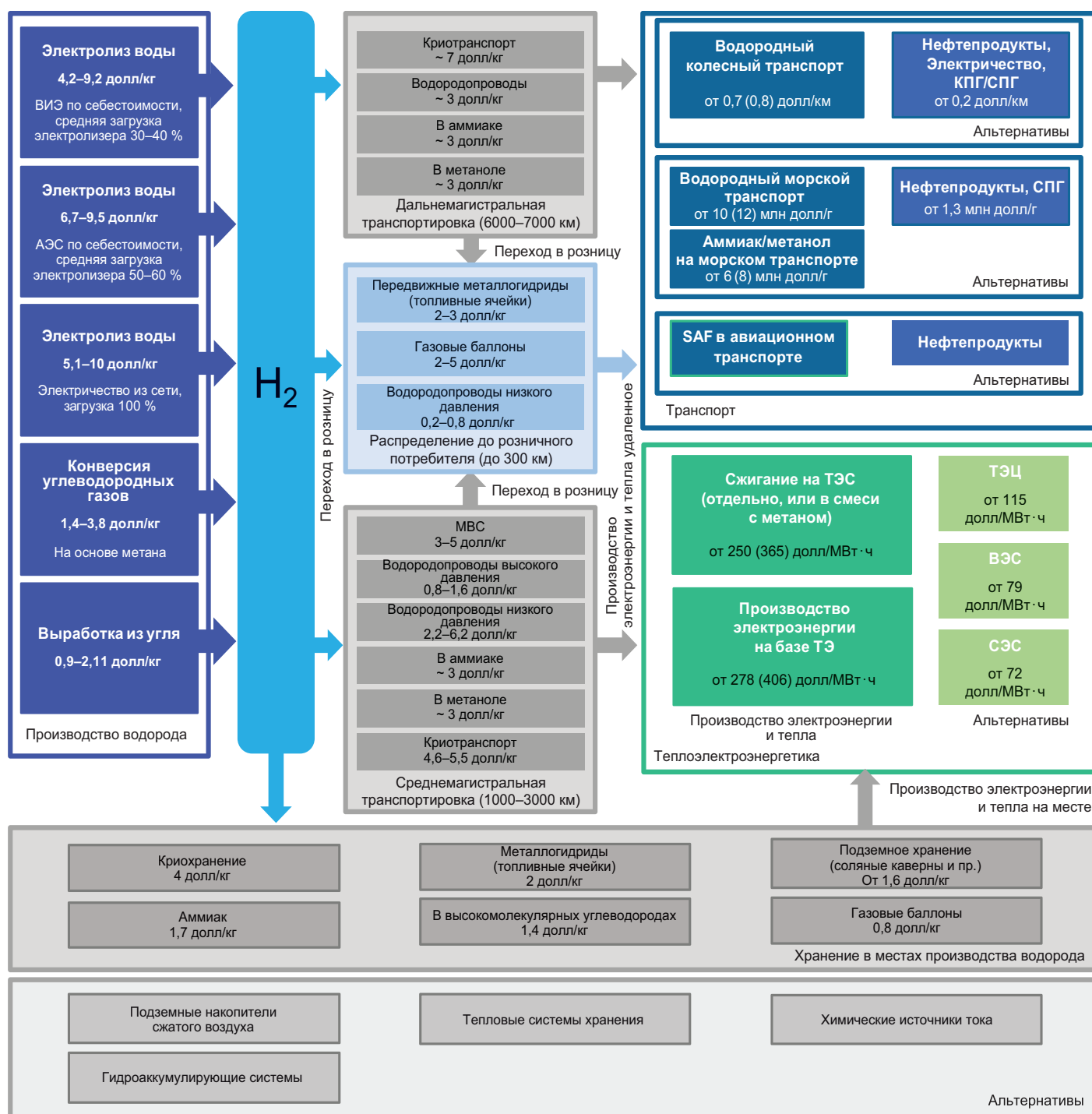


Рис. 8.

Производственно-сбытовые цепочки водорода:

в сегментах конечного потребления в затратах первая цифра при использовании водорода, полученного из метана, в скобках — водорода из ВИЭ; КПГ — компримированный газ

Конкурентоспособность водорода в электроэнергетике

Использование водорода в качестве топлива связано главным образом с электроэнергетикой, где он способен решать две важные задачи:

- выступать в качестве накопителя, для того чтобы балансировать нагрузку в электросетях в периоды избыточной выработки и при ее дефиците;
- обеспечивать выработку тепловой и электрической энергии.

Выполняя роль хранилища энергии, водород конкурирует с различными видами накопителей электроэнергии и использованием резервных мощностей на ископаемых топливах. При этом на текущем уровне развития технологий он уступает по показателю приведенной стоимости хранения энергии (LCOS — *levelized cost of storage*) гидроаккумулирующим системам, системам подземного хранения сжатого воздуха, тепловым системам хранения и маховичным накопителям энергии, проигрывает он по затратам и наиболее распространенным литий-ионным аккумуляторам и другим электрохимическим системам хранения (табл. 2).

Таблица 2

Ключевые показатели конкурентоспособности основных технологий хранения электрической энергии*

Технология хранения	Время разряда	Максимальное число циклов заряд-разряд или период эксплуатации	Плотность энергии, Вт·ч/л	Эффективность по полному циклу (производство — заряд — разряд — подача в сеть), %	LCOS, долл/(МВт·ч)
Литий-ионные аккумуляторы	Не менее 1 мин	1000—10000	200—400	85—95	150—550
Свинцовые аккумуляторы	Не менее 1 мин	6—40 лет	50—80	80—90	110—400
Гидроаккумулирующие системы	Не менее 4 ч	30—60 лет	0,2—2	70—85	70—120
Маховичные накопители энергии	Не менее 1 с	20 000—100 000	20—80	70—95	50—80
Подземные накопители сжатого воздуха	Не менее 2 ч	20—40 лет	2—6	40—70	80—130
Тепловые системы хранения	Несколько часов	30 лет	70—210	80—90	170—220
Водород	Не менее нескольких минут	5—30 лет	600 (при давлении 200 атм)	25—45	300—430

* По данным *Environmental and Energy Study Institute* (Energy Storage. February 2019 : Fact Sheet [Electronic resource]. URL: https://www.eesi.org/files/FactSheet_Energy_Storage_0219.pdf) и *Lazard* (LCOE Lazard. April 2023 [Electronic resource]. URL: <https://www.lazard.com/media/20zoovyg/lazards-lcoeplus-april-2023.pdf>).

Мировой энергетический совет (МИРЭС) оценивает потенциальную возможность удешевления водородных систем хранения в 2,5 раза к 2030 г. При осуществлении этого прогноза водород в качестве средства для аккумулирования энергии может стать конкурентоспособным на рынке крупных промышленных накопителей, учитывая, что потенциал удешевления тех же литий-ионных аккумуляторов считается фактически исчерпанным. Практически нерешаемой при этом видится другая проблема водорода как хранилища: эффективность водородных технологий (остаток электроэнергии в сравнении с исходной) по полному циклу (производство — заряд — разрядка — подача электрической энергии из хранилища в сеть) составляет всего 25—45 % против 85—95 % для химических источников тока и 40—70 % для механических систем хранения.

Другое направление использования водорода в электроэнергетике связано непосредственно с выработкой тепловой и электрической энергии из чистого водорода или из метано-водородной смеси (МВС), подающейся на турбины газовых станций.

Погружение водорода в МВС обеспечивает более высокий коэффициент сжигания природного газа, а также снижает выбросы выделяющихся при горении парниковых газов. По некоторым оценкам, это позволяет примерно на 30 % снизить объем выбросов в атмосферу оксидов азота, углекислого газа и монооксида углерода (зависит от содержания водорода в смеси). В пределах 10 % повышается КПД электростанции, однако итоговая стоимость вырабатываемой энергии возрастает.

При генерации электроэнергии с использованием чистого водорода полностью исключается образование оксидов углерода, однако, затраты на такую генерацию весьма высоки. Данные для водорода, полученного с помощью электролиза, приведены с учетом затрат на хранение и сделанного предположения о 30—50%-ной загрузки электролизеров (рис. 9).

Для выхода на конкурентоспособность с угольной генерацией водороду необходимы цены CO_2 в 360 долл/т, с газовой генерацией — 580 долл/т (в 2022—2023 гг. уровень цен на выбросы CO_2

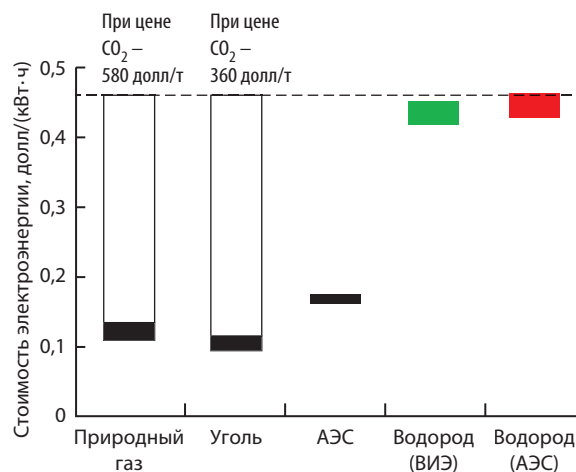


Рис. 9.
Стоимость электроэнергии по источникам производства (приведен диапазон оценок для Европы)

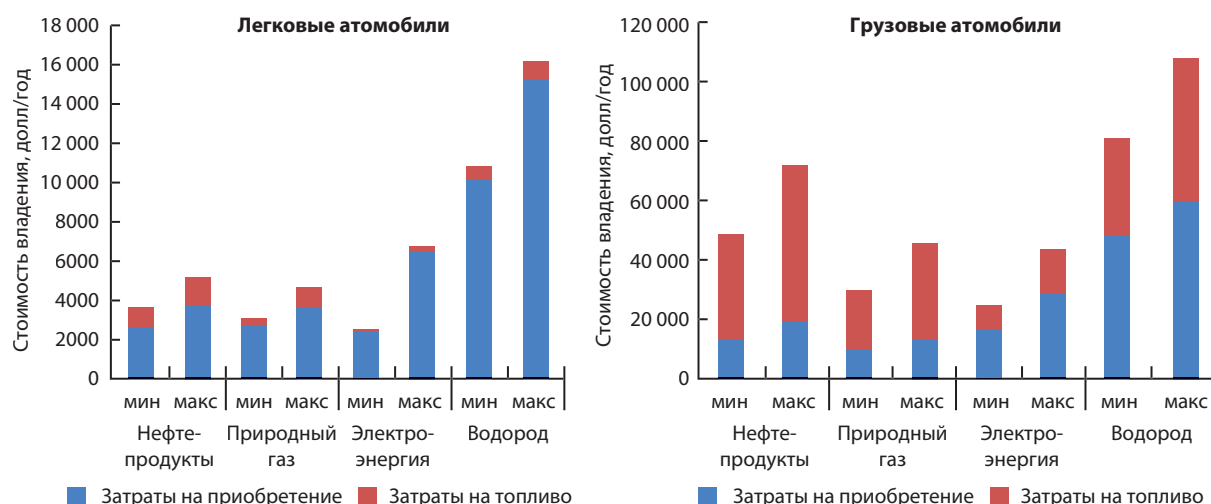
в Европе составлял около 80 долл/т, до этого был существенно ниже).

Конкурентоспособность водорода на транспорте

Использование водорода на транспорте развивается по двум основным направлениям:

- использование чистого водорода. Уже существуют серийные образцы таких автомобилей, отрабатываются технологии его применения в авиации и на флоте;
- использование в виде водородсодержащих продуктов. В авиации — устойчивых топлив (SAF — *sustainable aviation fuel*), производимых из «зеленого» водорода и углекислоты, на флоте — метанола и аммиака.

Считавшиеся ранее перспективными направления использования водорода в качестве присадки к топливу для ДВС или в виде металлгидридов практически не развиваются. Первое считается неперспективным по причине высокой взрыво-

**Рис. 10.**

Диапазоны средних приведенных стоимостей владения автомобилями категорий «легковые» и «грузовые» на различных видах топлива в Китае в 2022 г.:

для водорода затраты на топливо рассчитаны исходя из производственной себестоимости, для остальных топлив — из розничной цены с учетом налогов, которые могут достигать в цене 70 %

и пожароопасности газообразного водорода, второе не реализуется из-за значительного увеличения массы транспортного средства при использовании металлгидридного хранилища.

Рассмотрим ключевые параметры конкурентоспособности чистого водорода в дорожном транспорте на текущий момент на примере Китая, как самого крупного в мире авторыннка по объемам продаж.

При сравнении конкурентоспособности автотранспортных средств принято ориентироваться на приведенную годовую стоимость владения, которая представляет собой совокупные затраты на приобретение и использование автомобиля за определенный срок эксплуатации. По этому показателю легковые автомобили с водородным двигателем оказываются существенно дороже любых аналогов вследствие чрезвычайно высокой базовой стоимости покупки. Только при удешевлении водородных легковых машин минимум в два раза они войдут в зону конкурентоспособности с альтернативами.

Чуть меньший отрыв у водорода от других топливных альтернатив в сегменте грузового

автотранспорта¹. При условии использования грузовиками относительно дешевого водорода, даже сейчас могут образовываться зоны конкурентоспособности водородного крупнотоннажного транспорта с традиционными машинами, работающими на нефтепродуктах. Однако электрический и газомоторный транспорт всё равно оказываются дешевле. Следовательно, для выхода водородных решений в зону конкурентоспособности требуется существенное удешевление как самих водородных крупнотоннажных транспортных средств, так и водорода (рис. 10).

В морском транспорте существующие водородные установки применяются только на небольших уникальных частных судах. Силовые агрегаты, которые могли бы применяться на крупнотоннажных кораблях, еще не разработаны. В 2023 г. планируется спуск на воду первого небольшого судна, работающего на аммиаке. При текущем уровне развития технологий единственная относительно конкурентоспособная по затратам

¹ Перспективы использования сжиженного природного газа на ТЭЦ / А.В. Охлопков, В.Б. Перов, О.Ю. Сигитов, В.Д. Битней // Транспорт на альтернативном топливе. 2021. № 5(83). С. 73—77.

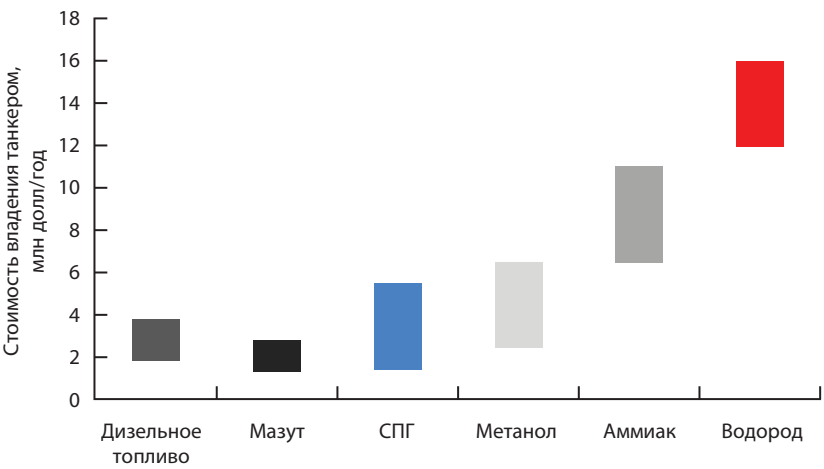


Рис. 11.
Диапазоны средних приведенных стоимостей владения нефтяными танкерами на различных видах топлива с учетом капитальных и операционных затрат

водородная альтернатива традиционным топливам — жидкий метанол (рис. 11).

Помимо высокой стоимости водородных технологий по сравнению с традиционными, серьезным препятствием для развития как водного, так и дорожного транспорта на водороде является отсутствие заправочной инфраструктуры.

В секторе авиации использование водорода сталкивается с конструкционными ограничениями, поскольку емкости для него требуют большого пространства. Коммерчески приемлемых решений пока не предложено.

Использование водорода на железнодорожном транспорте ограничивается прежде всего его высокой стоимостью по всей производственной цепочке. Пилотные проекты водородных поездов запускались в Японии, Германии, Франции, США,

Китае. Перспективной нишей для его применения в случае еще большего ужесточения требований к объемам выбросов могут стать неэлектрифицированные участки железнодорожной сети.

Перспективным и востребованным направлением применения водородных технологий остается военно-промышленный комплекс, где высокие затраты нивелируются техническими преимуществами, главные из которых — относительная бесшумность водородного двигателя и отсутствие теплового следа. Эти характеристики успешно используются в незаметно перемещающихся на большие расстояния беспилотных летательных аппаратах, а также в требующих бесшумности и автономности подводных лодках малых размеров, дизельные установки которых не обеспечивают требуемой скрытности, а использование атомных реакторов нецелесообразно.





В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СПОСОБА ПРОИЗВОДСТВА
ВОДОРОДУ ПРИСВАИВАЕТСЯ ОПРЕДЕЛЕННАЯ
ЦВЕТОВАЯ КОДИРОВКА

5 Экологические ограничения. «Цвета» водорода



При текущем уровне технологий водород в большинстве секторов энергетики неконкурентоспособен по затратам. Однако он является одним из самых экологичных альтернативных топлив в большинстве рассмотренных сфер применения топлива, но необходимо учитывать, каким способом получен водород и какие выбросы при этом были произведены. Как показывает практика развития мировых энергетических рынков конца XX — начала XXI вв., посредством оказания государственной поддержки и использования нормативного регулирования можно обеспечить возможность проникновения в энергобаланс одних технологий и сдерживание использования других, несмотря на реальные показатели их технологической и экономической эффективности и конкурентоспособности. В случае с водородом ряд стран рассматривает привязку такого регулирования к «цветам» водорода (см. рис. 12).

Естественно, что сам водород как химический элемент цвета не имеет, однако в зависимости от способа производства ему присваивается определенная цветовая кодировка, которая условно отражает экологичность его производства. Некоторые страны на фоне происходящих процессов политической декарбонизации могут отказаться от потребления водорода определенного «цвета» либо ограничивать его посредством выстраивания барьеров, подобных введению акцизов на потребление, углеродных налогов на производство, трансграничных сборов и пр.

В процессе пиролиза угля или твердой биомассы, в которых массовая доля углерода более высокая, количество образующихся углекислых газов на единицу водорода соответственно выше, чем при любом другом способе его получения. Этим способом производится так называемый «коричневый водород» — самый непривлекательный с экологической точки зрения, использование которого, скорее всего, будет блокироваться в большинстве развитых стран, придерживающихся стратегии низкоуглеродного развития экономики.

Водород, произведенный наиболее распространенным методом — паровой конверсией метана, сопровождается выделением CO_2 (углекислого газа, или диоксида углерода), а также CO (монооксида углерода) и не может быть отнесен к экологически безуглеродным технологическим процессам. Его принято называть «серым». Научные исследования направлены на поиск способов сокращения выбросов углекислого газа в процессе производства водорода посредством каталитического риформинга. Часть чистого водорода соединяется с углеродом, образуя высококалорийную метано-водородную смесь (МВС), тем самым снижаются выбросы диоксида углерода. Другое направление научных изысканий ориентировано на снижение воздействия на природу посредством захоронения выделяемых оксидов углерода, что, однако, в значительной степени увеличивает стоимость получаемого водорода (по оценкам МЭА, как минимум в 1,5 раза). Водород, производимый конверсией

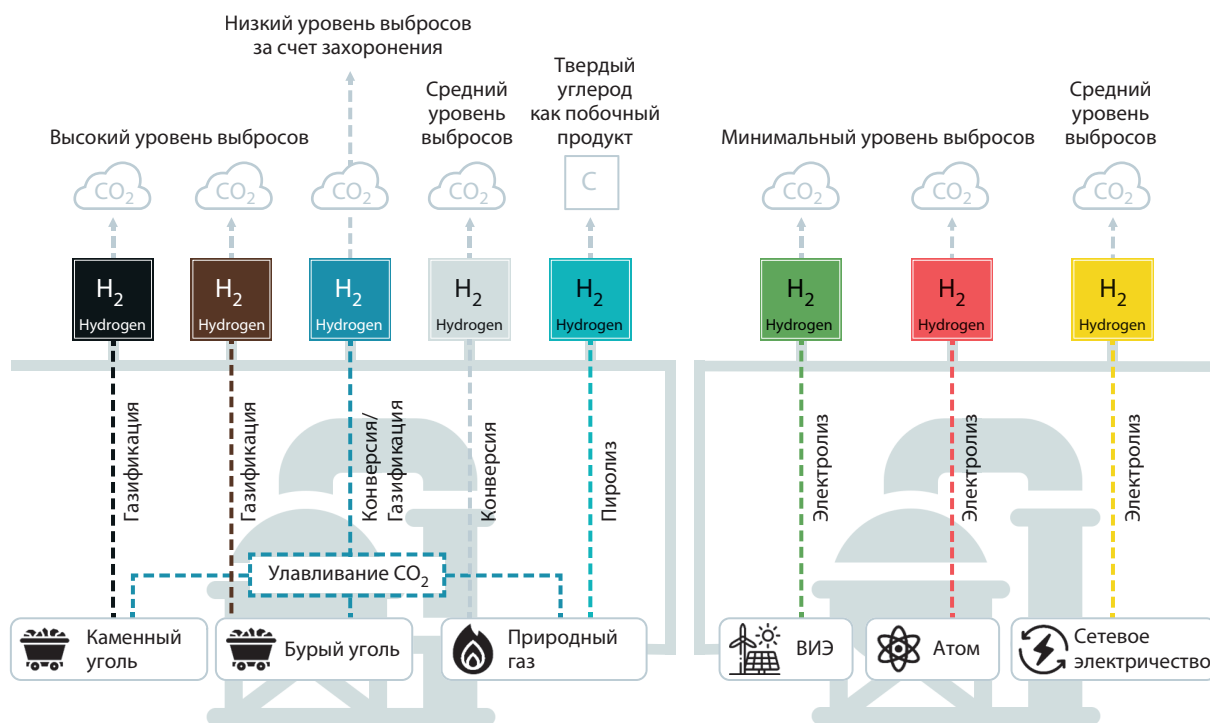


Рис. 12.

Разделение водорода по «цветам» в зависимости от способа производства и выбросов

метана, но с улавливанием образованных в процессе углекислых газов, считают «синим (голубым)». Предполагается, что «бирюзовый» водород будут получать пиролизом метана, где в качестве побочного продукта должно происходить образование не углекислого газа, а сажи. Целесообразность поддержки «серого», «синего (голубого)» и «бирюзового» водорода планируется многими чиновниками ЕС только на переходном этапе. В будущем рассчитывают отказаться от субсидирования потребления этих видов водорода из-за того, что полностью исключить прямые выбросы по всему циклу производства не удастся.

«Красный (оранжевый)» водород получают из воды методом электролиза с использованием энергии, генерируемой на АЭС. Производство водорода таким способом не сопровождается выбросом CO₂. Однако дискуссии о самом буду-

щем атомной энергетики, ведущиеся во многих странах мира, могут оказать дестимулирующее влияние на потребление этого вида водорода.

Водород, полученный методом электролиза с помощью сетевой электроэнергии, с учетом того что в сеть электроэнергия поступает из разных источников, чаще всего называют «желтым». Но некоторые специалисты «желтым» также называют водород, при производстве которого использовалась электроэнергия, сгенерированная на АЭС. Единой согласованной терминологии пока нет.

В странах, декларирующих курс на декарбонизацию, планируется регуляторно поддерживать самый дорогой по производственным затратам «зеленый» водород, получаемый посредством электролиза на электростанциях, работающих на ВИЭ.

Заключение

Уже почти на протяжении двух столетий многие специалисты возлагают на водородные технологии надежду, что они позволят обеспечить формирование экологически чистых энергетики и транспортного сектора. Но, несмотря на множество проведенных исследований и промышленных апробаций, пока завоевание энергетического рынка водородом так и не началось.

Главная проблема использования водорода — высокие затраты на всех элементах производственно-сбытовой цепочки. Активная государственная поддержка, осуществляемая в настоящее время во многих странах, и большие инвестиции, направленные на развитие водородных технологий, несомненно, приведут к их удешевлению. Но достаточно ли будет сокращения затрат для повышения конкурентоспособности водорода как источника энергии — пока открытый вопрос. Еще один серьезный вопрос — технологическая готовность к работе в широких масштабах с водородом, который не только имеет высокую взрывоопасность, но и способен оказывать деструктивное воздействие на материалы, с которыми взаимодействует.

На транспорте существенную поддержку водороду в конкуренции с нефтепродуктами могут оказать низкоуглеродное регулирование и установление прямых ограничений на использование двигателей, работающих на топливах, содержащих углеводороды. Но на конкуренцию с электромобилями политика углеродного регулирования влияния уже не оказывает. Успеха в коммерциализации водородных технологий можно достичь только при опережающем, по сравнению с электрическим транспортом, сокращении затрат (не менее чем в 2 раза) при производстве как топлива (водорода), так и транспортных средств. Однако на горизонте ближайших 10 лет шансов выйти за

пределы экспериментальных и тестовых образцов практически нет.

Транспортировка водорода как носителя энергии, полученной из ископаемого топлива, на дальние расстояния заметно менее экономически эффективна, чем транспортировка нефти и газа. При этом не решается вопрос выбросов вредных веществ, за исключением случаев захоронения CO_2 , которое можно было бы производить и без производства водорода.

В электроэнергетике водород для многих позволил сложить желаемый пазл безуглеродной энергетики, когда электроэнергия, производимая на установках ВИЭ или АЭС, балансируется с реальным спросом благодаря водороду, используемому в качестве накопителя. Но на практике всё оказывается не так просто. Главная проблема, как показали расчеты, это затраты. Только при сверхвысоких ценах на выбросы CO_2 можно говорить о выходе в зону конкурентоспособности с ископаемыми топливами: с углем при цене от 360 долл/т CO_2 , с газом — от 580 долл/т CO_2 . Но есть и вторая серьезная проблема — эффективность, от 50 до 75 % энергии теряется в процессе преобразования электричества — водород — электричество. А если используется электроэнергия, полученная от ископаемых источников, то это еще и рост выбросов в 2—3 раза.

Анализ и проведенные расчеты позволяют сделать вывод, что и на транспорте, и в электроэнергетике водород пока не выдерживает конкуренцию с альтернативами, хотя отдельные узкие ниши он занимать может при соответствующей поддержке.

При этом явно потенциальные возможности для местного водорода шире в странах (напри-

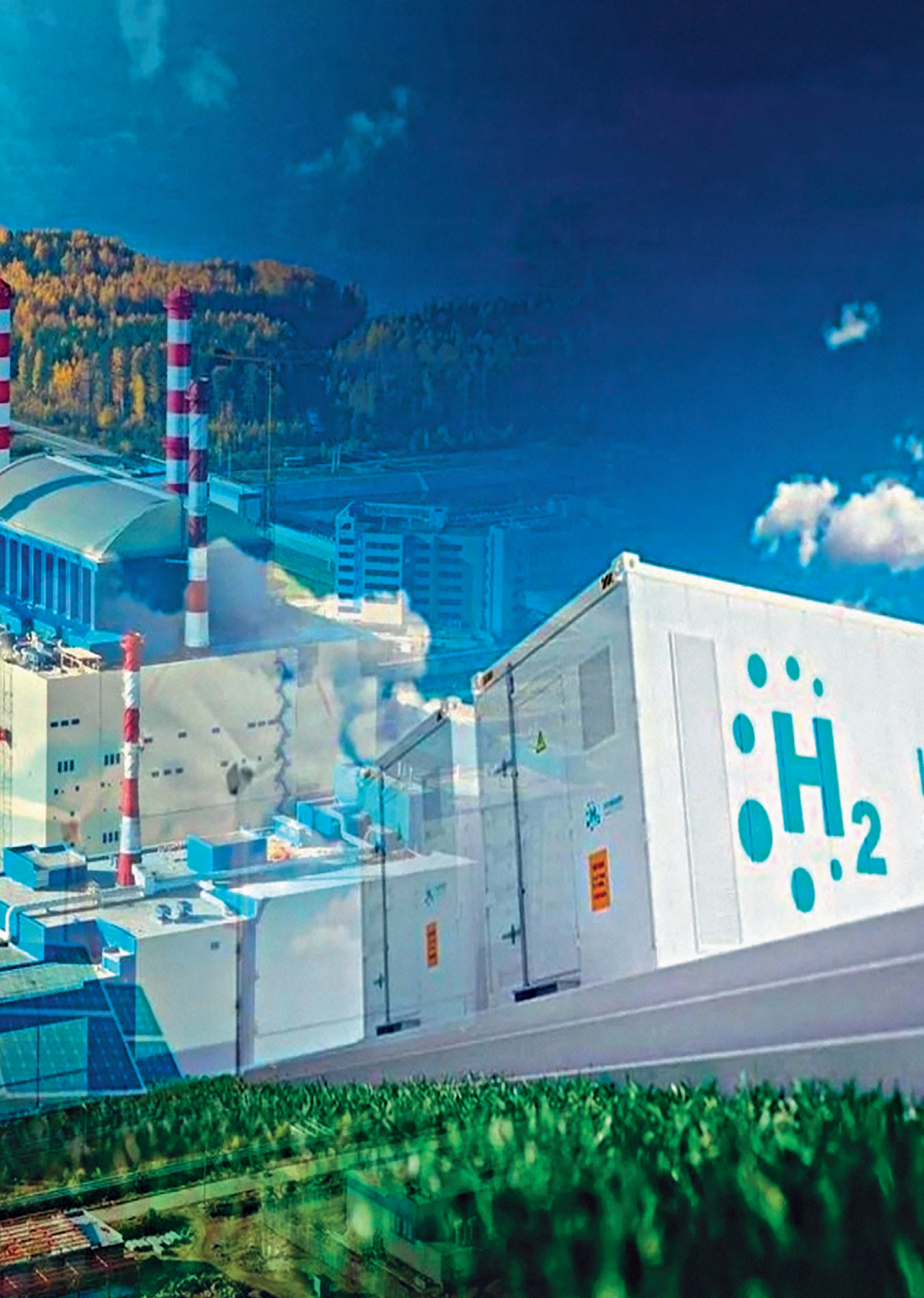
мер, в европейских), которые импортируют ископаемое топливо по высоким ценам, а высокие объемы производства ВИЭ обостряют потребность в балансировке. У крупных же производителей и экспортеров углеводородов, таких как Россия, уровень конкурентоспособности водорода критично низок.

Есть потенциал для расширения использования водорода в узкоспециализированных сегментах, где его преимущества позволяют закрывать глаза на более высокие затраты. В частности, это сферы военно-промышленного комплекса и космонавтики. Например, для активно развивающейся индустрии беспилотных летательных аппаратов водород интересен возможностью обеспечения длительного бесшумного полета без выделения тепла.

Потенциальный интерес для последующего изучения представляет использование водородсодержащих топлив, где сам водород будет только одной из составляющих этого источника энергии (аммиак, метанол, синтетические топлива). Преимуществом этих решений в сравнении с чистым водородом являются отсутствие по-

требности в радикальном изменении силовых установок, снижение взрывоопасности, менее строгие требования к используемым материалам. Проще в этих случаях достичь и конкурентоспособности в сравнении с традиционными топливами.

Таким образом, у водорода есть возможность оправдать возлагаемые на него надежды, но для этого необходимо выполнение сразу трех условий: совершенствование технологий со снижением затрат не менее чем в 2 раза, кратное увеличение цен на выбросы CO₂ и активная государственная поддержка, включающая в себя обеспечение нулевых налоговых изъятий и прямых ограничений и запретов для других энергетических технологий. Но нужно понимать, что параллельно будут развиваться альтернативные низкоуглеродные и безуглеродные технологии, которые также активно борются за собственную нишу энергетического рынка. В ближайшие два десятилетия мы увидим оживленное развитие и противостояние новых технологий, в то время как традиционные решения пока продолжают обеспечивать основу энергобаланса, и заменить их будет весьма непросто.



Научно-популярное издание

ЭКОЛОГИЯ, ЭНЕРГЕТИКА, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Под редакцией академика РАН Александра Викторовича Клименко

Выпуск 2

**КУЛАГИН Вячеслав Александрович
ГРУШЕВЕНКО Дмитрий Александрович**

ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: ЗА И ПРОТИВ

Оригинал-макет подготовлен АО «Издательский дом МЭИ»

Подписано в печать 20.07.2023. Формат 60 × 90/8. Усл. печ. л. 4,5

Контакты издателя: Инженерное управление ПАО «Мосэнерго».

Тел.: +7 (495) 957-19-57, доб. 34-14.

Электронная почта: SigitovOY@mosenergo.ru

Управление по работе со СМИ и органами власти ПАО «Мосэнерго».

Тел.: 8 (495) 957-19-57, доб. 22-90, 37-17.

Электронная почта: press-centre@mosenergo.ru.

Адрес в Интернете: www.mosenergo.ru