



#### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

энергетический кризис,  
развитие водородной  
энергетики,  
производство водорода,  
транспортировка водорода

# ВОДОРОД КАК ОСНОВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДА К БЕЗУГЛЕРОДНОЙ ЭКОНОМИКЕ



Полная версия  
статьи

**О. М. Мамедов**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ВИНТИ РАН

Современное состояние мирового энергетического хозяйства характеризуется турбулентностью, что отражается на политике в области энергетического планирования, корректировке целей и исполнении принятых обязательств по международным соглашениям. В этих условиях новой парадигмой становится пересмотр концепции «газового перехода» в пользу максимального вовлечения водорода в отраслях экономики развитых стран.

В первую очередь турбулентность мирового энергетического рынка касается исполнения решений странами – участниками Парижского саммита 2015 года по предотвращению потепления на планете на 1,5 °C к 2050 году. Проводимая ими политика нацелена на достижение энергетической безопасности, основным элементом которой является опора на собственные энергоресурсы при минимальном либо полном отсутствии поставок энергоносителей со стороны. Определяющим фактором становится энергетическая независимость, а не экономическая эффективность. При таком подходе энергохозяйство формируется как замкнутое, с минимальными внешними

связями. Эффект замкнутой модели энергетического хозяйства заключается не только в вовлечении широкого спектра собственных энергоресурсов, включая нетрадиционные и возобновляемые, но и в наличии эффективных технологий разработки и, главное, использования энергоресурсов.

В своей основе такой подход повторяет пути выхода из мирового энергетического кризиса 70-х годов XX столетия, когда в ответ на подъем цены на нефть на мировом рынке государствами Ближнего Востока была принята программа модернизации энергохозяйств стран – потребителей нефти, где во главу угла ставились энергосбережение и широкое использование возобновляемых источников энергии.

## Ситуация на мировом энергетическом рынке

Нынешняя ситуация на мировом энергетическом рынке в основном повторяет картину предыдущих мировых энергетических кризисов, когда все ведущие экономики мира фокусировались на энергосбережении, сокращении либо полном отказе от импорта энергоресурса.

Отличие текущего энергетического кризиса – максимальное использование органикосодеждающих отходов как источника энергии. При этом решаются задачи энергоснабжения и защиты окружающей среды за счет снижения объемов выбросов в атмосферу вредных веществ и объемов складирования отходов. В результате создается база для формирования безотходной экономики.

Наряду с этим меняется содержание понятия «газовый переход», когда вместо угля – источника загрязнения атмосферы переходят на использование природного газа, характеризующегося меньшими выбросами вредных веществ в атмосферу. Результатом должен стать полный отказ от сжигания ископаемого топлива, замещение его альтернативными источниками энергии, что способствует достижению целей построения безуглеродной экономики.

Однако нынешняя ситуация на мировом энергетическом рынке отличается от предыдущих тем, что, по сути, развернулось противостояние и энергоресурс стал формой взаимного давления. Большинство стран Евросоюза отказались от российских энергоресурсов, в первую очередь от газа, который составляет порядка 40 % от суммарного потребления, причем половина его используется в коммунально-бытовом секторе, а другая в промышленности. Выход ими видится в замещении российского газа за счет роста собственной добычи в акватории Северного моря, смены поставщиков, импорта сжиженного природного газа, пересмотра программы вывода из эксплуатации АЭС, вовлечения угольных месторождений в энергоснабжение (на основе инновационных технологий разработки и использования угля) и максимального применения альтернативных источников энергии, в первую очередь водорода как чистого источника энергии ввиду отсутствия вредных выбросов при его использовании.

Пересмотр «газового перехода» в пользу максимального вовлечения водорода в развитых странах в нынешних условиях турбулентности мирового энергетического рынка стал новой парадигмой. Этому способствует также рост цен на газ на мировом рынке: производство водорода оказывается конкурентоспособным в сравнении с приобретением природного газа.

## Развитие водородной энергетики в мире

В настоящее время 30 стран мира разработали национальные стратегии по развитию водородной энергетики [1].

**Правительство Австралии** в рамках национальной стратегии в 2019 году выделило 370 млн долл. США на формирование начального этапа по созданию на западе страны энергетического хаба мощностью 26 ГВт, из которых 14 ГВт составляют ветро- и геотермические

мощности для производства зеленого водорода на базе электролиза воды. Создание мощного энергетического хаба позволяет не только использовать получаемый водород внутри страны, но и экспортировать его в страны Азиатско-Тихоокеанского региона.

**В США** Ассоциация водородной энергетики, включающая 20 крупнейших нефтегазовых, автомобильных, энергетических корпораций, представила дорожную карту по формированию водородной экономики на ближайшие 20 лет. Согласно документу реализация включает ряд этапов:

- необходимые шаги по формированию водородной экономики (2020–2022 годы);
- первые примеры реализации в области транспорта и сбыта (2023–2025 годы);
- диверсификация, охватывающая воздушный транспорт и химическую промышленность (2026–2030 годы);
- водный транспорт, металлургия, энергосистемы (2031 год и далее).

К началу 2022 года 31 штат страны и округ Колумбия приняли стандарты чистой энергии, при этом каждый из штатов трактует этот термин по-своему, включая АЭС, газовые ТЭС с технологией улавливания и складирования углеродного газа (carbon capture and store – CCS), установки возобновляемой энергетики (ВИЭ).

В рамках принятой программы правительства США, направленной на декарбонизацию электроэнергетики страны к 2035 году и всей экономики к 2050 году, намечено сооружение на юге штата Техас суперхаба по производству водорода в объеме 21 млн т. Выбор места сооружения суперхаба связан с наличием существующей инфраструктуры нефтегазового комплекса, глубоководными портами, геологической структурой, пригодной для складирования углекислого газа, большого потенциала солнечной и ветровой энергии. Общая энергетическая мощность, необходимая для работы суперхаба, составит 60 ГВт.

Сооружение суперхаба связано с ожидаемым ежегодным ростом мировой потребности в водороде в среднем на 6–8 % в период 2030–2050 годов с годовой суммарной потребностью 600 млн т, согласно данным производителей водорода.

Производство водорода в объеме 21 млн т к 2050 году распределяется следующим образом: 10 млн т на экспорт и 11 млн т для собственного потребления, из которых промышленность – 6 млн т, автомобильный транспорт – 2,3 млн т, морской и авиационный транспорт – 1,5 млн т, электроэнергетика – 1,6 млн т.

Реализовать намеченный план планируется в четыре этапа:

1. Законодательное обеспечение (2022–2025 годы).
2. Декарбонизация существующих производств с начальным вводом отдельных объектов суперхаба (2025–2030 годы).
3. Достижение стоимости производства водорода 1 доллар за 1 кг H<sub>2</sub> (2030–2033 годы).
4. Масштабный экспорт и потребление водорода на местах (2035–2050 годы).

Создание суперхаба потребует полной модернизации существующей инфраструктуры штата Техас.

Согласно планам, в США намечено сооружение еще ряда хабов по производству водорода с общим объемом инвестиций 8 млрд долл. США, ежегодной производительностью 18,25 тыс. т на базе ВИЭ, АЭС, переработкой природного газа плюс разработка технологии складирования (CCS).

Намечаемый к сооружению суперхаб в Техасе стоит первым в ряду крупных объектов, к числу которых относится хаb Western Green Energy на западе Австралии мощностью 50 ГВт, в Казахстане мощностью 30 ГВт и хабы в Испании, Франции, Германии и Великобритании суммарной мощностью 67 ГВт.

**В Испании** для создаваемого на севере страны индустриального центра, включающего металлургического гиганта Arcelor Mittal, планируется сооружение электролизеров, питаемых от ВИЭ, мощностью 9,5 ГВт для производства водорода в объеме 330 тыс. т в год. Проект, намеченный к завершению к 2030 году, позволит снизить годовые выбросы углекислого газа в стране на 4 %.

**В Великобритании** проект HyNet производительностью 126 тыс. т водорода должен быть реализован к 2026 году.

**Северные страны Европы** рассматривают производство водорода на базе АЭС. В августе 2020 года шведская компания SAAB впервые в мире произвела выплавку стали с применением водорода. Водород, получаемый на базе АЭС (пурпурный), может быть конкурентным в сравнении с зеленым в случае массового внедрения модульных АЭС, способных производить дешевую электроэнергию, потребляемую электролизерами.

**В Китае** согласно новой стратегии развития водородной энергетики, разработанной Комиссией по реформам и национальному развитию, предусмотрена ежегодная дополнительная выработка водорода 220 тыс. т. В рамках стратегии в декабре 2021 года была введена в эксплуатацию электролизная установка мощностью 150 МВт и производительностью

по водороду 27 тыс. т, а установка производительностью 20 тыс. т в провинции Куга намечена к вводу в 2023 году.

Китайская государственная нефтяная компания Sinopet приступила к сооружению на северо-западе страны электролизеров мощностью 260 МВт, питаемых на базе ВИЭ мощностью 300 МВт. В рамках стратегии водород рассматривается как центральный элемент национальной энергетики. Для достижения поставленной цели необходимо:

- создать инновационную структуру, обеспечивающую исследование и разработку новейших технологий;
- сформировать структуру водородной энергетики, включающую производство, складирование, транспортировку водорода, станции снабжения водородом;
- обеспечить устойчивое использование водорода на транспорте, в тяжелой промышленности, в авиации, в составе топливных элементов, как источник энергии в зданиях;
- создать системы управления и повышения эффективности работы водородной индустрии на базе стандартов качества, безопасности, цен на электроэнергию для производства водорода.

В рамках стратегии количество транспортных средств, работающих на водороде, к 2025 году достигнет в стране 50 тыс. единиц. Предусматривается комплексное решение в части снижения выбросов вредных веществ при интенсификации производства зеленого водорода, так как в настоящее время из ежегодного производства водорода в объеме 33 млн т на долю производства водорода газификацией угля и паровым риформингом метана приходится 80 %, оставшиеся 20 % формируются переработкой коксового газа, производства соды, дегидрогенизацией пропана.

**В Чили** проект чилийского отделения французского нефтяного гиганта Total находится в ряду крупных хабов по производству водорода. Он осуществляется на базе оффшорных ветропарков общей мощностью 20 ГВт с электролизерами мощностью 8 ГВт, установками обессоливания морской воды и заводом по производству аммиака для морской транспортировки водорода с объемом производства 800 тыс. т



Суперхаb по производству водорода (Техас)



с запуском производства в 2027 году. В планах – довести мощности по производству водорода в Чили до 25 ГВт к 2030 году.

**Саудовская Аравия** в рамках стратегии развития водородной энергетики выделяет 7 млрд долл. США на производство зеленого водорода к 2025 году. Получаемый водород предназначен для полного жизнеобеспечения создаваемого нового города Неон. В проекте участвуют Saudi Aramco и Air Products and Chemical из США.

**Канада** в своей стратегии развития водородной энергетики, принятой в конце 2020 года, поставила задачу достижения 30-процентной доли энергоснабжения страны на водороде к 2050 году.

## Иновационные проекты производства водорода

Среди рассматриваемых проектов к числу инновационных можно отнести проекты производства водорода в море на полупогружных платформах.

### Проект *Dolphin*

Примером может служить проект *Dolphin* у берегов Шотландии в Северном море. Первую платформу с ветрогенератором мощностью 2 МВт планируется запустить в 2023 году, а через три года – платформу мощностью 10 МВт. План развертывания проекта имеет следующую последовательность:

- 2023 год: прототип мощностью 2 МВт, годовое производство водорода 180 т;
- 2026 год: прототип мощностью 10 МВт, годовое производство водорода 900 т;
- 2030 год: ветропарк мощностью 100 МВт (10 ветрогенераторов по 10 МВт), годовое производство водорода 9 тыс. т;
- 2034 год: ветропарк мощностью 4 ГВт, годовое производство водорода 360 тыс. т.

В основу проекта *Dolphin* положен результат успешного пуска в эксплуатацию в декабре 2019 года трех полупогружных платформ с ветрогенераторами Vestas V 164-8,4 у побережья Португалии.

### Проект *Sea H2 Long*

Альтернативой проекту *Dolphin* является проект *Sea H2 Long* на базе оффшорного ветропарка мощностью 2 ГВт в Нидерландской зоне Северного моря, энергия которого подается по кабелю на установки электролиза, расположенные на берегу, где также расположены крупные потребители водорода – металлургические и нефтехимические производства Бельгии и Нидерландов. Потребители создали консорциум для претворения в жизнь данного проекта, первую фазу которого планируется завершить к 2030 году. На площадках у потребителей намечено установить оборудование для электролиза общей мощностью 500 МВт с доведением до 1 ГВт.

Реализация данного проекта коррелируется с планами правительства Нидерландов по установке электролизного оборудования суммарной мощностью 3–4 ГВт на базе оффшорных ветропарков в рамках решения задачи декарбонизации экономики страны.

### Проект по переводу энергетических котлов ТЭС *Long Ridel* на сжигание водорода

Примером замены водородом ископаемого топлива может служить осуществление проекта по переводу энергетических котлов на сжигание водорода на газовой ТЭС *Long Ridel* (штат Огайо) мощностью 485 МВт в смеси с природным газом в объеме 15 % с доведением до 100 %. В штате Юта в рамках реконструкции угольной ТЭС мощностью 1 900 МВт намечен пуск мощностей 840 МВт с газовыми турбинами для сжигания газовой смеси с содержанием водорода 25 % в смеси с доведением до 100 %. Предусмотрено аккумулирование водорода в близлежащих соляных кавернах.

## Транспортировка водорода

Примеры формирования водородных хабов позволяют предположить, что формируется группа мировых лидеров по производству водорода – США, Австралия, Чили, которые делают ставку на экспорт водорода. Размещение крупных водородных хабов для экспорта на побережье связано с использованием специальных судов для транспортировки водорода в чистом или связанном виде, что отражается на технико-экономических показателях комплекса в целом.

В рамках проекта, реализуемого в Австралии, в начале 2022 года судно с водородом было направлено в Японию. Судно с дизельным двигателем за время перехода выбросит в атмосферу большое количество вредных веществ, которые совместно с выбросами производства водорода из угля (которые имеют место) отрицательно характеризуют транспортировку чистого водорода.

Альтернативой этому, согласно исследованию Международного энергетического агентства (МЭА), может стать транспортировка связанного водорода в виде аммиака ( $\text{NH}_3$ ).

Если исходить из параметров водорода и аммиака, экономика их транспортировки заметно отличается. Так, при нормальном атмосферном давлении  $1 \text{ м}^3$  водорода содержит энергию, равную  $3 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ . При компримировании водорода до 700 бар его объемная плотность возрастает, и содержание энергии составит  $1411 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ . При охлаждении до  $-253^\circ\text{C}$  объемная плотность достигает  $2350 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ . У жидкого аммиака при температуре  $-33,3^\circ\text{C}$  объемная плотность составляет  $3730 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ , что на 59 % выше, чем у жидкого водорода. В итоге при одинаковой грузоподъемности судна количество энергии перевозимого топлива будет больше у жидкого аммиака, чем у жидкого водорода.

Согласно исследованию компании Sumitomo, стоимость жидкого аммиака составляет 0,48 долл. США/кг, стоимость жидкого водорода – 7,15 долл. США/кг. Для судна грузоподъемностью 160 тыс.  $\text{м}^3$  стоимость перевозки составит 200 долл. США за  $1 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$  энергии для жидкого водорода по сравнению с 88 долл. США для жидкого аммиака.

Следующей характеристикой является точка кипения: температура перехода топлива из жидкого в газообразное состояние. Для судна, перевозящего жидкий водород, необходимо наличие холодильных установок. Так, согласно расчету, при транспортировке жидкого водорода из Катара в Японию потери составят 13,770 % от объема перевозки жидкого водорода, тогда как для жидкого аммиака – лишь 0,325 % (за счет разности температур охлаждения). При стоимости  $1 \text{ кг}$  жидкого водорода 7,15 долл. США потери испарения составят 270,5 млн долл. США, тогда как для жидкого аммиака – лишь 4,1 млн долл. США.

Стандартное судно 160 тыс.  $\text{м}^3$  принимает на борт в пересчете на вес 109 248 т жидкого аммиака и 113 376 т жидкого водорода, что составит соответственно 596,8 и 404,8  $\text{ГВт}\cdot\text{ч}$ . Стоимость груза на борту судна, перевозящего жидкий аммиак, составит 52,44 млн долл. США, тогда как для жидкого водорода – 81,34 млн долл. США. Удельная стоимость перевозимой энергии составит 87,86 долл.

США/ $\text{МВт}\cdot\text{ч}$  для жидкого аммиака и 200,94 – для жидкого водорода.

Из приведенных расчетов следует, что получаемый водород целесообразно использовать на месте его производства – в промышленности, на грузоподъемном транспорте и в быту. Импортируемый водород целесообразно использовать для производства электроэнергии с последующей электрификацией быта и транспорта.

Целесообразности транспортировки импортируемого водорода в виде жидкого аммиака способствует тот факт, что при равной грузоподъемности судна для обеспечения потребного количества энергии потребуется два судна при транспортировке аммиака и три судна при транспортировке жидкого водорода.

## Интересы России в производстве водорода

В свете рассмотренного представляет интерес положение России в мировом тренде энергетического перехода с водородным акцентом.

Госкорпорация «Росатом» совместно с компанией «Газпром нефть» и иностранными фирмами участвует в проекте производства водорода методом парового риформинга газа, добываемого на шельфе о. Сахалин. Источником тепла процесса риформинга является высокотемпературный ядерный реактор, где теплоносителем служит гелий с температурой  $950^\circ\text{C}$ . Образующийся в процессе получения водорода углекислый газ намечено закачивать в недра добычи газа.

На начальном этапе разработки проекта намечается производство 100 т водорода в сутки, годовая производительность проекта – 30 тыс. т водорода. Ожидаемый пуск производства согласно проекту должен состояться в 2024 году, а экспорт, предназначенный для стран Азиатско-Тихоокеанского региона, начаться в 2025 году.

Сегодня основными потребителями водорода в регионе, готовыми принять российский водород, являются Корея – страна, правительство которой приняло программу перехода энергоснабжения на водород, и Япония, куда уже в начале 2022 года было направлено судно с жидким водородом из Австралии. Тот факт, что японская фирма Kawasaki Heavy Industries приняла программу сооружения флота специальных судов для перевозки водорода, подтверждает намерения Японии и в дальнейшем наращивать отгрузку и готовность правительства страны поддерживать программу в долгосрочной перспективе.

В дальнейшем согласно проекту планируется нарастить производство водорода до 330 т в сутки. Однако после выхода из него иностранных участников ввиду сложившихся обстоятельств вопрос реализации проекта остается открытым. В этой связи в планах России относительно масштабного присутствия на мировом рынке водорода могут возникнуть определенные вопросы, что потребует пересмотра целей с увеличением ориентации на внутренний рынок.

### Литература<sup>1</sup>

1. <https://www.enr.com/articles/51290-has-hydrogens-time-finally-come>. ■

<sup>1</sup> Полный список используемых источников см. в интернет-версии статьи [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?id=8191](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?id=8191).