

# Hydrogen Production and Uses

*(Updated November 2020)*

- Водород все чаще рассматривается в качестве ключевого компонента будущих энергетических систем, если он может быть изготовлен без выбросов углекислого газа.
- Его начинают использовать в качестве транспортного топлива, несмотря на необходимость герметизации под высоким давлением.
- Использование водорода в производстве жидких транспортных топлив из сырой нефти быстро растет и имеет жизненно важное значение там, где источником нефти являются битуминозные пески.
- Водород может быть объединен с углекислым газом для получения метанола или диметилового эфира (ДМЭ), которые являются важными транспортными топливами.
- Водород также имеет будущее применение в качестве промышленной замены кокса в сталеплавильных и других металлургических процессах.
- Ядерная энергия может быть использована для получения водорода электролитическим путем, а в будущем высокотемпературные реакторы, вероятно, будут использоваться для его термохимического получения.
- Сегодня потребность в энергии для производства водорода может превысить потребность в электроэнергии.

Водород не находится в свободной форме ( $H_2$ ), но должен быть освобожден от молекул, таких как вода или метан. Это уже значительный химический продукт, около половины годового производства чистого водорода используется для производства азотных удобрений по методу Хабера и около одной четверти для преобразования низкосортных сырых нефтей (особенно из битуминозных песков) в жидкое транспортное топливо. Существует большой опыт обращения с водородом в больших масштабах, хотя это не так просто, как природный газ.

Большая часть водорода сегодня производится путем парового риформинга природного газа или газификации угля, как с выбросами углекислого газа ( $CO_2$ ). Будущий спрос будет в основном на водород с нулевым содержанием углерода. Планы по увеличению производства водорода в основном основаны на электролизе с использованием электроэнергии из прерывистых возобновляемых источников. Кроме того, можно использовать непииковую мощность обычных ядерных реакторов или других электростанций.

Быстро растущий спрос на водород со стороны нефтеперерабатывающих и химических заводов благоприятствует технологиям с низкими затратами. Ограниченные сети водородопроводов уже существуют, что позволяет производственным объектам быть в некотором роде от пользователей.

В будущем одной из основных возможностей получения водорода с нулевым содержанием углерода является разложение воды путем прямого использования тепла ядерной энергии с использованием термохимического процесса, включаемого высокотемпературными реакторами.

Как и электричество, водород является энергоносителем (но не первичным источником энергии). Водород имеет некоторый потенциал для замены нефти в качестве

транспортного топлива и в других областях применения. Это предпочтительное топливо для электромобилей на топливных элементах (FCEVs), хотя переносное хранение в масштабе автомобиля является сложной задачей. Водород также может быть использован в двигателях внутреннего сгорания.

В то время как водород может заменить жидкие углеводороды, он никогда не является таким энергонасыщенным или удобным для хранения и транспортировки. Тем не менее, он хорошо сравнивается с батареями, поэтому он и жидкое топливо на основе водорода имеют большой потенциал.

Электричество и водород преобразуются друг в друга в качестве энергоносителей. Однако общий КПД электроэнергетики-водород-топливный элемент-электричество составляет не более 40%. Один из подходов к смягчению перебоев в ветровом и солнечном электричестве заключается в получении водорода электролизом и подаче его в газовую сеть-стратегия преобразования энергии в газ. Было высказано предположение, что таким образом можно было бы использовать большую часть электроэнергии от ветра, что значительно упростило бы управление электрическими сетями.

В будущем часть водорода, получаемого в качестве топлива, может быть преобразована в аммиак в качестве более энергонапряженной среды-носителя объема для торговли или долгосрочного хранения энергии. Массовая плотность энергии водорода составляет 120 или 142 МДж / кг\*, по сравнению с метаном 50 МДж/кг, пропаном 46 МДж/кг и аммиаком 19 МДж / кг. Объемная плотность энергии водорода невелика-10,8 или 12,75 МДж / НМ<sup>3</sup> (или в жидком виде: 8,5 или 10,0 МДж/л)\*\*.

\* Более низкие (чистая теплота сгорания) и более высокие (валовая теплота сгорания) значения нагрева соответственно. Таким образом, 33,3 или 39,4 кВт \* ч/кг. Более высокая теплотворная способность включает скрытое тепло в испаренной воде, более низкая теплотворная способность (или чистая теплотворная способность) исключает это.

\*\* НМ<sup>3</sup> = нормальный кубический метр (температура 0 °C и давление 1,01325 бар (*m. e.* 1 атмосфера)).

Все это указывает на то, что в то время как растущая водородная экономика уже существует, связанная с мировой химической и нефтеперерабатывающей промышленностью, и потенциально для сталеплавильного производства, гораздо большая экономика находится в поле зрения. При новом использовании водорода в качестве топлива спрос на первичную энергию для его производства может превысить спрос на электроэнергию.

Ожидается, что транспорт будет представлять наибольший спрос на водород как в ЕС, так и в Южной Корее к 2050 году, что отражает конверсию парка тяжелых транспортных средств и крупных легковых автомобилей с дизельного топлива на водородные FCEV. Отопление для зданий, как ожидается, будет следующим по величине спросом, заменив природный газ. Железные дороги могут заменить дизельное топливо водородом.

Если водород будет служить топливом для судоходства или авиации, заправка должна быть доступна по всему миру, поэтому амбициозные планы Европы потребуют гораздо более широкого применения.

В сентябрьском [докладе LucidCatalyst за 2020 год](#) говорится, что в дополнение к развертыванию возобновляемых источников энергии для производства электроэнергии: "единственный известный способ решения проблем "труднодекарбонизируемых" секторов экономики-это широкомасштабное использование водорода в качестве чистого энергоносителя и в качестве исходного сырья для синтетических видов топлива, таких как аммиак."Но чистый водород должен поступать из неископаемых источников по более низкой цене – менее 1 доллара за килограмм – чем это предполагается сегодня.

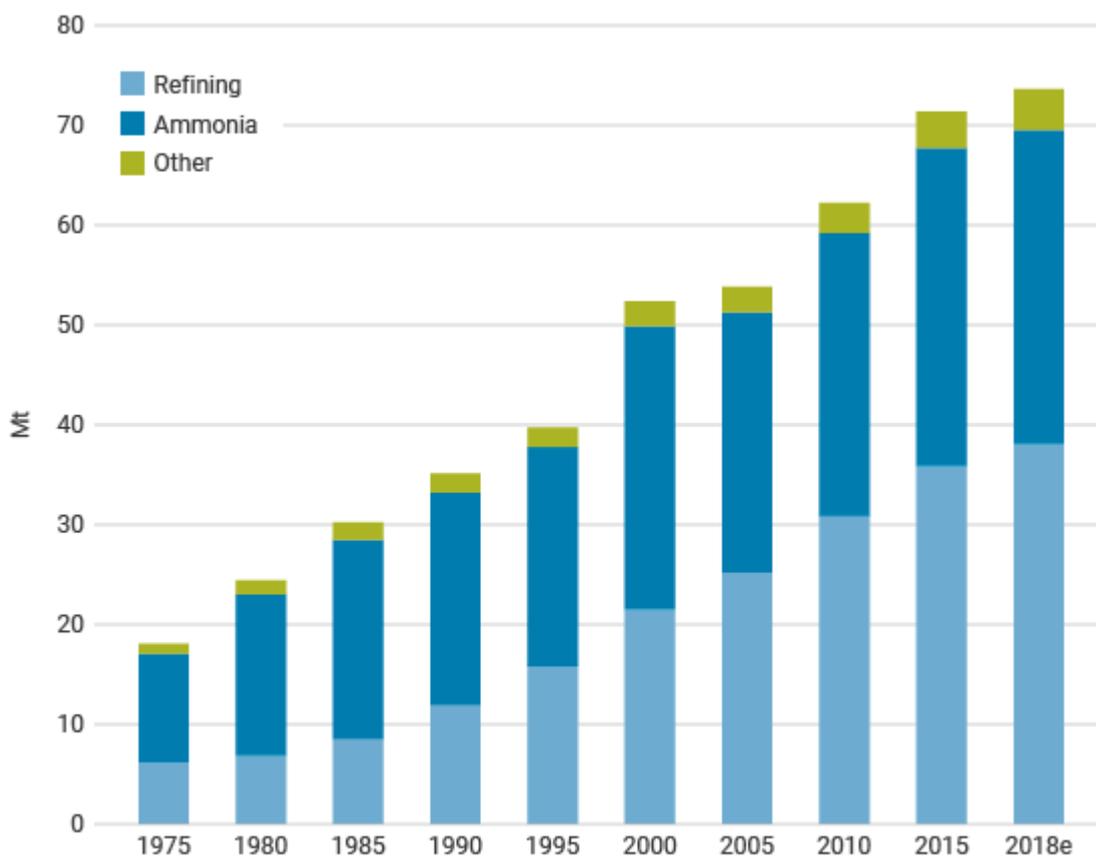
Обильное снабжение дешевым водородом значительно повысило бы мировую сельскохозяйственную производительность за счет увеличения доступности азотных удобрений, а также заправки топливом транспорта.

## Национальные и региональные планы

По оценкам Института энергетической экономики и финансового анализа (IEEFA), к 2030 году глобальный спрос на водород с нулевым содержанием углерода составит 8,7 миллиона тонн в год. Прогнозы мирового спроса на водород к 2050 году варьируются от очень незначительных через 67 млн тонн (по сравнению с примерно 70 млн тонн сегодня) до 490 млн тонн плюс 158 млн тонн в качестве промышленного сырья.

Международное энергетическое агентство (МЭА) [Energy Technology Perspectives 2020](#) в своем сценарии устойчивого развития прогнозирует быстрый рост мирового производства водорода примерно до 445 млн тонн для использования энергии плюс 75 млн тонн для использования в технологических процессах к 2070 году. 520 тонн водорода будут производиться на 58% электролизом и на 40% из ископаемого топлива с улавливанием и хранением углерода (уху). Из потребности в энергии 60% приходится на транспорт, а из используемого технологического процесса 60% приходится на химическое производство и 40% - на производство стали.

## Мировой годовой спрос на водород



Source: International Energy Agency

**"Зеленый водород"** вырабатывается за счет электроэнергии из прерывистых возобновляемых источников.

**"Серый водород"** - это тот, который образуется из метана с соответствующими выбросами CO<sub>2</sub>.

**"Голубой водород"** - это серый водород, но с улавливанием и хранением углерода

(обычно 50-70% эффективности).

"Желтый водород" использует ядерное электричество для электролиза.

"Бирюзовый водород" получают из метана путем пиролиза расплавленного металла с твердым побочным продуктом углерода.

Только зеленый и желтый водород надежно являются нулевыми углеродами. Будущее термохимическое производство из атомной энергии пока не имеет названия.

База данных водородных проектов по всему миру предоставляется Международным энергетическим агентством ОЭСР ([МЭА](#)).

**В Европе** министры энергетики ЕС подписали водородную инициативу-необязательную политическую декларацию о поддержке развития водорода-в сентябре 2018 года. ЕС запустил масштабную программу "зеленого водорода", основанную на избытке энергии из прерывистых возобновляемых источников, чтобы обезуглероживать промышленность и авиацию и развивать экспортные возможности. Зеленый водород рассматривается как ключ к достижению "чистых нулевых" целевых показателей выбросов, но пока затраты высоки из-за дорогостоящего оборудования и необходимого количества электроэнергии.

Водородная стратегия ЕС для ЕС, опубликованная в июле 2020 года, предусматривает установку не менее 6 ГВт электролизеров, работающих на возобновляемых источниках энергии, к 2024 году (по сравнению с 1 ГВт в 2020 году), производя до миллиона тонн зеленого водорода в год к 2024 году. С 2025 года государства-члены ЕС должны рассматривать водород как неотъемлемую часть своей энергетической системы "со стратегической целью установить не менее 40 ГВт возобновляемых водородных электролизеров к 2030 году и производить до десяти миллионов тонн возобновляемого водорода в ЕС. "Использование водорода будет расширено для транспорта и производства стали. С 2030 по 2050 год "возобновляемые водородные технологии должны достичь зрелости и быть развернуты в больших масштабах. "ЕК ожидает, что" совокупные инвестиции в возобновляемый водород в Европе [составят] до 180-470 миллиардов евро к 2050 году и в диапазоне 3-18 миллиардов евро для низкоуглеродистого ископаемого водорода" (т. е. с использованием уху - улавливанием и хранением углерода ).

В июне 2020 года торговый орган Hydrogen Europe заявил, что спрос ЕС на водород к 2030 году составит около 16,9 млн тонн, из которых 7,4 млн тонн будет составлять зеленый водород, производимый из возобновляемых источников энергии, некоторые из которых импортируются из Украины и Северной Африки. Чистый водород от электролиза с использованием другой низкоуглеродистой электроэнергии, такой как ядерная, и природного газа с уху, обеспечил бы 8,2 млн т, а 1,3 млн т поступило бы от газификации угля с уху. В докладе предусматривалось производство 20 млн тонн зеленой стали с использованием 1 млн тонн водорода к 2030 году. Другие виды использования будут смешиваться с природным газом, производством электроэнергии и транспортным топливом.

Европейский сетевой оператор Energas и десять других компаний предлагают построить 22 900 км Европейской водородной магистрали к 2040 году. Между тем до 20% водорода будет смешиваться в сетях природного газа.

Hydrogen Europe отмечает, что планы ЕС будут иметь значительные производственные последствия, включая расширение производства электролизеров с 1 ГВт/год до 25 ГВт/год, увеличение производства топливных элементов с 10 до 100 ГВт/год, а также большое количество вспомогательного оборудования.

Национальная водородная стратегия Германии, утвержденная в июне 2020 года, предлагает около 7 миллиардов евро для доведения мощности электролизера до 5 ГВт к

2030 году для 14 ТВтч зеленого водорода, требующего 20 ТВтч возобновляемой электроэнергии. Стратегия также предусматривала выделение 2 млрд евро на проекты за рубежом, поскольку потребуются импорт водорода – лишь небольшая часть предполагаемого спроса к 2030 году будет производиться внутри страны. В то время как цель состоит в том, чтобы использовать зеленый водород, синий и бирюзовый водород будут играть определенную роль.

**Франция** выделяет 7 миллиардов евро на зеленый водород с 6,5 ГВт мощности электролизера к 2030 году, причем 2 миллиарда евро из них в течение двух лет до 2022 года, в поддержку своей водородной стратегии 2018 года. Около 40% этой суммы будет профинансировано из программы ЕС по восстановлению коронавируса стоимостью 750 миллиардов евро.

Правительство Испании утвердило водородную дорожную карту на период до 2030 года, предусматривающую установку 4 ГВт электролизных мощностей, квоты на зеленый водород для промышленных потребителей и использование водорода на транспорте среди других мер, согласованных с водородной стратегией ЕС. В настоящее время Испания производит и использует 0,5 миллиона тонн водорода в год. Iberdrola строит в Пуэртольяно зеленую водородную установку мощностью 20 МВт, соединенную с солнечной фотоэлектрической решеткой мощностью 100 МВт и Батарейной системой мощностью 20 МВтч за 150 миллионов евро для производства аммиака.

**Нидерландская** водородная стратегия нацелена на 500 МВт электролизеров к 2025 году и 3-4 ГВт к 2030 году. Зеленый и синий водород подавался в газовую сеть сначала на 2%, а затем на 10-20%.

**Великобритания** планирует опубликовать водородную стратегию в 2021 году. Между тем она нацелена на 5 ГВт низкоуглеродистых мощностей по производству водорода к 2030 году, главным образом голубого водорода. До 20% водорода будет смешиваться с природным газом. ITM Power вводит в эксплуатацию новый завод электролизеров в Шеффилде, чтобы в конечном итоге построить 1 ГВт электролизеров PEM в год.

В **Италии** газотранспортная компания Snam сотрудничает с ITM для установки 100 МВт электролизеров к 2025 году для получения зеленого водорода.

**Китай** не ставил таких агрессивных целей для зеленого водорода, как Европа, но в 2020 году политика и цели, связанные с водородом, заметно возросли. Китайский водородный альянс, состоящий из компаний, университетов и научно-исследовательских институтов, предсказал в 2019 году, что большая часть производства водорода перейдет от ископаемого топлива к возобновляемой энергии к середине века. Большая часть производства водорода в Китае – 22 миллиона тонн в год (треть мирового объема чистого водорода) – производится из угля и только 3% – из возобновляемых источников энергии. По данным Cleantech Group, компания имеет в эксплуатации почти 1000 угольных газификаторов, что составляет 5% ее использования угля. Китай планирует иметь один миллион FCEVs и 1000 водородных заправочных станций к 2030 году. Его цель на 2050 год состоит в том, чтобы водород, в основном серый водород, составлял 10% от общей энергии, требуя около 60 тонн в год.

Министерство экономики, технологий и промышленности Японии (METI) подготовило всеобъемлющую дорожную карту водородной стратегии в 2016 году и [обновило ее в 2019 году](#). Это должно заменить использование ископаемого топлива в Японии в основном синим и серым водородом. К 2030 году ожидается быстрое расширение использования водородных топливных элементов как в зданиях, так и в мобильных приложениях, таких как грузовики и легковые автомобили. Он стремится снизить

стоимость до 30 иен /нм<sup>3</sup> к тому времени и до 20 иен позже. Япония планирует импортировать водород с нулевым содержанием углерода и аммиак.

В марте 2020 [года новая международная ресурсная стратегия METI](#) определила аммиак как перспективное средство " импорта возобновляемой энергии, произведенной в других странах."В октябре 2020 года METI учредила Совет по аммиачной энергетике с участием крупных компаний частного сектора и стремится позиционировать Японию как мирового лидера в области аммиака как источника энергии, особенно на электростанциях и морском транспорте, путем распространения технологий и развития цепочек поставок.

**Южная Корея** планирует увеличить использование FCEV, особенно автобусов и грузовиков, работающих на водороде с нулевым содержанием углерода, и ожидает, что спрос на водород удвоится к 2030 году. Его [национальная водородная дорожная](#) карта гласит: "общий потенциал водорода в Корее составляет 17 тонн (эквивалент 564 ТВтч) в 2050 году, что составляет более 20% от общего национального спроса на энергию.- Это в основном голубой водород.

**Россия** планирует создать новую водородную отрасль к 2024 году. "Газпром" должен испытать новую водородную турбину в 2021 году, и, как сообщается, партнерство между "Газпром энергохолдингом" и Siemens еще не завершено. "Газпром" стремится производить бирюзовый водород пиролизом метана (а не паровым риформингом), чтобы получить твердый углерод, а не CO<sub>2</sub>. Росатом производит водород методом электролиза и планирует провести испытания водородных поездов на острове Сахалин.

**В США** инициатива Министерства энергетики (DOE) H2@Scale поддерживает инновации в производстве, хранении, транспортировке и использовании водорода во многих секторах. 11 млн т / год производства водорода в США имеет тепловой потенциал 1,3 Эдж и потребляет почти 5% использования природного газа в США путем парового риформинга, выпуская 77млн т CO<sub>2</sub> ежегодно. Использование водорода для всего транспорта США потребовало бы около 200 тонн водорода в год, хотя этот сценарий несколько далек.

В ноябре 2020 года Министерство сельского хозяйства опубликовало свой план водородной программы, призванный обеспечить стратегическую основу для его деятельности в области исследований, разработок и демонстрации водорода (RD&D). Она включает в себя усилия РД и Д нескольких офисов ДОУ по продвижению производства, транспортировки, хранения и использования водорода в различных секторах экономики. "В отличие от других видов топлива, водород требует большей интеграции систем ископаемой, ядерной и возобновляемой энергетике, и для реализации полного потенциала и преимуществ водорода потребуются комплексный подход со стороны всех секторов энергетики Ключевым аспектом стратегии является обеспечение возможности производства водорода из различных низкоуглеродистых внутренних энергетических ресурсов, включая возобновляемые источники энергии, ядерную энергию и ископаемые виды топлива с использованием уху (улавливанием и хранением углерода).

ДОУ в октябре 2020 года выбрало два проекта по продвижению гибкой эксплуатации легководных реакторов с интегрированными системами производства водорода для получения совместного финансирования затрат. Два других проекта уже осуществляются. Один из четырех будет сосредоточен на использовании твердооксидного электролизера при высокой температуре. Национальная лаборатория штата Айдахо совместно с компанией Xcel Energy продемонстрирует технологию высокотемпературного парового электролиза (HTSE) с использованием тепла и электричества одной из атомных станций компании Xcel Energy.

В Австралии газификация лигнита в долине Латроб штата Виктория запланирована в [Национальной водородной дорожной](#) карте, в конечном итоге с использованием уху в близлежащем бассейне Гипсленда. Проект [цепочки поставок водородной энергии](#) будет транспортировать водород автомобильным транспортом из Лой-Янга в Гастингс, где он будет сжижен для экспорта в Японию. Пилотный проект стоимостью 500 миллионов долларов, как ожидается, будет производить только три тонны водорода с 2020 года. К 2030-м годам при промышленном производстве предусматривается стоимость около 2 долларов США/кг. японская водородная дорожная карта говорит об этом проекте, что "статус прогресса и вероятность успеха должны быть подтверждены к 2025 году." Австралийская Дорожная карта предполагает, что в то же время щелочной электролиз может быть использован при цене менее 4 долларов США/кг. Ожидается, что экспортные рынки для большого количества сжиженного водорода будут расширены.

На северо-западе Австралии, к востоку от Порт-Хедленда и к югу от Брума, [планируется построить азиатский центр возобновляемой энергетики](#) мощностью 26 ГВт на 65 000 кв. км земли, причем большая часть его продукции будет использоваться для производства экологически чистых водородных продуктов для внутреннего и экспортного рынков, в частности аммиака для экспорта. В октябре 2020 года первая очередь из 15 ГВт получила экологическое одобрение. Окончательное инвестиционное решение ожидается в 2025 году, а начало строительства - в 2026 году. Общая стоимость капитала оценивается в 36 миллиардов долларов.

В Южной Австралии в порт-Линкольне компания Hydrogen Utility (H2U) разрабатывает электролизер мощностью 30 МВт. Этот продукт будет представлять собой 18 000 тонн аммиака для местного сельского хозяйства наряду с 32 МВт газовых турбин открытого цикла, работающих на водороде для обеспечения пиковой нагрузки. В Crystal Brook Neoen рассматривает планы строительства "водородного Суперкубка" с электролизером мощностью 50 МВт, питаемым 300 МВт ветра и солнечной энергии, чтобы производить зеленый водород со скоростью 20 тонн в день.

## Производство водорода

Почти весь водород сегодня производится из углеродных материалов, имеющих значительные выбросы CO<sub>2</sub>. Мировое производство составляет около 70 миллионов тонн\* чистого водорода плюс 45 миллионов тонн, смешанных с другими газами и используемых в таких отраслях промышленности, как производство стали и метанола, которые постоянно растут.\*\* Небольшое количество производится электролизом воды.

\* В термическом выражении: 8400 ПДж / год, примерно столько же, сколько тепловой эквивалент американской ядерной электроэнергии.

\*\* Международное энергетическое агентство, [будущее водорода – использование сегодняшних возможностей](#), доклад, подготовленный МЭА для G20, Япония (июнь 2019 года)

Смета расходов на 2019 год (без учета затрат на выбросы CO<sub>2</sub>):

- ING: около € 1,50/кг для серого водорода, €2,50/кг для синего водорода и €5-6 / кг для зеленого водорода.
- Bloomberg New Energy Finance: зеленый водород колеблется от \$ 2,50/кг до \$6,80/кг, но потенциально сократится до \$1,40/кг к 2030 году.
- Aurora Energy Research в 2020 году установила нивелированные затраты на производство (более высокая теплотворная способность, реальная, 2018 год) на уровне около €40/МВтч (€1,6/кг) для обычного серого водорода, €50/МВтч (€2/кг) для голубого водорода и €80/МВтч (€3,2/кг) для зеленого водорода.

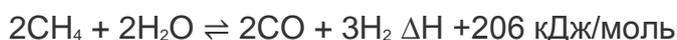
- S&P Global Platts в августе 2020 года: обычный серый водород - 1,24 евро/кг, синий водород - 1,31 евро/кг и зеленый водород (полимерный электролит мембранного электролиза, включая капитальные затраты) - 3,43 евро / кг.
- Данные Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) в 2019 году составили: \$4,15/кг для нормального электролиза, \$3,23/кг для специализированного ядерного высокотемпературного парового электролиза (HTSE) и \$2,50/кг для внепикового HTSE, конкурирующего с крупномасштабным паровым риформингом метана (серого водорода).
- LucidCatalyst в 2020 году: \$2/кг желтого водорода от обычной ядерной энергетики, потенциально снизившись вдвое к 2030 году. В базовом энергетическом выражении \$2 / кг составляет \$ 16,7 / ГДж (более низкая теплотворная способность) – значительно выше большинства цен на природный газ. LucidCatalyst предполагает, что \$1,50/кг чистого водорода было бы конкурентоспособно в целом с высокими ценами на нефть, но менее \$1/кг было бы необходимо с дешевой нефтью.

В середине 2020 года было начато строительство 14 новых проектов по производству водорода, в основном основанных на возобновляемых источниках энергии, некоторые из которых были направлены на международную торговлю. Институт энергетической экономики и финансового анализа (IEEFA) консервативно оценивает, что 2,9 миллиона тонн в год из таких источников, вероятно, будут доступны в 2030 году. По оценкам Международного энергетического агентства (МЭА), мировое производство водорода в 2019 году высвободило 830 миллионов тонн углекислого газа, что эквивалентно 2,2% выбросов, связанных с энергетикой.

### Паровой риформинг метана, газификация угля

Большая часть водорода сегодня производится путем парового риформинга природного газа (метана, отсюда "SMR"). Около одной четверти поставок приходится на уголь, который реагирует с паром и кислородом при высокой температуре и давлении с образованием синтез-газа, содержащего водород с монооксидом углерода. Они производят так называемый серый водород, если только выбросы CO<sub>2</sub> существенно не уменьшаются за счет улавливания и хранения углерода (уху), и в этом случае речь идет о голубом водороде.

При парометановом риформинге метан вступает в реакцию с паром под давлением 3-25 бар в присутствии катализатора с образованием водорода и монооксида углерода (с небольшим количеством углекислого газа). Паровой риформинг является эндотермическим и использует пар при температуре от 700 °C до 1000 °C.



$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2 \quad \Delta H -41 \text{ кДж / моль}$  – реакция водогазового сдвига (экзотермическая)

Газификация угля аналогична, реагируя углерод в угле с кислородом и паром при высокой температуре и давлении:



$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2 \quad \Delta H -41 \text{ кДж / моль}$  – реакция водогазового сдвига (экзотермическая)

Поскольку около 76% чистого водорода производится из природного газа и 23% - из угольной газификации, это приводит к ежегодному выбросу 830 тонн CO<sub>2</sub> – каждая тонна водорода, производимого SMR, дает по меньшей мере 11 тонн CO<sub>2</sub>.

Завод Great Plains Synfuel в США производит 1300 тонн водорода в сутки в виде богатого водородом синтез-газа от газификации бурого угля с использованием уху. Примерно

половина<sub>CO2</sub> захватывается и продается на два нефтяных месторождения для повышения нефтеотдачи пластов.

Air Products в Порт-Артуре, штат Техас, использует SMR, использующую вакуумно-качающуюся адсорбционную технологию разделения газов (а не поглощение Аминов) для улавливания углерода с 2013 года. Он захватывает около 90%<sub>CO2</sub> и продает около 1 млн т/год для повышения нефтеотдачи поблизости. Министерство энергетики США (DOE) профинансировало две трети стоимости проекта.

В проекте [Quest](#) в Альберте, Канада, водород производится SMR и неизвестная доля<sub>CO2</sub> – до 1 Мт/год-хранится в 2 км под землей.

Австралийские планы газификации бурого угля предусматривают экономичность установок мощностью более 500 т/сут, поэтому для достижения масштаба они полагаются на экспорт.

## Пиролиз

Так называемый бирюзовый водород можно получить путем пиролизного разложения метана, используя реактор расплавленного металла с каталитически активным сплавом Ni-Vi, оставляя твердый углеродный остаток. Процесс нагрева может происходить от сжигания водородного продукта или метана, или электрической дуги. В качестве альтернативы можно использовать плазменный реактор.

$CH_4 -> C + 2H_2$  (эндотермический)

## Электролиз

Электролиз воды при температуре окружающей среды требует около 55 кВт\*ч на килограмм производимого водорода (следовательно, 60% и потенциально 70% эффективности). Сегодня она осуществляется в довольно небольших масштабах, производя лишь около 2% мировых поставок ([МЭА, 2019](#)). Для этого требуется вода высокой чистоты, поэтому электролизеры нуждаются в интегрированном деионизаторе, позволяющем им использовать довольно низкосортную питьевую воду.

Недавние планы в нескольких странах были сосредоточены на производстве зеленого водорода электролизом. На этом основаны планы по массовому развертыванию электролизеров, подпитываемых избытком электроэнергии из возобновляемых источников. Это означало бы, что увеличение использования прерывистых возобновляемых источников энергии приведет к меньшему сокращению производства и, таким образом, оправдывает такой избыток мощностей при низком использовании (из-за перебоев в работе ветра и солнца). Однако низкие коэффициенты мощности для электролизеров приводят к высоким затратам на водород.

\* Предел термодинамической эффективности составляет 40 кВтч/кг, а 45 кВтч / кг считается вероятным наилучшим достижимым показателем. Тем не менее Rolls-Royce предлагает выход 87 000 т водорода в год от электролиза с использованием своего британского SMR, производящего 3,5 ТВтч/год.

Высокотемпературный паровой электролиз на основе твердооксидных электролизеров (SOECs) требует примерно на треть меньше энергии, но еще не является коммерческим. Соес работают при температуре более 600 °C (и по существу являются твердооксидными топливными элементами, работающими в регенеративном режиме). Твердым оксидным электролитом обычно является цирконий (диоксид циркония, ZrO<sub>2</sub>). Такой источник тепла, как ядерный, привел бы его к конфликту.

Поскольку водород может храниться гораздо легче, чем электричество, это является важным потенциальным применением избыточной энергии из прерывистых

возобновляемых источников, а также для ядерной энергетики, особенно в нерабочее время. Две атомные станции США устанавливают небольшие электролизеры для экспериментального производства водорода вне пика, с тем чтобы, возможно, перейти к высокотемпературному паровому электролизу. Однако производство из электролизеров стоит дорого.

Большинство крупномасштабных производств водорода используют щелочные электролизеры (АЭ), но полимерные электролитные мембраны, также известные как протонные обменные мембраны (Пэм), более подходят, чем щелочные электролизеры для малых и средних водородных установок, поскольку они компактны и более эффективно управляют переменным питанием от возобновляемых источников.\* Они также работают при более низких температурах и производят чистый водород. Затраты на электролизер трудно проверить, но для типа PEM было сообщено \$850 / кВт, а МЭА котирует \$500/кВт для самых дешевых щелочных электролизеров, а для китайских щелочных электролизеров-\$200/кВт. LucidCatalyst использует среднюю цифру \$ 500 / кВт. На другой основе электролизеры PEM котируются при производстве водорода по цене \$ 4,9 / кг, ае - по цене \$3,8/кг.

\* Блоки АЭ используют гидроксид калия для образования  $H_2$  и  $O_2$  на электродах, блоки Пэм каталитически расщепляют воду.

МЭА [перспективы энергетических технологий 2020](#) в ее устойчивом развитии сценария проектов глобального электролизера емкость увеличивается примерно 170 МВт в 2019 году (с 25,4 МВт добавил, что год) около 500 ГВт к 2040 году около 1400 ГВт к 2050 году и более 3300 ГВт к 2070 работает на 46% КИУМ – около 4000 часов полной нагрузки в год.

Германия стремится к 2030 году обеспечить 5 ГВт установленной мощности электролизера.

BP ведет исследование по производству до 45 000 тонн водорода в год на электролизной установке мощностью 250 МВт в Роттердаме, подключенной к морским ветряным электростанциям. Если бы две трети этого производства заменили водород из природного газа парового риформинга, это исключило бы 350 000 тонн выбросов  $CO_2$  в год с нефтеперерабатывающего завода BP.

В Германии Эрстед и EdF Germany планируют построить электролизер мощностью 30 МВт в Хайде на побережье Северного моря, где соединяется ряд ветряных электростанций. Проект стоимостью 89 миллионов евро имеет государственную субсидию в размере 30 миллионов евро. Крупнейший в Германии электролизер PEM-10 МВт-вводится в эксплуатацию в конце 2020 года на нефтеперерабатывающем заводе Shell Rhineland.

Siemens Smart Infrastructure и WUN H2 заключили контракт на строительство завода по производству водорода в Вунзиделе в Северной Баварии к концу 2021 года рядом с существующим батарейным блоком мощностью 8 МВт. Завод будет использовать электролизер PEM "Silyzer 300" от Siemens Energy, работающий на 6 МВт исключительно из возобновляемых источников энергии, производя 900 т/год на первой фазе, расширяемой до 2000 т/год. Siemens рассматривает его как демонстрационный завод.

В Эмсхафене в Нидерландах проект NorthH2 планируется производить 800 000 тонн зеленого водорода в год из 10 ГВт мощности морского ветра, используя около 750 МВт электролизеров. Фаза 1 будет построена к 2030 году, фаза 2-к 2040 году.

В Бельгии проект Huport Ostend направлен на использование сокращенной мощности ветрогенерации страны, первоначально с 2,26 ГВт и увеличенной до 4 ГВт. Он начнется с

электролизера мощностью 50 МВт, который будет производить 100 000 тонн зеленого водорода в год.

В Провансе, Франция, проект HyGreen планирует производить 12 000 тонн зеленого водорода в год из 900 МВт солнечной энергии, используя 760 МВт электролизеров, с хранением в Соляных пещерах. Фаза 1 запланирована на 2022 год, а полный проект-на 2027 год.

Также во Франции проект H2V59 планирует производить 28 000 тонн водорода в год с использованием электролизера мощностью около 100 МВт для закачки в сеть природного газа.

В Великобритании проект Equinor H2H Saltend планирует производить 125 000 тонн голубого водорода в год для промышленного парка из автотермического риформера мощностью 600 МВт с CCS.

В Японии электролизер мощностью 10 МВт в паре с 20 МВт солнечной фотоэлектрической энергии начал работать в 2020 году.

Проект стоимостью 5 миллиардов долларов рядом с Neom в Саудовской Аравии предусматривает использование 4 ГВт возобновляемых источников энергии для производства 237 000 тонн зеленого водорода в год с использованием электролизеров Thyssenkrupp, а затем зеленого аммиака к 2025 году. Производство 1,2 млн т аммиака в год на экспорт будет осуществляться компанией Haldor Topsoe technology (по сути, Haber-Bosch). Аммиак будет диссоциирован, чтобы сделать водород для грузовиков FCEV и автобусов в Европе или где-то еще. Он может появиться в сети в 2025 году.

В Северо-Западной Австралии запланированный азиатский центр возобновляемой энергетики планирует 15 ГВт возобновляемой энергии, занимающей 6500 кв. км земли, с 12 ГВт производства, производящего 500 000 тонн зеленого водорода в год, в основном для экспорта, используя около 1 ГВт электролизеров. Окончательное инвестиционное решение по проекту стоимостью 15 миллиардов долларов США должно быть принято в 2025 году.

В Донгаре в Западной Австралии Infinite Blue Energy планирует запустить свой проект Arrowsmith стоимостью 300 миллионов долларов в 2022 году. Он будет использовать 160 МВт энергии ветра и солнца и производить около 900 тонн зеленого водорода в год.

В Экьянци, Внутренняя Монголия, китайская государственная компания jingneng Power планирует потратить 23 млрд юаней (\$3 млрд) на гибридную солнечную, ветровую, водородную и складскую установку мощностью 5 ГВт, которая будет запущена в эксплуатацию в 2021 году. Производство зеленого водорода составит более 400 000 тонн в год.

База данных S&P Global Platts Analytics по глобальному производству водорода в 2020 году выявила 1 ГВт объявленных мощностей по производству электролизеров, которые должны быть введены в эксплуатацию в течение следующих пяти лет, половина из которых ожидается к концу 2022 года. Германия занимает около 20% мирового рынка электролизеров, за ней следуют Япония и Китай.

Перспективы [энергетических технологий МЭА 2020](#) в своем сценарии устойчивого развития прогнозируют увеличение производства электролизеров примерно с 1,5 ГВт/год в 2019 году до примерно 60 ГВт/год к 2070 году, а стоимость (по-видимому, для PEM) упадет с \$850-1100/КВЭ сегодня до ниже \$300 / КВЭ около 2070 года.

## Роль ядерной энергетики

Атомная энергетика уже производит электроэнергию как основной энергоноситель. Работая при очень высоких коэффициентах мощности, он хорошо подходит для получения водорода с нулевым содержанием углерода. Эволюция роли ядерной энергии в производстве водорода на протяжении, возможно, двух десятилетий видится в следующем::

- Холодный электролиз воды, использующий внепиковую мощность (требуется 55 кВтч/кг).
- Использование ядерного тепла для содействия паровому риформингу природного газа.
- Высокотемпературный паровой электролиз с использованием тепла и электричества ядерных реакторов.
- Высокотемпературное термохимическое производство с использованием ядерного тепла.

Паровой риформинг метана (SMR) требует температуры более 700 °С, чтобы объединить метан и пар для получения водорода и монооксида углерода. Ядерный источник тепла уменьшил бы потребление природного газа примерно на 30% (то есть ту часть сырья, которая была бы просто для тепла) и исключил бы дымовые газы CO<sub>2</sub> выбросы. Кроме того, эффективность всего процесса (первичное тепло-водород) изменяется примерно с 25% при использовании современных реакторов, приводящих в действие электролиз (33% для реактора x 75% для ячейки), до 36% при использовании более эффективных реакторов, до 45% при высокотемпературном электролизе пара, до 50% и более при прямом термохимическом производстве.

Высокотемпературный паровой электролиз (HTSE, при 600 °С и более) в твердооксидном электролизе (SOEC) для использования как тепла, так и электричества был продемонстрирован и показывает значительные перспективы. Это обратная реакция технологии твердооксидных топливных элементов. Он требует примерно на треть меньше энергии, чем низкотемпературный электролиз, но никогда не был коммерциализирован из-за плохой долговечности керамических компонентов в горячей водородной среде. Американские исследования проводятся в Национальной лаборатории штата Айдахо совместно с Ceramatec и FuelCell Energy в рамках проекта стоимостью 12,5 миллиона долларов, частично финансируемого Министерством энергетики США. LucidCatalyst показывает, что он производит водород при двух третях стоимости низкотемпературного электролиза в диапазоне коэффициентов мощности.

МАГАТЭ разработало [программу экономической оценки водорода \(НЕЕР\)](#) для оценки экономической эффективности крупномасштабного производства водорода с использованием ядерной энергии.

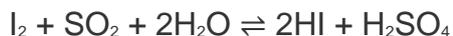
### Водород непосредственно из ядерного тепла

Для получения водорода из воды разрабатывается несколько прямых термохимических процессов. Для экономичного производства требуются высокие температуры, обеспечивающие быструю пропускную способность и высокую эффективность преобразования. Они по существу не используют электричество.

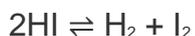
В каждом из ведущих термохимических процессов при высокотемпературном (800-1000°С), низкотемпературном эндотермическом (теплопоглощающем) разложении серной кислоты образуются кислород и диоксид серы:



Тогда есть несколько возможностей. В процессе йод-сера (IS), изобретенном General Atomics в 1970-х годах, йод соединяется с SO<sub>2</sub> и водой для получения йодистого водорода. Это реакция Бунзена и является экзотермической, протекающей при низкой температуре (120 °C):

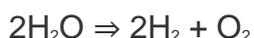


Затем HI диссоциирует с водородом и йодом при температуре около 350-450°C, эндотермически:



Это может доставить водород под высоким давлением.

Объединяя все это, чистая реакция тогда:



Все реагенты, кроме воды, рециркулируются, стоков нет, поэтому его можно назвать серно-йодным циклом с нулевым содержанием углерода, водорода и кислорода.

В феврале 2010 года японское агентство по атомной энергии (JAEA) создало исследовательский центр по применению водорода и тепла HTGR в Оараи для разработки эксплуатационной технологии установки IS для термохимического получения водорода. Он продемонстрировал лабораторное и стендовое производство водорода с использованием процесса IS, до 30 л / ч. Параллельно с разработками JAEA HTTR был осуществлен экспериментальный проект по испытанию установки, производящей водород на 30 м<sup>3</sup>/ч из гелия, нагретого с помощью 400 кВт, проверена инженерная осуществимость процесса ИС. Установка ИС, производящая 1000 м<sup>3</sup>/ч (90 кг/ч, 2 т/сут) водорода, должна была быть подключена к HTTR для подтверждения эффективности интегрированной производственной системы, предусмотренной на 2020-е гг. в 2014 г. было продемонстрировано производство водорода со скоростью до 20 л / ч. В январе 2019 года он использовал HTTR для получения водорода с использованием йодно-серного процесса в течение 150 часов непрерывной работы. JAEA стремится производить водород менее чем за 3 доллара / кг примерно к 2030 году с помощью реакторов с очень высокой температурой.

Американская исследовательская инициатива в области ядерной энергетики (NERI), начатая в 1999 году, была переориентирована в 2004 году на включение ядерной водородной инициативы (NHI), связанной с программой создания атомных станций следующего поколения (NGNP), созданной в 2005 году. НГНП предусматривала строительство и эксплуатацию опытного образца высокотемпературного газоохлаждаемого реактора (ВТР) и связанных с ним установок по производству электроэнергии или водорода к 2021 году, но при администрации Обамы финансирование было сокращено, а в 2013 году деятельность по предварительной лицензии была приостановлена.

В соответствии с международным соглашением NERI, Sandia National Laboratories в США и французская CEA с General Atomics в США также разрабатывали процесс IS с целью использования для него высокотемпературных реакторов. Они построили и эксплуатировали лабораторный контур для термохимического расщепления воды.

Южная Корея также продемонстрировала термохимическое расщепление воды в лабораторных масштабах, поддержанное компанией General Atomics. В декабре 2008 года комиссия РК по атомной энергии официально утвердила разработку ядерного водорода в качестве национальной программы с разработкой ключевых и базовых технологий до 2017 года и целью демонстрации производства ядерного водорода с

использованием процесса S-I и очень высокотемпературного реактора (VHTR) к 2026 году.

Экономика производства водорода зависит от эффективности используемого метода. Ожидается, что цикл ИС, соединенный с модульным высокотемпературным реактором, будет производить водород примерно по цене \$ 2,00/кг. Побочный продукт кислорода также имеет значение. Ранее General Atomics прогнозировала \$1,53/кг на основе HTR мощностью 2400 МВт, работающего при температуре 850°C с общим КПД 42%, и \$1,42/кг при температуре 950°C и КПД 52% (обе ставки дисконтирования 10,5%). Такая установка могла бы производить 800 тонн водорода в сутки.

Для термохимических процессов прогнозируется общий КПД более 50%.

### Требования к технологическому теплу производственного реактора

Для производства водорода требуется высокая температура-750-1000 °C, а при 1000 °C эффективность конверсии втрое выше, чем при 750 °C. химическую установку необходимо изолировать от соседнего реактора, по соображениям безопасности, возможно, используя промежуточный гелий или расплавленный фторидный контур.

Были определены три потенциально пригодные концепции ядерных реакторов, хотя только первая из них достаточно хорошо разработана, чтобы двигаться вперед:

- Высокотемпературный газоохлаждаемый реактор (ХТР), либо галечный слой, либо гексагональный тип топливного блока. Модули мощностью до 285 МВт будут работать при температуре 950°C, но могут быть и более горячими.
- Усовершенствованный высокотемпературный реактор (АНТР), модульный реактор, использующий покрытое частицами графитовое матричное топливо и расплавленную фторидную соль в качестве теплоносителя первого контура. Это похоже на HTR, но работает при низком давлении (менее 1 атмосферы) и более высокой температуре, а также обеспечивает лучшую теплопередачу. Предусмотрены размеры 1000 МВт / 2000 МВт.
- Быстрый реактор с свинцовым охлаждением, хотя они работают при более низких температурах, чем HTRs – Наиболее развитым является российский реактор Брест, который работает всего при температуре 540 °C. американский проект-STAR-H<sub>2</sub>, который будет поставлять 780 °C для производства водорода и более низкие температуры для опреснения.

Они более полно описаны на [информационной странице малых ядерных энергетических реакторов](#) (с характеристиками теплоносителя) и на [странице передовых ядерных энергетических реакторов](#).

Для температур выше 750°C расплавленные фторидные соли являются предпочтительной пограничной жидкостью между ядерным источником тепла и химическим заводом. Индустрия выплавки алюминия обеспечивает значительный опыт в управлении ими безопасно. Горячая расплавленная соль может также использоваться с вторичным гелиевым хладагентом, генерирующим энергию по циклу Брайтона, с тепловым КПД от 48% при 750°C до 59% при 1000°C. остаются значительные проблемы в достижении устойчивых температур для коммерческого производства водорода на установке, построенной для химических и тепловых условий.

### Использование водорода

#### Добавка в сетевой природный газ

В большинстве трубопроводов 15-20% водорода может быть добавлено к природному газу, но с новыми магистральными трубопроводами, такими как Северный поток в Европе, доля может достигать 70% для транспортировки водорода на международные рынки.

В США Институт газовых технологий в настоящее время тестирует все компоненты инфраструктуры транспортировки и распределения природного газа США для различных смесей водородных фракций с природным газом, чтобы определить, сколько водорода может быть смешано в существующих системах природного газа.

В соответствии со стратегией преобразования энергии в газ Uniper имеет пилотную установку мощностью 2 МВт для производства до 360 м<sup>3</sup>/ч водорода в Фалькенхагене, Германия, для подачи в газовую сеть Ontras, которая может функционировать с 5% водорода. Vattenfall в Пренцлау в Германии также экспериментирует с производством и хранением водорода из энергии ветра с помощью электролиза. Кроме того, в Германии, недалеко от Нойбранденбурга на северо-востоке, WIND-проект использует избыточную электроэнергию от ветроэлектростанции мощностью 140 МВт для производства водорода, хранения его, а затем сжигания в комбинированной теплоэнергетической установке (ТЭЦ) для производства электроэнергии, когда спрос высок. Однако в этом демонстрационном процессе H<sub>2</sub>-WKA (возобновляемый водород - Werder, Kessin, Altentreptow) потери составляют 84%.

Самая большая действующая электростанция Германии на газе - это энергоблок мощностью 6 МВт в Энергопарке Майнц. RWE и Siemens планируют пилотный проект по преобразованию мощности в газ мощностью 105 МВт, GET H<sub>2</sub>, в Лингене, используя энергию ветра, а также два других аналогичных проекта: Element Eins и Hybridge. В Нидерландах Gasunie планирует построить энергоблок мощностью 20 МВт. BNetzA прогнозирует потенциал преобразования электроэнергии в газ в объеме 3 ГВт к 2030 году.

### Нефтеперерабатывающий

Водород является ключевым технологическим агентом в нефтепереработке, для десульфурации и каталитического крекинга длинноцепочечных углеводородов.\* Около четверти мирового производства используется для преобразования низкосортных сырых нефтей (особенно из битуминозных песков) в жидкие и энергонасыщенные транспортные виды топлива, такие как бензин и дизельное топливо. Тяжелое ароматическое сырье преобразуется в более легкие алкановые углеводородные продукты в широком диапазоне очень высоких давлений (7000-14 000 кПа) и высоких температур (400-800°С) с использованием водорода и специальных катализаторов. Это также важно для удаления загрязняющих веществ, таких как сера из этих видов топлива.

\* например, (СН)<sub>n</sub> битуминозные пески или (СН<sub>1,5</sub>)<sub>n</sub> тяжелая сырая нефть до (СН<sub>2</sub>)<sub>n</sub> транспортное топливо около 42-45 МДж/кг (32-39 МДж/л). Модернизация тяжелой сырой нефти и битуминозных песков требует от 3 до 4 килограммов водорода на баррель (159 литров) продукта.

### Производство аммиака

Синтез водорода и азота для получения аммиака – около 180 т/год или 1 ПЧ\* – составляет более половины мирового спроса на чистый водород. Для этого используется процесс Хабера-Босха.

\* Исходя из 5,18 кВтч/кг аммиака, количество может быть указано в ГВтч, Пвтч и т.д.

Большая часть аммиака сегодня используется для сельскохозяйственных удобрений. Некоторые из них используются (как аммиачная селитра, с дизельным топливом) для добычи взрывчатых веществ.

Согласно Норману Борлаугу, Нобелевскому лауреату 1970 года и "дедушке зеленой революции", органического азота в почвах мира достаточно лишь для того, чтобы прокормить одну треть современного населения. Остальное должно происходить из неорганических добавок. Большинство азотных удобрений в мире производится с использованием процесса Хабера (см. ниже), сочетающего водород с обильным атмосферным азотом. Полученный аммиак затем окисляется до нитратов.

## Процесс Хабера

Процесс Хабера (Haber-Bosch Process) объединяет азот из воздуха с водородом, получаемым главным образом из природного газа (метана) в аммиак. Реакция обратима, и производство аммиака экзотермично.

Немецкий ученый Фриц Хабер изобрел способ соединения атмосферного азота с водородом в 1909 году и получил Нобелевскую премию по химии в 1918 году за создание "чрезвычайно важного средства повышения уровня сельского хозяйства и благосостояния человечества", что сейчас выглядит как значительное преуменьшение. Он был расширен инженером-химиком Карлом Бошем, поэтому часто известен как процесс Хабера-Босха. В 1931 году Босх получил Нобелевскую премию.

$N_2 + 3H_2 \rightleftharpoons 2NH_3$   $\Delta H$  -92 кДж/моль (экзотермический, с использованием металлического катализатора при высокой температуре и давлении)

Процесс Хабера производит около 180 миллионов тонн безводного аммиака в год для азотных удобрений и потребляет около 3-5% мирового производства природного газа для производства водорода для него. Азот получают криогенно из воздуха.

Глядя в будущее, аммиак может играть ключевую роль в хранении и транспортировке водорода – см. Более поздний раздел. Он также может быть использован в качестве топлива. В Японии изучаются проекты совместного сжигания аммиака с углем в котлах и аммиака с природным газом в турбинах сгорания. Аммиак также имеет потенциальное применение в качестве морского топлива, поскольку он может быть использован в судовых двигателях только с незначительной модификацией. Также его можно использовать в некоторых топливных элементах.

## Производство метанола и дмэ топлива

Учитывая проблемы хранения и переносимости самого водорода, а также радикальный переход на автомобили на топливных элементах, существует некоторое использование метанола в качестве добавки к бензину/бензину. Любое будущее жидкое топливо для автомобилей должно конкурировать с бензином на уровне 32 МДЖ/л или дизельным топливом на уровне 39 МДЖ / л и быть не более трудным для хранения и заправки, чем сжиженный газ. Метанол (CH<sub>3</sub>OH) имеет 16 МДЖ/л. Он может быть использован в топливных элементах.

СПГ имеет аналогичную проблему с водородом, этанол обычно поступает из биомассы, но метанол может быть изготовлен из CO<sub>2</sub> и водорода. Используя водород с нулевым содержанием углерода и обилие CO<sub>2</sub>, автомобильное топливо может быть обеспечено навсегда, используя современную технологию двигателей.

Для дизельных двигателей лучше использовать диметиловый эфир (CH<sub>3</sub>-O-CH<sub>3</sub>, DME), который получают обезвоживанием пары молекул метанола. Это газ, но он может храниться под низким давлением в виде жидкости, например сжиженного газа. DME имеет плотность энергии 18-19 МДЖ / л, поэтому меньше, чем топливо на масляной основе, но пригодно для использования и легко хранится. Любое будущее после нефти может быть основано на метаноле.

Метанол сегодня производится различными способами, но в идеале он будет производиться из атмосферного  $\text{CO}_2$  с водородом, получаемым ядерной энергией, и с использованием большего количества ядерной энергии в процессе конверсии.

$\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \Rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$   $\Delta H$  -49,5 кДж/моль при 25°C, -58 при 225°C, экзотермический

(Эндотермическая обратная реакция сдвига воды  $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \Rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$  будет происходить одновременно, наряду с:  $\text{CO} + 2\text{H}_2 \Rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$   $\Delta H$  -91 -98 кДж/ моль, экзотермическая)

Диметиловый эфир образуется в реакции дегидратации:

$2\text{CH}_3\text{OH} \Rightarrow \text{CH}_3\text{OCH}_3 + \text{H}_2\text{O}$   $\Delta H$  -23 кДж/моль

Производство метанола и ДМЭ происходит при относительно низкой температуре (по сравнению с термохимическим производством водорода) - 230-350°C.

DME уже используется в качестве замены пропана, а мировые производственные мощности составляют более 10 миллионов тонн в год. Только Китай стремился к 20 миллионам тонн мощности DME в год к 2020 году. Швеция производит BioDME из черного ликера. Ford произвел автомобиль с двигателем DME-1,6-литровый Mondeo, в рамках трехлетнего проекта XME, возглавляемого Ford совместно с членами fvv, международной исследовательской сети по технологиям двигателей внутреннего сгорания Германии.

Большая часть производства метанола сегодня производится из синтез-газа (монооксид углерода и водород), полученного из биомассы или ископаемого топлива, или из водорода путем парового риформинга природного газа. Большая часть метанола используется для изготовления пластмасс. Около 14% его используется в качестве присадки к бензину и 7% - Для изготовления ДМЭ. Производство метанола составляет около 13% мирового спроса на водород.

Производство этанола описано на странице информации о технологическом нагреве.

Метанол, вместе с производным ДМЭ, может быть использован в качестве:

- Удобный носитель для хранения энергии.
- Легко транспортируемое и расходуемое топливо для двигателей внутреннего сгорания и дизельных двигателей (с воспламенением от сжатия) с небольшими инженерными изменениями.
- Топливо для топливных элементов.
- Сырье для синтетических углеводов и продуктов их переработки, включая топливо, полимеры и даже одноклеточные белки (для корма животных и/или потребления человеком).

В Исландии производство метанола уже осуществляется с использованием  $\text{CO}_2$ , полученного из дымовых газов, и водорода, полученного электролизом с использованием возобновляемых источников энергии. Компания [Carbon Recycling International](#) была создана в 2006 году для производства возобновляемого метанола для использования в автомобилестроении, а также биодизельного топлива.

В Китае Шанхайский институт перспективных исследований разработал процесс превращения  $\text{CO}_2$  и водорода в длинноцепочечные углеводороды, такие как бензин. Многофункциональный катализатор, содержащий оксид индия, смешанный с цеолитом, первоначально производит метанол, который затем взаимодействует с цеолитом с образованием длинноцепочечных углеводородов. Другая исследовательская группа в Даляньском Институте химической физики использует магнетитовый и

цеолитовый катализаторы для получения длинноцепочечных углеводородов из  $\text{CO}_2$  и водорода, но с различными промежуточными продуктами. В то время как существует ряд процессов, которые могут преобразовать  $\text{CO}_2$  для одноуглеродных углеводородов, таких как метанол, синтез длинноцепочечных углеводородов ранее был труднодостижимым.

В 2018 году мировые мощности по производству метанола достигли около 140 млн тонн и, как ожидается, достигнут 280 млн тонн к 2030 году, сообщает Statista. Институт метанола цитирует мировую мощность в 110 млн тонн (без даты, на своем [веб-сайте](#)), но публикует цифры, указывающие примерно на 150 млн тонн мощности и 100 млн тонн спроса в 2020 году.

Водород также может вступать в реакцию с углекислым газом при температуре 300-400°C с образованием метана, используя экзотермический процесс Сабатье.\*

\*  $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \Rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ . Это, по-видимому, имеет большее отношение к космическим путешествиям, чем транспорт на Земле, хотя в небольших масштабах он будет очищать  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$  от потоков водорода для топливных элементов.

### Использовать непосредственно в качестве топлива для транспорта-топливные элементы

При сжигании водорода образуется только водяной пар, без углекислого газа или окиси углерода. Однако, если он не является жидким, он далек от того, чтобы быть энергетически плотным топливом объемно, и это ограничивает его потенциальное использование, особенно для легких транспортных средств. Там больше возможностей для грузовиков. Аммиак более энергонасыщен и сгорает до водяного пара и  $\text{NO}_x$  или азота.

Водород можно сжигать в обычном двигателе внутреннего сгорания, и некоторые испытательные машины были оборудованы таким образом. Проводились также испытания на самолетах. Примерно до 2010 года двигатель внутреннего сгорания был основной доступной технологией, доступной для использования водорода.\*

\* Было построено сто BMW Hydrogen 7, и эти автомобили прошли более 2 миллионов километров в рамках программ испытаний по всему миру. BMW-единственный производитель автомобилей, который использовал водород, хранящийся в жидком состоянии. BMW отказалась от этой разработки и сотрудничает с Toyota в области автомобилей на топливных элементах.

Для транспорта водород в основном используется в топливных элементах. Топливный элемент-это концептуально заправляемая батарея, производящая электричество как прямой продукт химической реакции. Но там, где обычная батарея имеет все активные ингредиенты, встроенные на заводе, топливные элементы снабжаются топливом из внешнего источника и кислородом из воздуха. Они катализируют окисление водорода непосредственно до электричества при относительно низких температурах. Топливные элементы с протонной обменной мембраной (PEM) являются основным типом, используемым в автомобилях и тяжелых транспортных средствах. Они работают при температуре около 80-90°C и имеют около 60% эффективности преобразования химической энергии в электрическую для привода колес электромобиля. Однако на практике примерно половина этого была достигнута, за исключением высокотемпературных твердооксидных топливных элементов-46%.

В настоящее время топливные элементы гораздо дороже в изготовлении, чем двигатели внутреннего сгорания (сжигающие бензин/бензин или природный газ). В начале 2000-х годов установки PEM стоили более 1000 долларов за киловатт по сравнению со 100 долларами за кВт для обычного двигателя внутреннего сгорания. Целевая стоимость стека топливных элементов PEM для FCEV составляет менее €100 / кВт, что потребует снижения количества палладиевого катализатора.

Технология прямого метанольного топливного элемента (DMFC) практична для портативных электронных устройств, но в настоящее время не является предпочтительной для использования в автомобилестроении. Другие технологии топливных элементов включают: высокотемпературный протоннообменный мембранный топливный элемент (PEMFC), работающий до 200°C, который менее уязвим к отравлению катализатора CO; фосфорнокислотный топливный элемент (PAFC) – хорошо развитый, но высокотемпературный и используемый только для стационарной выработки электроэнергии; твердооксидный топливный элемент – SOFC) - работающий более 800°C, следовательно, в основном используемый для стационарной выработки электроэнергии.; а расплавленный карбонатный топливный элемент (МКФУ)-высокотемпературный (около 650°C) и принимающий различные виды топлива, для стационарной выработки электроэнергии.

Для дальнемагистральных автобусов и грузовиков силовые агрегаты FCEV имеют больше перспектив, чем системы на батареях EV. Первоначальное использование водорода для транспорта-это муниципальные автобусные и грузовые автопарки, уже находящиеся на дорогах во многих частях мира. Они работают на централизованном топливе, поэтому нет необходимости в розничной сети, а бортовое хранение водорода является меньшей проблемой, чем в автомобилях. Автобусы обычно используют два блока топливных элементов мощностью около 100 кВт плюс небольшую тяговую батарею, пополняемую рекуперативным торможением. Они перевозят от 30 до 50 кг сжатого водорода, хранящегося в облицованных полимером, намотанных волокнами резервуарах под давлением 350 бар (35 МПа). Новые автобусы на топливных элементах потребляют всего 8-9 кг водорода на 100 км пробега, что хорошо согласуется по энергоэффективности с дизельными автобусами.

Меньшие FCEV находятся дальше от широкого коммерческого использования, чем EVs и PHEV, хотя в Японии в 2019 году было 3400 FCEV на дороге. Значительный рост численности населения ожидается в 2020-х гг. Китай стремился к 5000 FCEV к 2020 г. и одному миллиону к 2030 г. Кампания EV30@30 предусматривает, что к 2030 году 30% продаж новых автомобилей будут приходиться на EVs.

На рынок выходят гибридные транспортные средства на топливных элементах (FCHV) с электрическим двигателем, приводимым в движение батареей, и топливным элементом, поддерживающим заряд батареи и дающим ей больший срок службы (за счет более полной зарядки). Емкость батареи меньше, чем у обычных аккумуляторов EVs и PHEV, но весь стек топливных элементов плюс водородный бак намного легче, чем аналогичные аккумуляторы EV. Возможны подключаемые FCEVs с большей емкостью аккумулятора. Основная проблема FCEV, помимо стоимости, заключается в том, что заправочных станций пока очень мало.

Силовая установка на топливных элементах представляет собой модульную сборку. Он состоит из блока топливных элементов, системного модуля, водородных баков, батареи и электродвигателя. К августу 2020 года [Ballard](#) в США поставила более 670 МВт топливных элементов PEM, которые – в средних и тяжелых транспортных средствах, автобусах и грузовиках – разогнали более 50 миллионов километров. Около 70% из этого было в Китае.

[Proton Motor Power Systems](#) в 2020 году имеет производственную линию недалеко от Мюнхена, которая будет расширена до 10 000 модулей стека топливных элементов в год. Модульные конструкции с одним стеклом охватывают диапазон мощности от 2 до 16 кВт в нижнем классе мощности (PM200) и от 15 до 75 кВт в верхнем классе мощности (PM400). Она также разработала многоэтажную систему для потребностей в мощности свыше 100 кВт для больших грузовиков, поездов, судов и стационарных резервных

источников питания. Его первый заказ на поезд топливных элементов для системы мощностью 180 кВт должен быть доставлен в начале 2021 года. Он предусматривает, что его блоки топливных элементов будут использоваться в сочетании с батареями для гибридных легких транспортных средств с электрическим приводом, городских автобусов или для промышленного электроснабжения. Она обеспечивает системы топливных элементов мощностью 37 кВт и 67 кВт для Китая.

В 2019 году базирующаяся в Аризоне корпорация Nikola Corporation приступила к созданию совместного предприятия с IVECO в Европе для разработки и сбыта как грузовиков EV, так и тяжелых грузовиков на топливных элементах. Никола целью рынка FCEV грузовиков, а Николе два FCEV грузовик, как ожидается, на рынке в 2023 году, с 800-1200 км в диапазоне, до 750 кВт мощность от 800 вольт переменного тока, до 2700 Нм пикового крутящего момента, через одну-ступенчатой коробкой передач, и 250 кВт / ч литий-ионный аккумулятор.

Никола также планирует выпустить на рынок пикап 4x4 FCHV, Барсук, со стеком топливных элементов мощностью 120 кВт и дальностью действия 960 км (половина каждого из топливных элементов и батарей). В 2020 году GM купит 11% компании и будет выпускать Badger в версиях BEV (battery electric vehicle) и FCEV. Компания заказала 85 МВт щелочных электролизеров для поддержки водородных заправочных станций.

В апреле 2020 года Daimler Truck и Volvo Group подписали необязательное соглашение о разработке, производстве и коммерциализации систем водородных топливных элементов для тяжелых и особенно дальнемагистральных транспортных средств. Daimler планирует консолидировать свою деятельность в области топливных элементов и систем хранения водорода в рамках совместного предприятия.

Стеки топливных элементов в автомобилях имеют мощность около 100 кВт и более. По сравнению с аккумуляторными электромобилями они обычно имеют лучшую дальность полета, чем EVs – около 400-500 км – с меньшим весом автомобиля и гораздо более коротким временем заправки от трех до пяти минут. Они обычно перевозят от 4 до 7 кг водорода, хранящегося в резервуарах из углеродного волокна под давлением 700 бар (70 МПа).

Honda, Toyota и Hyundai являются основными производителями автомобилей, разрабатывающими FCEVs. Ford, Nissan, Renault и Mercedes отошли от разработки FCEV. Смотрите страницу информации об электромобилях.

Одной из проблем использования водорода в топливных элементах является общая энергоэффективность. Если ядерный реактор вырабатывает электроэнергию, которая используется для электролиза воды, а водород сжимается и используется в топливном элементе транспортного средства (предполагая 60% - ный КПД топливного элемента), то КПД намного ниже, чем если бы электричество использовалось непосредственно в ЭВ и ФЭВ.\* Однако, если водород может быть получен термохимическими средствами, эффективность удваивается, и они сравнимы с EV / PHEV.

\* Скажем: 35% x 75% x 60% x 90% = 14% оптимистично (реактор, электролиз, топливный элемент, двигатель), чтобы:  
50% x 60% x 90% = 27% для будущего термохимического водорода  
cf 35% x 90% = 31% для EV.

Помимо безуглеродного производства и последующего распределения потребителям, основной проблемой для водорода как автомобильного топлива является его хранение на борту – его невозможно хранить так же просто и компактно, как бензин или СПГ-топливо. Варианты-хранить его при очень низкой температуре (криогенно), при высоком

давлении или химически в виде гидридов. Последнее, как видно, имеет значительный потенциал, хотя заправка автомобиля менее проста.

Хранение под давлением является основной технологией, доступной в настоящее время, и это означает, что при 700-кратном атмосферном давлении (70 МПа) требуется в пять раз больший объем, чем для эквивалентного количества бензина/бензина. Весовой штраф стального резервуара уменьшается за счет использования углеродного волокна. Раньше танк был примерно в 50 раз тяжелее водорода, который он хранил, теперь он примерно в 20 раз тяжелее, а новая цель в десять раз тяжелее. Хранение для автобусов может быть на уровне 35 МПа, но для легковых автомобилей должно быть в два раза больше.

Одна перспективная система хранения гидридов использует в качестве энергоносителя борогидрид натрия с высокой плотностью энергии.  $\text{NaBH}_4$  катализируется для получения своего водорода, оставляя Борат ( $\text{NaBO}_2$ ) для переработки.

Топливные элементы в настоящее время используются в электрических вилочных погрузчиках, и ожидается, что их использование будет неуклонно расти. Они, по-видимому, стоят намного больше, чем батареи, но служат в два раза дольше (10 000 часов) и имеют меньше времени простоя.

Проект Hydrogen Mobility Europe (H2ME), объявленный в 2015 году, продлится более шести лет при поддержке совместного предприятия топливных элементов и водорода (FCH JU) при финансировании исследовательской программы ЕС Horizon 2020. Инициатива направлена на значительное расширение Европейского парка водородных транспортных средств и тем самым на подтверждение технической и коммерческой готовности транспортных средств, заправочных станций и технологий производства водорода. Она включает в себя развертывание FCEVs и водородных заправочных станций (HRS), первоначально в основном в Германии, а также тестирование способности электролизер-водородных заправочных станций помочь сбалансировать электрическую сеть. Водородные заправочные станции спроектированы таким образом, что заправка транспортных средств производится менее чем за пять минут.

В Германии есть поезд, работающий на водородном топливном элементе, [Alstom Coradia iLint](#), с дальностью действия 1600 км и находящийся в эксплуатации с сентября 2018 года. Siemens строит прототип вагона на водородных топливных элементах для Deutsche Bahn (DB) на базе гибридного аккумуляторно-электрического поезда Mireo Plus. Он использует низкотемпературные топливные элементы Ballard с более высокой плотностью мощности и более длительным сроком службы, чем у автобусов и грузовиков. Он будет иметь тяговую мощность 1,7 МВт и дальность полета 600 км со скоростью до 160 км / ч, а также 15-минутное время дозаправки. DB стремится заменить все свои дизельные поезда электрическими поездами на водородных топливных элементах.

В 2019 году во всем мире насчитывалось около 370 водородных заправочных станций, 270 из которых были общедоступны. Их было 152 в Европе, 136 в Азии и 78 в Северной Америке (большинство в Калифорнии).

### **Морское использование**

В апреле 2020 года швейцарская электротехническая компания ABB подписала соглашение с компанией Hydrogène de France (HDF) об оптимизации производства топливных элементов для производства мегаваттной электростанции для морских судов, которая будет построена на заводе HDF в Бордо, Франция. Это устройство будет опираться на технологию топливных элементов Ballard Power Systems proton exchange

membrane (PEM). АББ сказал, что водород не является единственным рассматриваемым энергоносителем. "Хотя водород обычно предпочтительнее из-за его большей эффективности, аммиак и метанол с более высокой объемной плотностью энергии делают его хорошим выбором для глубоководных перевозок. [Вполне вероятно], что мы увидим компании, использующие смесь энергоносителей в зависимости от своих потребностей."

В сентябре 2019 года японская двигателестроительная корпорация объявила о партнерстве с национальным морским исследовательским институтом (NMRI), чтобы начать разработку двигателей, работающих на водороде и аммиаке. Баллард разработал модуль топливных элементов FCwave для морских применений. Это основано на разработке ЯМР двигателей, работающих на аммиаке.

МЭА в своем сценарии устойчивого развития прогнозирует, что к 2070 году около 12% морского транспорта будет заправляться водородом и 55% - аммиаком, главным образом в двигателях внутреннего сгорания, а не в топливных элементах, причем с 2030 года этот объем топлива будет расти медленно, а с 2050 года-еще быстрее. Топливные элементы с водородом, вероятно, будут ограничены перевозкой на короткие расстояния из-за затрат на хранение. (Ядерная энергия для двигательных установок вообще не рассматривается.)

Международная морская организация (ИМО) стремится сократить углеродоемкость выбросов от судоходства по крайней мере на 40% к 2030 году и на 70% к 2050 году по сравнению с уровнем 2008 года. Годовая потребность в энергии для судоходства составляет около 12 Эдж (3300 ТВтч). Основываясь на широких консультациях, доклад Shell показал, что криогенный водород и аммиак являются двумя наиболее перспективными видами топлива для судоходства, причем внутреннее сгорание является основной технологией, доступной в краткосрочной перспективе, но топливные элементы более привлекательны в долгосрочной перспективе.

### Стационарные энергетические приложения

Топливные элементы могут использоваться для получения тепла или электроэнергии, а также комбинированного тепла и энергии.

Топливные элементы, использующие водород, также могут быть использованы для автономных малых стационарных генераторных установок для электроснабжения удаленных районов во внесетевых зонах. Это особенно важно в тех случаях, когда работа при более высоких температурах (*например*, в твердооксидных топливных элементах) и хранение водорода могут представлять меньшую проблему, чем в транспортных средствах, или когда водород ретикулируется подобно природному газу. Установки когенерационных топливных элементов для внутренней энергетики и теплоснабжения были развернуты в Японии в рамках программы субсидирования до 2012 года.

Рынок приложений резервного питания приобретает все большее значение. Резервные приложения включают в себя как аварийное электропитание, так и источник бесперебойного питания (ИБП), а также резервное копирование электроэнергии из прерывистых возобновляемых источников.

### Уголь и биомасса к жидким углеводородным топливам

Уголь и биомасса могут быть основой для жидких углеводородных топлив, и так было почти столетие, с некоторой зависимостью от водорода.

Процесс Фишера-Тропша был первоначально разработан в Германии в 1920-х годах, и основанный на угле обеспечил большую часть топлива для Германии во время Второй мировой войны. Затем он стал основой для значительной добычи нефти в Южной Африке компанией Sasol, которая в настоящее время поставляет около 30% бензина и дизельного топлива этой страны из угля и природного газа. Однако он является значительным потребителем водорода, катализируя реакцию с монооксидом углерода для получения жидких углеводородов. Водород теперь получают с монооксидом углерода путем газификации угля, причем часть газового потока подвергается реакции сдвига воды ( $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$ ). Используя просто черный уголь, 14 600 тонн угля производят 25 000 баррелей синтетической "нефти" (наряду с 25 000 тоннами  $\text{CO}_2$ ).

В целом:  $(2n+1)\text{H}_2 + n\text{CO} \Rightarrow \text{C}_n\text{H}_{2n+2} + n\text{H}_2\text{O}$  (где  $n$  обычно составляет 10-20)

Ядерная энергетика может быть использована для этого двумя способами. Ядерный источник водорода в сочетании с ядерным технологическим теплом более чем удвоил бы количество жидких углеводородов из угля и устранил бы большую часть выбросов  $\text{CO}_2$  из этого процесса.

В качестве альтернативы гибридная система использует ядерное электричество для электролиза воды для получения водорода и кислорода. В этом случае около 4400 тонн угля газифицируется с использованием кислорода из электролиза для получения монооксида углерода, который подается на завод Фишера-Тропша с водородом для производства 25 000 баррелей синтетического топлива "нефть". Очень мало  $\text{CO}_2$  получается, и это перерабатывается в газификатор.

Аналогичным образом из биомассы может быть получено жидкое биотопливо путем взаимодействия материала с водородом при повышенных температурах и давлениях в присутствии катализатора. Эта технология гидроочистки используется некоторыми коммерческими установками. Аналогичным образом процесс Фишера-Тропша может быть использован при гидрообработке древесных остатков для получения жидкого топлива.

### Восстановитель для металлургии, особенно для выплавки стали

Основное применение металлургического кокса-в основном углерода-в металлургии, в частности в сталеплавильном производстве в качестве восстановителя. Природный газ теперь хорошо зарекомендовал себя и в этой роли, что привело к рассмотрению вопроса о заполнении этой роли водородом и избежании выбросов  $\text{CO}_2$ . На мировую сталелитейную промышленность приходится 7-9% прямых выбросов  $\text{CO}_2$ .

Зеленая сталь - это основное направление развития, запланированное на 2020-е гг. водородная Европа предусматривает производство 20 млн тонн зеленой стали с использованием 1 млн тонн водорода к 2030 году. В Южной Австралии в Whyalla Infrabuild планирует производство зеленой стали с использованием водорода из солнечной фермы мощностью 280 МВт. Это позволило бы производить около 9000 тонн стали в год (из общего объема 1,2 миллиона тонн в год).

### Химическое сырье

Помимо синтеза аммиака и производства метанола, водород используется в некоторых химических процессах.

### Хранение и транспортировка водорода

#### Как газообразный водород или жидкость

Низкая объемная плотность энергии газообразного водорода создает проблему для транспортировки и хранения – 90 г водорода занимает один кубический метр при стандартной температуре и давлении (STP), поэтому один килограмм водорода занимает  $11,1\text{ м}^3$  при STP. Кроме того, из-за своего малого молекулярного размера он протекает легче, чем природный газ. Он также легко воспламеняется.

При стационарном хранении или переносном хранении в транспортных средствах водород сжимается, что мало что добавляет к его стоимости. Сжатие до 35 МПа требует около  $4,4\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг}^2$  и дает  $23\text{ кг}/\text{м}^3\cdot\text{ч}^2$ . Крупномасштабное хранение должно быть криогенным.

По оценкам компании Hydrogen Europe, в Европе с 1,7 миллиона километров газотранспортной сети и сеткой газопроводов 50 000 км природного газа могут быть преобразованы в водородные трубопроводы стоимостью 25 миллиардов евро. В Германии операторы газотранспортных сетей предложили реализовать магистраль водородопроводов протяженностью 5900 км путем модернизации существующих газопроводов и подключения производства водорода к промышленному спросу с помощью соляных пещер. В Нидерландах была предложена аналогичная программа, которая обойдется в 5-6 миллиардов евро, что составляет четверть стоимости строительства нового специализированного водородного трубопровода.

При хранении или транспортировке на большие расстояния водород может быть сжижен криогенным способом, но температура кипения очень низкая: минус  $253^\circ\text{C}$ . Это сравнимо с СПГ при минус  $163^\circ\text{C}$ , поэтому требуется лучшая изоляция. Плотность жидкого водорода составляет около  $71\text{ кг}/\text{м}^3$  ( $8,52\text{ МДж}/\text{л}$ ), а для его сжижения требуется до  $13\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг}^2$  (около  $47\text{ МДж}/\text{кг}^2$ ). Дополнительная стоимость, скорее всего, составит более  $\$2/\text{кг}$ .

Для импорта и экспорта морские порты рассматривают необходимые объекты для производства водорода, и Роттердам с дистрибьютором Gasunie планируют совместно построить и эксплуатировать водородопровод, соединяющий порт Роттердам в качестве водородного хаба с национальной водородной сетью, разрабатываемой Gasunie.

Япония построила танкер с жидким водородом для морской торговли.

### Как аммиак

Аммиак ( $\text{NH}_3$ ) является хорошим носителем водорода или средством длительного хранения. Это ключевая часть картины водорода, для хранения его или перемещения на большие расстояния.

Аммиак будет получен путем некоторой доработки процесса Хабер-Бош, требующего  $2\text{--}3\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг}^2$  или  $14\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$  аммиака, а затем диссоциируется с выделением водорода, требующего около  $8\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг}^2$ . Конверсия в аммиак и из него, вероятно, добавит около  $\$1/\text{кг}$  к стоимости производства водорода.

Аммиак обладает тепловыми свойствами, сходными с пропаном, легко охлаждается и сжимается в жидкую форму для транспортировки и хранения (температура кипения минус  $33^\circ\text{C}$ ), а также имеет плотность энергии, которая конкурирует с углеродными ископаемыми топливами. Он содержит 17,7% водорода по массе. Плотность энергии аммиака, составляющая  $18,6\text{ МДж}/\text{кг}^*$ , сопоставима с плотностью энергии сжатого природного газа и метанола, но примерно вдвое меньше плотности энергии бензина/бензина, дизельного топлива и сжиженного нефтяного газа (СУГ).

\*  $4,32\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{л}$  или  $5,18\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$ . Исходя из этого, количество аммиака может быть указано в ГВтч, Пвтч и т.д. как и с водородом.

Аммиак рассматривается как крупномасштабное решение проблем хранения и перемещения водорода за пределы трубопроводов. В зависимости от источника водорода аммиак может быть "зеленым", "синим" или "серым". Уже сейчас ежегодно перевозится более 100 миллионов тонн аммиака, поэтому погрузочно-разгрузочные работы налажены хорошо. Его можно хранить и перемещать при давлении 800-1000 кПа, аналогичном пропану, или в рефрижераторных резервуарах.

После хранения или транспортировки аммиак может быть диссоциирован или "треснут" обратно в водород и азот путем термического каталитического разложения или электроокисления, хотя извлечение высокочистого водорода в масштабе не доказано. Аммиак может также использоваться непосредственно в топливных элементах или смешиваться с бензином/бензином.

---

## Примечания и ссылки

**Общий источник** Центр данных по альтернативным видам топлива, Министерство энергетики США, веб-страница по [возобновляемым углеводородным Биотопливам сайт Ассоциации аммиачной энергетики](#)

[Веб-сайт Управления технологий водорода и топливных элементов Министерства энергетики США \(HFTO\)](#)

Том Коппел и Джей Рейнольдс, [праймер топливных элементов: обещание и подводные камни](#) (2000)

Бенджамин Расс и Боб Бакингам, [резюме процесса сернистого йода для водородной технологии Down-Selection: Process Performance Package](#), General Atomics (июнь 2009 г.)

Международное агентство по атомной энергии, [производство водорода с использованием ядерной энергии](#), серия ядерной энергии МАГАТЭ №. NP-T-4.2 (март 2013 г.)

[Водородная мобильность получает толчок в Европе](#), Engerati (июль 2016)

Григорий Соловейчик, передовых исследовательских проектов агентства энергетики США (ARPA-E), в Министерство энергетики США, [аммиака, водорода в качестве виртуальных носителей](#), представленных на [H2@шкалы семинар](#) состоится 16-17 ноября 2016 года в городе Голден, штат Колорадо, США

[Национальный водорода "Дорожная карта" – путь к экономически устойчивой водородной промышленности в Австралии](#), Содружества по научным и промышленным исследованиям организации (2018)

Международное энергетическое агентство, [будущее водорода: использование сегодняшних возможностей](#), доклад, подготовленный МЭА для G20, Япония (июнь 2019 г.)

Веб-страница Международного энергетического агентства по [водороду с нулевым содержанием углерода водород: важнейший вариант смягчения последствий изменения климата-потенциальная роль ядерной энергетики](#), сеть энергетических вариантов (июль 2020 года)

Yong-Liang Por, [Great Expectations-Asia, Australia and Europe Leading Emerging Green Hydrogen Economy, but Project Delays Likely](#), Institute for Energy Economics and Financial Analysis (August 2020)

Себастьян Тиммерберг и др., [Водород и водородсодержащие виды топлива путем разложения метана природного газа-выбросы и затраты ПГ](#), преобразование энергии и управление ею: X, том 7, 100043 (сентябрь 2020 г.)

Международное Энергетическое Агентство, [Перспективы Энергетических Технологий 2020](#)

Эрик Ингерсолл и Кирсти Гоган, [недостающее звено в пригодном для жизни климате – как синтетическое топливо с поддержкой водорода может помочь достичь Парижских целей](#), LucidCatalyst (сентябрь 2020 г.)