



## Что нужно знать о водороде?

**В**одород - самый простой и самый распространенный элемент во Вселенной. В то же время водород самый экологически чистый из известных накопителей энергии. При химической реакции кислорода с водородом образуется только чистая вода. Водород не токсичен, содержится в воде, а также в ископаемом углеводородном сырье (природный газ, нефть), но редко встречается на Земле в виде газа.

Водород можно производить в больших масштабах. Существуют различные ресурсы, которые можно использовать для производства водорода, включая возобновляемые источники (ветер, солнечная энергия, гидроэнергетика, биомасса и геотермальная энергия), ядерная энергия и полезные ископаемые (например,

природный газ и уголь - с улавливанием и захоронением углерода). Мировой спрос на чистый водород в настоящее время находится на уровне 75 миллионов тонн в год. 95 % потребления приходится на нефтеперерабатывающую и химическую промышленность, в основном самостоятельно обеспечивающих собственные потребности в водороде за счет его производства на специализированных установках, непосредственно в месте потребления. Еще около 42 миллионов тонн водорода используется в смеси с другими газами (в основном в виде синтез-газа) в качестве сырья или топлива при производстве тепловой и электрической энергии. Для сравнения, в качестве энергоносителя в таких перспективных сферах, как транспорт и энергетика, в настоящее время потребляется менее 0,01 миллиона тонн в

год. Столь незначительные объемы во многом связаны с сохраняющимися барьерами развития водородной энергетики: высокой стоимостью низкоуглеродного водорода, недостаточной готовностью технологий для его широкого применения, включая обеспечение безопасности всей производственной цепочки, дефицитом необходимой инфраструктуры для хранения и транспортировки водорода, а также рядом пробелов в нормативной правовой базе. По экспертным оценкам, спрос на водород в 2040 году должен, как минимум, удвоиться.

Водород имеет самую высокую плотность энергии по массе из всех известных видов топлива и является важным сырьем во многих отраслях промышленности. На единицу массы водород содержит примерно в 3 раза больше

энергии, чем обычные виды топлива, такие как бензин и природный газ, поэтому он был впервые обоснован как перспективное ракетное топливо К.Э. Циолковским и выбран для космических ракетных приложений. При этом водород отличается небольшой плотностью по объему, поэтому его сложно хранить в ограниченном пространстве. Сегодня водород - это промышленный товар, который в основном, используется для нефтепереработки и производства удобрений. Новые металлургические производственные процессы предполагают использование газообразного водорода вместо кокса. Водород реагирует с оксидом железа, аналогично оксиду углерода, полученному из кокса, но единственным побочным продуктом этой реакции является вода. Это лишь одно из многих новых перспективных применений водорода.

Водород и топливные элементы могут обеспечить нулевые или близкие к нулю выбросы на транспорте, в стационарных источниках энергии, а также в портативных энергетических установках. Когда водород производится из возобновляемых источников или источников с нулевым выбросом углерода, он становится источником энергии с таким же нулевым уровнем выбросов. Сегодня водород приводит в действие стационарные

топливные элементы, десятки тысяч вилочных погрузчиков, сотни автобусов и тысячи автомобилей на топливных элементах. Есть первые успешные примеры с тяжелыми грузовиками, железнодорожными локомотивами, самолетами и морскими кораблями.

Производство электролизного водорода можно использовать в качестве «резервной электрической нагрузки», чтобы обеспечить стабильность электрических сетей и компенсировать суточные и сезонные пики потребления электроэнергии. Водородные электролизеры способны динамически реагировать на суточные и сезонные возмущения в потреблении и производстве возобновляемой электроэнергии. Эта гибкость позволяет системам хранения энергии адаптироваться к изменчивости возобновляемых источников энергии, одновременно удовлетворяя потребности в энергии. Электролизеры также могут использовать избыток возобновляемой электроэнергии в периоды низкого спроса, что в конечном итоге увеличивает использование возобновляемой энергии и снижает стоимость водорода, который можно использовать не только в качестве хранилища энергии для возобновляемых источников энергии на топливных элементах, но и в качестве топлива или сырья для других приложений.

На сегодняшний день наиболее экономически выгодным является производство водорода из ископаемого сырья. В структуре мирового производства чистого водорода 75 % приходится на природный газ, 23 % — на уголь. При этом водород, производящийся из ископаемого сырья (в первую очередь, угля), обладает относительно высоким углеродным следом. Для снижения углеродного следа и дальнейшей декарбонизации отраслей возможно внедрение технологий производства водорода из ископаемого сырья с использованием систем улавливания и хранения углекислого газа, а также электролиза воды, в первую очередь, с помощью энергии объектов ветряной и солнечной энергетики. В настоящее время зеленый водород, полученный методом электролиза воды из возобновляемых источников энергии, самый дорогой, но эксперты считают, что к 2050 году его стоимость удастся снизить в три раза и приблизить к стоимости водорода, полученного методом паровой конверсии метана.

Почти 150 лет назад Томас Эдисон и Джордж Вестингауз вели битву за превосходство постоянного тока (DC) над переменным током (AC), известную как Война Токов. Мало того, что Война Токов была полна ложных обвинений и интриг, но и краткосрочный победитель войны - AC - не стал единственным лучшим ►

## В 2040 ГОДУ

По экспертным оценкам спрос на водород в 2040 году должен как минимум удвоиться.

► решением в долгосрочной перспективе. По мере того как электронные лампы, а затем и полупроводники, становились все более распространенными, постоянный ток стал играть все более важную роль в электрической цепи: от выработки электроэнергии до конечного использования. Сегодня оба типа электропитания: - постоянный и переменный - используются там где каждый работает лучше всего. Переменный ток по-прежнему используется между электростанциями и конечными потребителями. Электронное оборудование, включая светодиодное освещение, компьютеры и двигатели с инверторным приводом, все чаще преобразуют переменный ток в постоянный перед использованием. Для хранения возобновляемой энергии переменный ток также преобразуется в постоянный. Подобно Войне Токов 150 лет назад, сегодня можно мысленно представить новую «Войну Стихий» за методы хранения и транспортировки энергии между водородом, который используется в

топливных элементах, и литием, используемым в литий-ионных батареях. Какие уроки из «Войны Токов» Эдисона и Вестингауза мы можем применить к сегодняшней воображаемой Войне Стихий, учитывая выводы из 150-летнего ретроспективного анализа? Разнообразие — это всегда самое лучшее решение. Литий, когда он используется в литий-ионных батареях, имеет высокую энергоэффективность и использует существующую развитую инфраструктуру электрических сетей, но имеет низкую плотность энергии на единицу массы и ограниченную скорость зарядки, что делает его непрактичным для больших транспортных средств и больших накопителей электроэнергии. Водород, используемый в водородных топливных элементах и двигателях, имеет высокую плотность энергии на единицу массы и высокую скорость заправки, но более низкую энергоэффективность и требует новой инфраструктуры заправки и транспортировки. В отличие от литий-ионных аккумуляторов, водород особенно эффективен в больших транспортных средствах и для больших накопителей энергии. У каждого подхода есть свои преимущества и недостатки, и каждый из них силен там, где другой слаб. Если мы понимаем преимущества лития и водорода, а также уроки 150-летней давности, нет необходимости выбирать победителя сейчас и нет причин

навязывать единственного победителя, когда наиболее вероятное и наверняка лучшее решение применять оптимальный подход в зависимости от обстоятельств. Другими словами, в войне вообще нет необходимости. По мнению экспертов, к 2050 году 50% электромобилей будут на аккумуляторах, а другие 50% электромобилей на водороде и топливных элементах. Для двигателей внутреннего сгорания к 2050 году даже на экологически чистом водороде не остается никаких перспектив в связи с их низкой энергоэффективностью по сравнению с двумя типами электромобилей.

Топливный элемент похож на аккумуляторную батарею, это не случайно и топливные элементы, и аккумуляторные элементы используют схожую физику для преобразования химической и электрической энергии, за исключением того, что энергия для топливных элементов хранится извне в топливном баке, тогда как в аккумуляторных элементах энергия хранится внутри самой батареи. Поскольку в воздухе вокруг нас много бесплатного кислорода, нам для хранения и транспортировки энергии нужно хранить и транспортировать только водород.

У водорода есть как преимущества, так и недостатки. Из-за низкой температуры кипения водорода при нормальном давлении (20

градусов Кельвина) его сложнее хранить и транспортировать в сжиженном виде, чем жидкое углеводородное топливо, такое как бензин и даже такое как сжиженный природный газ. Небольшие молекулы водорода имеют тенденцию вытекать из трубопроводной арматуры, а также могут растворяться в металлических сплавах, вызывая водородную коррозию и делая их хрупкими. К счастью, водород легкий и очень быстро рассеивается. Литий находится прямо под водородом в периодической таблице и является самым легким твердым элементом при комнатной температуре и давлении. Лития на Земле примерно в 500 раз меньше, чем водорода, но он примерно в 20 раз более распространен, чем другие элементы, такие как никель и кобальт. Как и водород, литий может окисляться с выделением тепла, но это его большой недостаток, поскольку при соединении лития с водой идет бурная химическая реакция с образованием газообразного водорода, который легко воспламеняется. Вот почему попытка тушить пожар литиевой батареи водой усугубляет ситуацию.

Водород накапливает очень большое количество химической энергии на единицу массы - более чем в 100 раз больше, чем электрическая энергия в активных частях литий-ионных аккумуляторов. Вот почему литий-ионные

батареи непрактичны для дальнемагистральных грузовиков, и самолетов большой дальности - они просто слишком много весят - и вот почему водород является обычным ракетным топливом. Конечно, чтобы провести справедливое сравнение, мы должны также принять во внимание дополнительную массу всех компонентов автомобиля. Автомобиль на топливных элементах весит существенно меньше, чем аналогичный по размеру и дальности пробега электромобиль с аккумуляторной батареей, но все равно уступает по массе автомобилю с бензиновым двигателем внутреннего сгорания (ДВС). Большая масса литий-ионных аккумуляторов, необходимых для автомобилей дальнего действия требует больше природных ресурсов, выделяет больше углерода во время производства и, наверняка, будет дороже в утилизации, чем эквивалентное оборудование водородного электромобиля. Водородный бак можно заправлять в 10—100 раз быстрее, чем литий-ионные батареи. При этом быстрая заправка не вызывает сокращения срока службы водородного оборудования, как это происходит при быстрой зарядке литий-ионных батарей. Это преимущество становится критическим для крупных транспортных средств, таких как грузовики, поезда, самолеты и корабли, которые должны быстро восполнять большие

запасы энергии.

Энергоемкость химического топлива настолько велика, что скорость передачи энергии при заполнении топливных баков автомобиля бензином или водородом составляет от 1 до 10 МВт. Это в 10—100 раз больше мощности 100 кВт самого современного и самого быстрого зарядного устройства постоянного тока. Вот почему для заправки топливного бака автомобиля (бензином или водородом) требуется гораздо меньше времени, чем для полной зарядки разряженных батарей. Улучшится ли это в будущем? Исследования твердотельных аккумуляторов направлены на это. Но даже если проблема с аккумулятором будет решена, поставка электроэнергии в несколько мегаватт на множество отдельных зарядных станций будет очень сложной задачей. Электрическая сеть не предназначена для подачи такого количества энергии в такое множество отдельных мест. Чтобы это понять, примите во внимание следующее: количество энергии, хранящейся на каждой заправочной станции, чрезвычайно велико - достаточно, чтобы полностью заполнить тысячи топливных баков автомобилей, то есть несколько сотен МВтч на одну станцию. В электросети нет эквивалентного локального хранилища. А автоцистерны выгружают топливо в хранилище станции со ►

► скоростью тысячи литров в минуту, что эквивалентно сотням МВт мощности - уровню мощности, вырабатываемой небольшим ядерным реактором.

Высокая энергоэффективность - одна из сильных сторон литий-ионных батарей. По сравнению с двигателями, работающими на химическом топливе, литий-ионные батареи и водородные батареи более энергоэффективны. При производстве водорода из электричества, его сжатии и хранении в резервуаре, а затем при преобразовании обратно в электричество, теряется примерно вдвое больше энергии, чем при зарядке и разрядке литий-ионных аккумуляторов. В некоторых системах, где необходимо минимизировать потери энергии, литий-ионные батареи, как правило, являются лучшим выбором. Поскольку стоимость возобновляемых источников энергии неуклонно снижается, более низкая энергоэффективность водорода может быть менее важным фактором. Дефицит энергии прошлого научил нас ценить энергоэффективность, но сегодня энергоносители в изобилии, а сокращение выбросов парниковых газов и снижение стоимости тоже имеют значение. Энергоэффективность - это еще не все.

По мере увеличения количества энергии, которая должна быть сохранена,

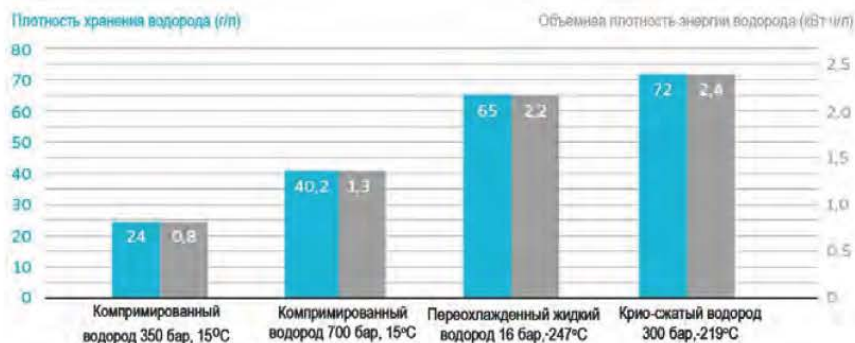


Рис. 1. Объемная плотность водорода и объемная плотность энергии для различных форм хранения водорода

системы топливных элементов становятся менее дорогостоящими решением, чем батареи, потому что для увеличения накопления энергии требуется только топливный бак большего размера, а не больший топливный элемент. С батареями единственный способ увеличить емкость - это добавить больше ячеек. Стоимость хранения энергии в водороде, даже в жидком виде

при криогенных температурах, составляет 1/10 стоимости хранения той же энергии в литий-ионных батареях. Хранение энергии станет более важным для выравнивания дневных/ночных и сезонных изменений производства и спроса на электроэнергию.

Стоит рассмотреть перспективы применения легковых электромобилей с

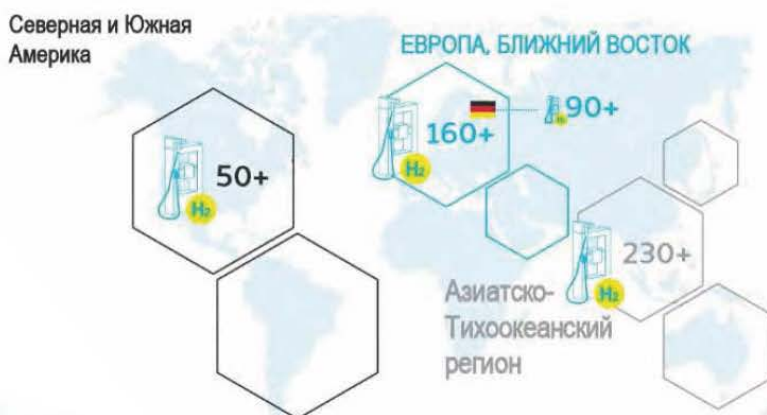


Рис. 2. Распределение существующих водородных заправочных станций

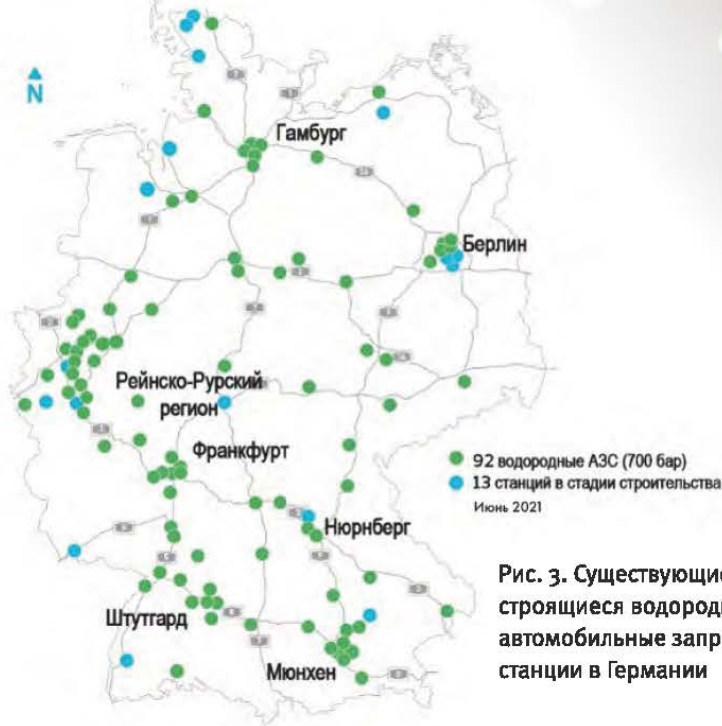


Рис. 3. Существующие и строящиеся водородные автомобильные заправочные станции в Германии

топливными элементами в качестве распределенного резервного источника электроэнергии. Действительно, в Европе сейчас продают 15 миллионов новых легковых автомобилей в год. Вероятнее всего, к 2050 году 50% этих продаж будут приходиться на долю водородных электромобилей. Легковые автомобили находятся в эксплуатации не более 10% времени. Следовательно,

90% времени они могут быть подключены к существующим электрическим сетям и сглаживать при необходимости в дневные часы пики дневного потребления электроэнергии для нужд промышленности и для зарядки электромобилей, а в ночные часы компенсировать провалы выработки электроэнергии с помощью возобновляемых источников — солнечных батарей. Ветровые источники электроэнергии

так же могут работать неравномерно и в безветренную погоду, эти провалы в выработке электроэнергии так же можно компенсировать за счет распределенных электрогенерирующих мощностей припаркованных водородных легковых автомобилей. Предположим, что средняя мощность двигательной установки легкого автомобиля составляет 100 кВт. В режиме парковки из-за необходимости отвода тепла и некоторых других обстоятельств, обеспечить такую выходную электрическую мощность не удастся и эту полезную электрическую мощность нужно принять не более 10 кВт. Тогда каждая тысяча припаркованных и подключенных к сети легковых водородных автомобилей эквивалентна электростанции с электрической мощностью 10 МВт, а каждый миллион припаркованных и подключенных к ▶



| Класс (Размер)                                  | S                             | M                                                                 | L                                                                                           | 2XL                                                                                         |
|-------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Максимальная производительность водорода в день | 200 кг                        | 500 кг                                                            | 1,000 кг                                                                                    | 4,000 кг                                                                                    |
| Транспортное средство                           | Легковой, легкий коммерческий | Легковой, легкий коммерческий, автобусы, среднетоннажный грузовой | Легковой, легкий коммерческий, автобусы, среднетоннажный грузовой, крупнотоннажный грузовой | Легковой, легкий коммерческий, автобусы, среднетоннажный грузовой, крупнотоннажный грузовой |
| Средняя производительность водорода в день      | 150 кг                        | 350 кг                                                            | 700 кг                                                                                      | 2,500 кг                                                                                    |
| Годовая потребность                             | 1 - 10 т                      | Более 100 т                                                       | Более 500 т                                                                                 | Более 900 т                                                                                 |
| Количество топливозаправочных форсунок          | 1                             | 2                                                                 | 2 - 3                                                                                       | 2 - 4                                                                                       |
| Размер площади для размещения оборудования      | 80 - 250 м²                   | 200 - 350 м²                                                      | 250 - 900 м²                                                                                | Зависит от технологической модели заправочной станции                                       |

Рис. 4. Типовые водородные автозаправочные станции



Рис. 5. Автомобильная заправочная колонка

распределительной электросети водородных автомобилей эквивалентен электростанции с электрической мощностью 10 ГВт. Согласитесь, что это весьма существенная мощность для выравнивания локальных пиков потребления в крупных городах при том, что все электростанции России имеют суммарную электрическую мощность менее 250 ГВт, а все электростанции Европы 1000 ГВт. Причем инвестиции на создание условий по подключению припаркованных автомобилей к распределительной электрической сети не велики. Грузовые автомобили и автобусы эксплуатируются в более интенсивном режиме, чем

легковые, но и электрическая мощность топливных элементов таких транспортных средств, также как и емкость топливных баков, существенно выше, чем у легковых автомобилей. Грузовые автомобили и автобусы можно в режиме парковки рассматривать как распределенные аварийные источники электроснабжения. При применении в качестве топлива жидкого водорода или сжатого охлажденного водорода можно существенно увеличить энергоемкость топливного бака (рис. 1). Криогенные технологии позволяют увеличивать пробег транспортного средства в обмен на необходимость ограничения времени его простоя.

В случае времени вынужденного простоя, превышающего время бездренажного хранения в криогенном топливном баке, газообразный водород, образующийся вследствие теплопритоков, придется сбрасывать в атмосферу. Эти нежелательные потери можно избежать, подключая простаивающие водородные транспортные средства с криогенными топливными баками к распределительной электрической сети в качестве резервного источника электроэнергии.

Прежде чем рассматривать водородные автомобили в качестве источника

распределенного резервного и (или) аварийного электроснабжения, стоит позаботиться о создании автозаправочной водородной сети. Развитая автозаправочная водородная сеть — необходимое условие для массового приобретения автовладельцами электромобилей на топливных элементах. Понятно, что первичное строительство водородных заправочных станций может осуществляться при наличии государственной поддержки. Среди лидеров этого строительства стоит выделить Германию, Китай, Корею, Японию и США (рис. 2).

Самая развитая водородная автомобильная заправочная инфраструктура на сегодня в Германии (рис.3). При этом к 2025 году запланировано увеличение количества станций до 400. Амбициозные планы заявляют другие европейские страны, такие как Великобритания, Италия и Франция. Водородные автомобильные заправочные станции можно условно разделить на малые, средние, большие и очень большие (рис. 4). Водород может быть как привозной, так и вырабатываться на месте.

На сегодня в России пока нет ни одной публичной водородной заправочной станции. Понятно, что такое серьезное отставание нашей страны от других промышленно развитых стран не может продолжаться длительное время, при том, что уже разработаны прототипы

отечественных автобусов и легковых автомобилей на топливных элементах. Сочетание всех экологических, экономических и политических факторов однозначно указывает, что нас ждет бурный рост этой отрасли. Развитие этого направления будет, как минимум, на порядок опережать рост промышленности в других отраслях экономики. Потребуется в большом количестве не только специальные компоненты для установки на серийные автомобили (топливные элементы, водородные топливные баки, клапаны, фильтры и регуляторы давления), но и оборудование для заправочных станций. Потребуется на первом этапе применения газообразного водорода с рабочим давлением 350 и 700 бар средства производства водорода, установки для его очистки, водородные компрессоры с рабочим давлением до 900 бар, средства транспортировки водорода, предохранительные клапаны, устройства заправки автомобилей водородом, трубы и фитинги на водород под высоким давлением и многое другое. Затем, по мере развития отрасли, неизбежно следует ожидать развития криогенных технологий хранения и транспортировки водорода.

В связи с интенсивным ростом отрасли, в работу будут вовлекаться все новые и новые организации и специалисты, которым будут необходимы те или иные

компоненты и устройства для работы с водородом при высоких давлениях, а также помощь по их подбору, установке и эксплуатации. Специализированная организация ООО «Мониторинг Вентиль и Фитинг» (MV&F) по роду своей деятельности тесно связана с большинством инженерных устройств, необходимых при производстве, компримировании, хранении, очистке, транспортировке и применении водорода. Например, на рис. 5 представлена автомобильная водородная газонаполнительная колонка MV&F для заправки автомобилей с рабочим давлением 350 бар.

Вы всегда можете обратиться за помощью и консультациями к специалистам компании ООО «Мониторинг Вентиль и Фитинг», которая предлагает баллоны и моноблоки для хранения и транспортировки водорода, клапаны, фитинги и регуляторы как для установки на автомобилях, так и на заправочных станциях, компрессорные установки, установки очистки водорода и диспенсеры для заправки автомобилей. 

#### АВТОР СТАТЬИ

Слободов Евгений Борисович, президент и технический директор ООО «Мониторинг Вентиль и Фитинг»