



На пути к энергетической революции

Почему человечество отказывается от углеводородных источников энергии и с чем связаны перспективы перехода на чисто водородные технологии.

Постепенный отказ ведущих мировых держав от сжигания ископаемых ресурсов, будь то углеводороды в двигателях внутреннего сгорания автомобилей или уголь на тепловых электростанциях, приобретает устойчивый и необратимый характер. Большинство развитых стран приняли программы, которые определяют четкие сроки отказа от использования традиционных автомобильных двигателей внутреннего сгорания и перехода на альтернативные тяговые агрегаты, которые не вырабатывают парниковых газов. В качестве источника энергии будет использоваться электричество и, предположительно, водород.

Еще один момент, благодаря которому внимание сконцентрировалось на водороде, это возможность реализации систем хранения избытков электроэнергии, вырабатываемой возобновляемыми источниками (ВИЭ). Неравномерный характер ее производства усложняет балансировку энергосетей, а точнее, переводит эту задачу в разряд нерешаемых. В последнее время эта проблема становится настолько острой, что вынуждает искать нетрадиционные способы, например, вырабатывать водород в качестве энергоносителя.

При этом включение водорода в цепочку производства и хранения электроэнергии позволяет решить одновременно сразу несколько важных проблем в различных отраслях экономики, включая полный перевод транспорта на чистую энергию. Масштабы преобразований могут оказаться столь велики, что впору говорить о принципиальной технологической трансформации экономики или «новой энергетической революции», на этот раз водородной. В результате синергетического эффекта водород может оказать существенную помощь в решении множества проблем человечества, в частности, полного перехода на возобновляемые источники энергии и отказа от использования ДВС на углеводородном топливе.

Издержки углеродной жизни

Итак, вот те две задачи, в решении которых в ближайшем будущем будет задействован водород:

- ✦ автомобильный транспорт;
- ✦ системы резервного накопления электроэнергии.

Рассмотрим, почему эти направления являются актуальными и в силу

чего эксперты проголосовали за использование именно водорода для их решения.

Транспорт и ТЭС. Прежде всего, уже много лет (буквально с момента появления) автомобильный транспорт повсеместно использует двигатели внутреннего сгорания (ДВС), которые сжигают углеводородное топливо, загрязняющее атмосферу. Дышать в городах стало настолько тяжело и вредно для здоровья, что правительства ведущих стран предприняли усилия по снижению вредных веществ в выхлопных газах автомобильных двигателей, введя стандарты Euro 5 и Euro 6.

Но двигатели внутреннего сгорания, установленные на автомобильном, морском и воздушном транспорте, по-прежнему сжигают нефтепродукты в силу принципа их работы. Атмосфера планеты загрязняется, а парниковый эффект проявляется все сильнее, что приводит к глобальному потеплению, таянию ледников, поднятию уровня мирового океана. Следует отметить, что выбросы парниковых газов (CO_2 , NH_4 , N_2O и другие) связаны с множеством различных факторов, среди которых не только сжигание угля на

тепловых электростанциях и автомобильный транспорт. Но антропогенные факторы, по крайней мере, можно контролировать, в отличие от таких природных явлений как лесные пожары, выделение метана из болот, гниение различных отходов, связанных с жизнедеятельностью человека и в животноводстве.

В результате ведущие мировые страны согласились с тем, что бороться с экологическими проблемами и угрозой потепления лучше сообща. Для этого, прежде всего, нужно снизить выбросы парниковых газов, среди которых CO_2 занимает лидирующие позиции. Было решено начать с автомобильного транспорта и тепловых электростанций, которые активно и в больших количествах сжигают продукты переработки нефти, природный газ и уголь.

И процесс вроде бы пошел, но вскоре выяснилось, что зарядка электромобилей, пусть и оборудованных новыми перспективными литиевыми аккумуляторами, требует длительного времени, а ограниченное количество циклов заряда-разряда АКБ приводит к быстрому снижению их емкости. Стоимость же самих транспортных средств достаточно высока, прежде всего, за счет этих самых батарей, не говоря уже о ряде претензий к удобству эксплуатации электромобилей.

Стремясь очистить среду обитания, человечество начало борьбу с выбросами парниковых газов, в том числе CO_2 , который, не будем забывать, является важнейшим элементом, необходимым для питания растений

Возобновляемая энергетика. Сократить выбросы парниковых газов тепловыми электростанциями было решено за счет развития системы возобновляемых источников энергии — прежде всего, путем строительства солнечных и ветряных станций. Однако проблемы очертились и в этой части, поскольку выработка электроэнергии СЭС и ВЭС сильно зависит от погодных факторов.

В результате балансировка энергосети с ростом доли ВИЭ становится просто нерешаемой задачей, поскольку, с одной стороны, избыток электроэнергии в часы пиковой выработки следует куда-то девать, а с другой — при неблагоприятных погодных условиях нехватка электроэнергии может оказаться не менее стрессовой ситуацией для любой энергосистемы.

Энергосистема и резервные накопители

И если переход на электрическую тягу автомобильного транспорта уже начался (не забываем, что трамваи и троллейбусы здесь были первопроходцами), то использование водорода в системах накопления электроэнергии делает только первые шаги. Как уже говорилось выше, избыток генерации возобновляемой электроэнергии с повышением доли ВИЭ в энергобалансе становится проблемой. Перевести большую часть генерации на СЭС и ВЭС, скорее всего, невозможно в силу зависимости процессов выработки энергии от погодных условий. В результате все чаще возникают периоды как избыточной генерации, когда электроэнергию необходимо куда-то девать (например, использовать ГАЭС в режиме закачки воды в верхние хранилища или же заряжать аккумуляторы систем накопления электроэнергии), так и интервалы, когда энергии недостаточно и следует включать так называемые маневренные станции, в качестве которых используются ГАЭС (но уже в режиме генерации) и ТЭС. Но маневренность ТЭС весьма условна — для подготовки тепловых агрегатов к работе требуется как минимум несколько часов. Кроме того, тепловые станции используют уголь, природный газ и продукты переработки нефти, выбрасывая парниковые газы, от которых хотелось бы избавиться в первую очередь — ведь возобновляемые источники энергии появились именно по этой причине. В то же время мощностей существующих ГАЭС для оперативной балансировки уже явно недостаточно, а строительство новых мощностей требует соответствующего ландшафта, капитальных вложений и времени.

Использование литий-ионных аккумуляторов также не может решить проблему накопления электроэнергии в периоды избытка ее генерации ВИЭ из-за огромных объемов. Накопители на сотни мегаватт, которые введены в строй, не могут решить проблему, поскольку необходимы накопители емкостью несколько порядков выше.

Таким образом, следовало найти такой механизм, который позволял бы запасать значительные объемы электроэнергии, причем на длительное время, транспортировать их на большие расстояния и оперативно расходовать в случае проблем с возобновляемыми источниками (неблагоприятные погодные условия). Уже сейчас, по крайней мере в нашей стране, в отдельные временные интервалы солнечные станции вырабатывают электроэнергию, с количеством которой энергосистема Украины вскоре перестанет справляться. В отдельные летние дни ГАЭС практически непрерывно работают в несвойственном им режиме закачки воды в верхние хранилища, отбирая излишек энергии из сети. А ведь доля электроэнергии ВИЭ, выработанной в нашей стране в 2020 году, составила лишь около 7,3% от ее общего объема.

Поэтому неудивительно, что для преобразования и хранения избытка электроэнергии предложено использовать достаточно универсальный инструмент, а именно — водород. И это притом, что водород не является чем-то новым и плохо изученным. Наоборот, он традиционно используется в различных процессах, связанных с производством пищевых продуктов (например, маргарина) и сельскохозяйственных удобрений (аммиак), а также в промышленности (металлургия, нефтепереработка, пр.).

Где будет использован водород?

Как же в новой энергетической концепции предполагается использовать водород? Прежде всего этот крайне взрывоопасный газ планируется применять на автомобильном, железнодорожном и морском транспорте, где

ЦВЕТОВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ВОДОРОДА

Прежде чем говорить о возможностях применения водорода, остановимся на важном вопросе «цветовой классификации» различных типов этого газа. Ведь в настоящее время, по сути, на начальном этапе разворачивания «новой энергетики», способ получения водорода связан с его стоимостью, что имеет огромное значение для перспектив трансформации энергетики и транспорта.

Речь не идет о разновидностях изотопов водорода — протии, дейтерии и тритии. В данном случае условный «цвет» определяет способ производства данного газа, который на самом деле не имеет ни цвета, ни запаха. Причем определяющее значение в характеристике «цвета» имеет наличие или отсутствие выбросов углекислого газа.

В силу предложенной классификации водород бывает «зеленым», «голубым», «бирюзовым», «желтым», «серым». «Голубой» водород представляет собой результат паровой конверсии метана, «бирюзовый» добывают путем пиролиза все из того же метана, «желтый» получают в атомной энергетике, а «зеленый» — это результат электролиза воды.

Представление о существующих технологиях выработки водорода, а из основных их не так уж и много, очень важно, поскольку каждая из них имеет свои достоинства и недостатки, а в связи с предстоящим бурным развитием отрасли все они будут совершенствоваться, а также появляться новые.

Так или иначе, но перефразируя классика, можно сказать, что из всех водородов для нас важнейшим является именно «зеленый» водород, который обеспечит нулевой углеродный след в энергетике и транспорте.

будут установлены водородные двигатели, которые могут либо сжигать водород (опытные образцы уже работают), либо использовать топливные элементы (технология, считающаяся более современной и перспективной), вырабатывая обычную воду как продукт известной химической реакции $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$. Водород предполагается поставлять на заправочные станции в баллонах, либо по трубопроводам. От электрических аккумуляторов топливные элементы отличаются тем, что они функционируют до тех пор, пока топливо и окислитель поступают из внешнего источника, при этом химический состав электролита в процессе работы не изменяется, т.е. топливный элемент не нуждается в перезарядке. Преимущество водородного типа топлива в отсутствии вредных выбросов. Недостаток — высокая себестоимость водорода, сложности транспортировки и опасность при эксплуатации.

При этом использование водородных топливных элементов на автомобильном транспорте обеспечивает новое качество, которым не обладают чистые аккумуляторные транспортные средства. В данном случае к электрохимическим генераторам подается водород и кислород (возможно, обычный воздух), в результате чего эти элементы

вырабатывают электроэнергию, как хорошо знакомые нам аккумуляторы. Далее в работу включаются электродвигатели, преобразующие вращательную энергию ротора в движение колес автомобиля. Отличий от электромобилей вроде бы немного, разве что ресурс водородного топливного бака гораздо выше, чем литий-ионного АКБ, а зарядка не требует многих часов и выполняется так же быстро, как и у бензиновых автомобилей.

Вторая сфера применения водорода — преобразование электроэнергии в периоды ее избытка в сети в химическую форму (H_2) и накопление в хранилищах. Когда же возникнет нехватка электроэнергии, водород будет поступать на оборудование, осуществляющее выработку электроэнергии — это может быть как привычное сжигание этого газа в теплоагрегатах (наподобие ТЭС), так и использование топливных элементов гигаваттной мощности.

В настоящее время в создании электрохимических генераторов достигнута мощность 11 МВт (система на основе фосфорно-кислотных топливных элементов) — т.е. по сути сделаны только первые шаги. Перспективным видится направление создания твердооксидных топливных элементов для широкого диапазона мощностей.

Где брать водород?

Существует несколько промышленных способов получения водорода, которые используются в настоящее время для различных нужд. При этом, как правило, исходным сырьем является метан (природный газ) или уголь, а процесс идет со значительным уровнем выбросов углекислого газа в атмосферу. Для новой энергетики (в ее идеальном состоянии) это неприемлемо, по крайней мере, в долгосрочной перспективе.

В системах выработки электроэнергии предполагается, что водород будет прежде всего получен путем электролиза воды из электроэнергии, в ходе которого отсутствует «углеродный след» — т.е. как продукт деятельности ВЭС, СЭС, ГЭС и АЭС. Другие методы получения водорода (с выбросами углекислого газа в атмосферу или его улавливанием) также возможны, но лишь как временные промежуточные этапы перехода на чистую водородную энергетику. Для генерации и накопления водорода потребуются установки, потребляемая мощность которых составляет сотни и тысячи мегаватт — ведь в периоды переизбытка электроэнергии ВИЭ потребуется утилизировать именно такие объемы электроэнергии. Что это будут за устройства, пока неизвестно. На сегодня известно о проекте Toshiba по выработке водорода методом электролиза воды производительностью 100 кг водорода в час. Для этого используется СЭС мощностью 20 МВт при поддержке стационарной энергосети. Полученный «зеленый» водород будет использован в качестве топлива для специализированных автомобилей и автобусов в Японии.

При этом водород будет направляться как традиционным потребителям (химическое и пищевое производство), так и на заправочные водородные станции. Кроме того, поскольку энергетики непрерывно решают задачу балансировки энергосети, определенная часть выработанного продукта будет использована для обратного преобразования водорода в электроэнергию — скорее всего, с помощью топливных элементов или иных более продвинутых технологий, которые пока

еще не придуманы. Например, может оказаться целесообразным использование так называемых обратимых топливных элементов.

Высокая стоимость производства водорода методом электролиза будет снижаться за счет массовости применения указанного газа в самых различных сферах, вплоть до выпуска удобрений. Так, водород используется для получения аммиака NH_3 — одного из важнейших продуктов химической промышленности (ежегодное его мировое производство превышает 180 млн тонн). Из аммиака далее получают такие полезные продукты, как азотная кислота, аммиачная селитра (нитрат аммония — одно из наиболее популярных азотных удобрений), ну и, конечно же, цианистый калий, хотя уже есть более современные заменители ☺.

В результате мы имеем замкнутый цикл — вначале электроэнергия (в периоды ее переизбытка) используется для получения водорода, который накапливается в соответствующих хранилищах, а затем при необходимости используется для производства электроэнергии и поступает на станции заправки водородных электромобилей. И хотя способ технологически работоспособен, но с экономической точки зрения в настоящее время он убыточен.

В будущем не исключено, что будут найдены более эффективные методы производства водорода, а также его хранения и использования.

Энергетическая революция — задачи и перспективы

Основная идея «новой энергетической революции» состоит в стремлении обеспечить нулевые выбросы углекислого газа и других вредных веществ в процессе выработки и накопления электроэнергии. Для этого на всех этапах предполагается использование возобновляемых источников энергии. Другими словами, «зеленый» водород будет применен как накопитель энергии в системах энергообеспечения, а также в качестве идеального топлива для автомобильного транспорта. Но при этом

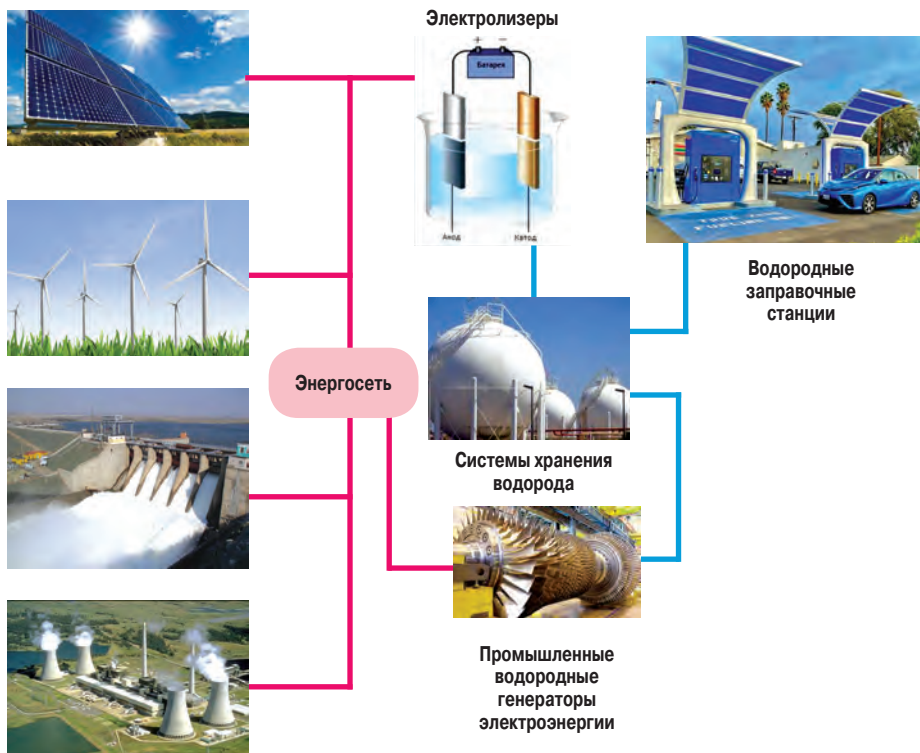


Рис. Взаимосвязь производства и потребления электроэнергии и водорода

сам водород также должен производиться без вредных выбросов в атмосферу. Более того, электроэнергия, вырабатываемая топливными элементами (ТЭ) автомобиля (в настоящее время они видятся как достаточно перспективное решение), может использоваться для заряда внутренних аккумуляторов транспортных средств, мощность которых ощутимо превышает аналогичный показатель топливных элементов. АКБ могут эффективно применяться на этапе разгона машины, а ТЭ — для равномерной фазы движения.

Получаем замкнутый энергетический цикл — топливные элементы будущих водородных электромобилей (сейчас в мире насчитывается свыше миллиарда традиционных транспортных средств) в фазе движения вырабатывают электроэнергию для электродвигателей и заряжают внутренние АКБ транспортного средства. А в периоды «отдыха» эти же топливные элементы могут производить электроэнергию для ее передачи в общую энергосеть. При этом автомобильные стоянки и автопредприятия можно оборудовать системами подвода водорода, который будут использовать топливные элементы транспортных средств для выработки электроэнергии в периоды ее нехватки в энергосети. Различные

АТП превратятся, таким образом, в резервные комплексы электроснабжения. Экономические моменты и систему управления такой распределенной энергосетью мы не рассматриваем, это дело будущего. Тем не менее рабочая модель, в которой обеспечивается взаимодействие систем выработки возобновляемой электроэнергии, накопления ее избытка в виде водорода, использования этого газа для питания водородных электромобилей и генерации электроэнергии для балансировки энергосети (рис.), вполне работоспособна.

Лед тронулся

В последние годы идея практического использования водородной энергетики начала приобретать в мире все более очерченные формы. Первой страной, сформировавшей в 2017 году свою национальную водородную стратегию, стала Япония. В 2019 году здесь была принята «Стратегическая дорожная карта для водорода и топливных элементов». В этом же году национальные водородные стратегии были приняты в Южной Корее, Австралии. В марте 2020 года подобная стратегия утверждена в Нидерландах, в июне — Германии и Норвегии, в июле — Португалии и ЕС, а в сентябре — во Франции.



В июле 2020 года еврокомиссар по энергетике Кадри Симсон заявила: «Цель ЕС — к 2050 году стать климатически нейтральной. К этому времени мы выведем из употребления все ископаемые энергоносители. Альтернативой углю, нефти и нефтепродуктам, природному газу должны стать возобновляемые источники энергии и водород».

При этом, несмотря на наличие различных промышленных технологий получения водорода, в той же Германии была принята программа, согласно которой к 2030 году в стране должны быть построены дополнительные электростанции на базе ВИЭ мощностью 20 ГВт, предназначенные для производства так называемого «зеленого» водорода. А ведь электролиз воды является наиболее энергоемким среди всех известных способов получения этого газа. При этом вовсе не отрицается возможность использования других технологий для производства водорода, например, из природного газа с улавливанием углерода.

Для сравнения: стоимость выработки 1 кг H_2 методом электролиза (по различным источникам) составляет \$4,61–14,87. На пиролиз метана ($CH_4 \rightarrow C\downarrow + 2H_2\uparrow$) затрачивается \$1,36–1,79, а на паровой риформинг ($CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$) — \$1,03–2,16. Ожидается, что в процессе развития технологий затраты будут снижаться.

Важно то, что в ходе производства «зеленого» водорода не происходит

выбросов углекислого газа в атмосферу и вся цепочка от производства до потребления является экологически чистой. Другие технологии, например, парогазовая конверсия метана (паровой риформинг), предполагают наличие достаточно больших выбросов CO_2 в атмосферу или же использование технологий изъятия и накопления углекислого газа. И хотя в результате последующего использования водорода, например, в топливных элементах, в качестве отходов образуется исключительно вода, считать всю цепочку экологически чистой нет оснований. А значит, такие методы могут выступать лишь временным решением.

Из перспективных технологий представляет интерес пиролиз метана CH_4 или иных газов гомологического ряда насыщенных углеводородов с общей формулой C_nH_{2n+2} — без доступа воздуха. В результате происходит отрыв атомов водорода от исходных молекул, а углерод осаждается на стенках печи в виде сажи, которая, в свою очередь, может использоваться для производства шин, в качестве добавок в асфальт и в химической промышленности.

Прогнозируемо ли будущее?

К 2050 году ЕС, а также большинство ведущих стран мира (надеемся, что так оно и будет), станут климатически нейтральными или максимально приблизятся к этому состоянию. Это

значит, что планирование осуществляется на 30 лет наперед. Реально ли это? Футурологи дадут отрицательный ответ. Многолетний опыт анализа прогнозов демонстрирует, что максимальные сроки разумного адекватного прогнозирования в целом не превышают 10–15 лет. Прогнозы на более длительный период не срабатывают — реальность там уже оказывается совершенно иной, чем это виделось.

Наука и технологии стремительно движутся вперед. Историки могут рассказать, что настоящим стимулом для ускорения эволюции являются голод, жажда и страх. Если катастрофические изменения климата внезапно станут для всех очевидны, то не исключено, что правительства ведущих стран направят все имеющиеся ресурсы на снижение выбросов парниковых газов и на научные исследования, которые позволяют остановить неотвратимо надвигающуюся планетарную катастрофу.

Но даже планы, которые рассчитаны на 30 лет наперед, могут оказаться несбыточными. Вспомним, с каким оптимизмом в 50-е годы XX века смотрели на возможность управления термоядерным синтезом. В мире было создано огромное количество лабораторий, построены сотни токамаков, с помощью которых надеялись обуздать термоядерную энергию и использовать ее для выработки дешевой электроэнергии в любых количествах. Прошло 70 лет. Практических результатов пока не видно.

Перспективы новой энергетической революции, как они сейчас видятся, связаны не только с экономическими факторами, но прежде всего с экологией. Получение чистой энергии обходится дороже, чем традиционными способами (например, сжигание угля), а что касается водорода, то первые же реальные шаги на пути к «водородной революции» способны разорить даже самые передовые промышленные страны, если только к энергетической трансформации не подключится все мировое сообщество.

Подготовил
Владимир СКЛЯР, Сиб