

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6843

УДК 630.3

Обзор

Проблемы и перспективы получения и применения водорода

Беляев Сергей Васильевич

кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), sergbel2014@mail.ru

Левина Мария Сергеевна

младший научный сотрудник, отдел комплексных научных исследований ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (Российская Федерация), marilevine@ya.ru

Получена: 1 марта 2023 / Принята: 27 апреля 2023 / Опубликовано: 9 мая 2023

Аннотация: Более строгие требования, предъявляемые к экологическим характеристикам к топливам и энергоустановкам в последние десятилетия, привели к масштабному поиску новых, экономически эффективных, экологически чистых энергоносителей. Повышенный спрос на энергоносители вызывает увеличение интереса к альтернативным источникам получения топлив, в т. ч. водорода, для генерации электроэнергии и использования на транспорте. В статье рассматриваются и анализируются вопросы производства и применения водорода, который в настоящее время во многих регионах мира считается приоритетным и перспективным энергоносителем. Рассматриваются основные пути и технологии получения водорода, его важнейшие физико-химические свойства, эксплуатационные и экологические характеристики. Можно предположить, что, используя относительно дешёвые ресурсы и технологии, водород и водородная энергетика могут получить импульс для широкой коммерциализации при благоприятных экономических условиях и составят конкуренцию ископаемым топливам в отдельных регионах Европы и мира. Потенциальные выгоды от расширения использования водорода и развития водородной экономики видятся, прежде всего, в оздоровлении окружающей среды; повышении энергетической безопасности ряда регионов и стран. Предполагаем, что в среднесрочной перспективе будущие технологические достижения повысят конкурентоспособность водорода. В настоящее время в европейских странах рассматривают увеличение объёмов производства

водорода как способ сокращения зависимости от импорта российской нефти и газа, а также уменьшения выбросов парниковых газов.

Ключевые слова: водород; топливные элементы; водородная энергетика; парниковые газы; технологии и ресурсы получения водорода

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6843

Review

Problems and prospects of hydrogen production and usage

Sergey Belyaev

*PhD in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University
(Russian Federation), sergbel2014@mail.ru*

Maria Levina

*research assistant, Department of Multidisciplinary Scientific Research,
KarRC RAS (Russian Federation), marilevine@ya.ru*

Received: 1 March 2023 / Accepted: 27 April 2023 / Published: 9 May 2023

Abstract: More strict environmental performance requirements for fuels and power plants in recent decades have led to a large-scale search for new, cost-effective, environmentally friendly energy carriers. The increased demand for energy carriers has heightened interest in alternative sources of fuels including hydrogen to be used for electricity generation and in transportation business. The article discusses and analyzes the issues of production and use of hydrogen, which is currently considered a priority and promising energy carrier in many regions of the world. The main ways and technologies for producing hydrogen, its most important physical and chemical properties, operational and environmental characteristics are considered. It can be assumed that hydrogen and hydrogen energy may gain an impetus for wide commercialization under favorable economic conditions and compete with fossil fuels in certain regions of Europe and the world. The potential benefits from expanding the use of hydrogen and the development of hydrogen economy are seen primarily in healing the environment and enhancing the energy security of a number of regions and countries. It can be expected that future technological advances will promote the mid-term hydrogen competitiveness. Currently, European countries are considering increasing hydrogen production as a way to reduce dependence on Russian oil and gas import, as well as to reduce greenhouse gas emissions.

Keywords: hydrogen; fuel cell; hydrogen energy; greenhouse gases; technologies and resources for hydrogen production

1. Введение

В центре внимания многих исследований научных центров и компаний, прежде всего, стоит вопрос о влиянии новых технологий на уменьшение выбросов парниковых газов и глобальном потеплении.

Переход на водородное топливо неизбежно вызывает появление новых проблем. Водород представляет собой искусственный энергоноситель, который должен быть получен из существующих в природе веществ. Для понимания возможной роли водорода в процессе декарбонизации экономики необходимо провести анализ затрат энергии, требуемых на всех стадиях жизненного цикла водорода — от его производства до использования с целью получения электрической энергии или механической работы, необходимой для движения транспортных средств [8].

Существует несколько технологий производства водорода. Наиболее простая и удобная из них — электролиз воды. При этом получение водорода из воды электролизом — один из наиболее энергоёмких методов его получения. Если электричество используется от экологически чистого источника типа солнечной радиации, кинетической энергии ветра или энергии геотермальных источников, то электролиз можно считать чистым процессом, а получаемый водород — «зелёным». Но на данный момент водород, в основном, производится за счёт паровой конверсии метана. Этот отработанный в промышленных масштабах, дешёвый процесс ещё долго не будет иметь никаких конкурентов по себестоимости получаемого водорода (1—2 дол./кг в зависимости от цены газа и угля). Однако в процессе его создания образуется большое количество углекислого газа — 10 кг CO₂/кг H₂, поэтому многие эксперты считают, что такой, так называемый «серый», водород не может быть частью водородной экономики будущего. Возможным решением данной проблемы может служить применение технологий по улавливанию и хранению выделяемого углекислого газа, что, в свою очередь, приводит к удорожанию конечного продукта [5—8].

Рядом сдерживающих факторов для водородной экономики являются проблемы, возникающие при транспортировке и дальнейшем хранении водорода до передачи потребителю. Во всём мире ведутся разработки, чтобы увеличить экономическую эффективность и безопасность транспортировки водорода. Например, можно увеличить давление в трубопроводной системе, транспортировать водород в сжиженном состоянии, использовать суда — газовозы, железнодорожные и автомобильные цистерны [4], [9]. Перспективным способом представляется применение газопроводов. Водородные трубопроводы существуют сегодня, но они используются для того, чтобы транспортировать химический продукт от одного участка производства до другого. Энергия, требуемая для перемещения газа, в этом случае имеет вторичное значение, потому что расходы энергии на транспортировку — только часть полных издержек производства химического продукта и входит в его стоимость. Оценка энергии, требуемой для перекачки водорода по трубопроводам, может быть получена

на основании анализа работы трубопроводов природного газа, где накоплен достаточный опыт их создания и эксплуатации.

Хранение водорода также сопряжено с определёнными трудностями [6], [7]. На данный момент апробирован ряд способов, которые предполагают хранение в газообразном или в жидком виде, в связанном состоянии или в носителях, но все они имеют технические и экономические проблемы [11].

Нужно понимать, что фактическое потребление электрической энергии, для того чтобы получить, упаковать, передавать и хранить водород, может неожиданно легко превысить полезную энергию, получаемую за счёт его использования. В современной нефтегазовой экономике энергия, потерянная между производством горючего и его потреблением, составляет приблизительно 12 % для нефти и 5 % для газа. Очевидно, что необходимо оценить эти потери и для вариантов использования водорода в качестве горючего.

2. Материалы и методы

Объектом исследования являются материалы и информация статьи из открытых литературных источников по актуальным вопросам получения и применения водорода как перспективного энергоносителя, получаемого по современным и развивающимся технологиям.

В статье использованы такие методы исследования, как комплексный анализ и системный подход. Предлагается водородную энергетику рассматривать в качестве системы, которая динамично развивается с большими перспективами, а также с имеющимися противоречиями и рисками.

3. Результаты

Понятие водородной энергетики и экономики, рассматривающей водород в качестве перспективного коммерческого топлива, позволяющего частично или полностью заменить традиционные углеводороды, было введено ещё в конце прошлого века [19]. В последние годы этому процессу уделяется повышенное внимание, он по-прежнему вызывает неугасающий интерес. По некоторым оптимистическим прогнозам, водород может быть одним из перспективных топлив в XXI веке [2], [5], [9].

На рисунке 1 представлены основные виды топлив, активно используемых в разное время. Как видно из рисунка 1, концентрация водорода в топливах имеет тенденцию к увеличению. Насколько реален такой переход? Пока ответ на этот вопрос неоднозначен и требует более глубоких объективных и комплексных исследований, которые в настоящее время проводятся в большинстве развитых стран.

Водород — самый распространённый химический элемент во Вселенной, был открыт ещё в XVIII веке. Он не имеет цвета и запаха, не токсичен, легче воздуха и очень быстро рассеивается в атмосфере. При утечке водород почти мгновенно улетучивается [2].

Традиционные энергоносители, такие как бензин и нефть, являются достаточно токсичными для человека и живой природы, и ликвидация ущерба, причиняемого окружающей среде в аварийных ситуациях, сопровождающихся утечками нефтепродуктов, как правило, сопряжена с большими затратами.

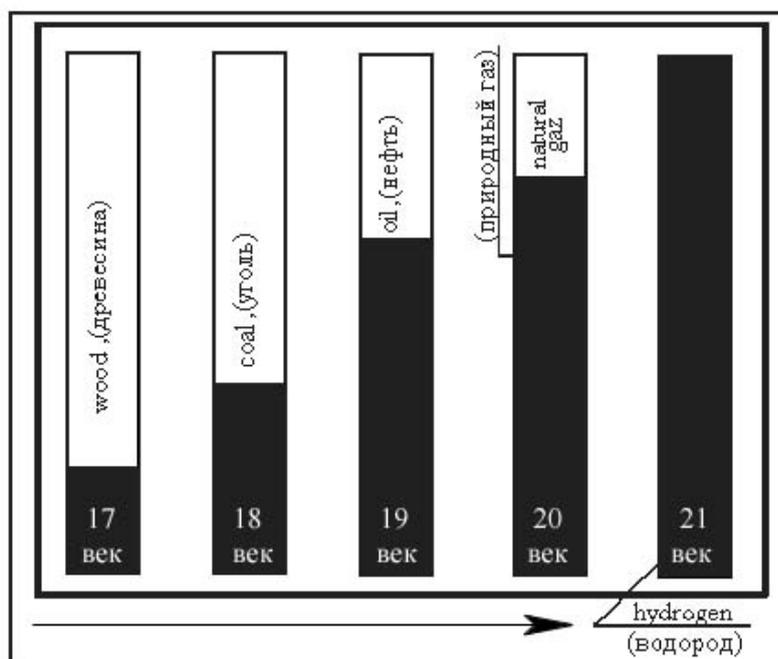


Рисунок 1. Содержание водорода в приоритетных топливах, используемых в разное время

Figure 1. Hydrogen content in priority fuels used at different times

В настоящее время водород выступает в качестве одного из промышленных газов и применяется в химической промышленности: в переработке нефти, производстве аммиака, метанола и стали. При этом энергетическое использование водорода реализуется лишь в объеме 1—2 % от общих объемов его потребления, и перспективы тесно связаны с развитием топливных элементов (ТЭ), лежащих в основе водородной энергетики.

Топливные элементы относятся к химическим источникам тока (ХИТ). Они осуществляют прямое превращение энергии топлива в электричество, минуя малоэффективные, идущие с большими потерями, процессы горения [1], [19]. Основа любого ХИТ — два электрода, соединённые электролитом. ТЭ состоит из анода, катода и электролита. На аноде окисляется, т. е. отдаёт электроны, восстановитель (топливо CO или H_2), свободные электроны с анода поступают во внешнюю цепь, а положительные ионы удерживаются на границе анод — электролит (CO^+ , H^+). С другого конца цепи электроны подходят к катоду, на котором идёт реакция восстановления (присоединение электронов окислителем O^{2-}). Затем ионы окислителя переносятся электролитом к катоду.

В ТЭ сведены вместе три фазы физико-химической системы:

- газ (топливо, окислитель);
- электролит (проводник ионов);
- металлический электрод (проводник электронов).

В ТЭ происходит преобразование энергии окислительно-восстановительной реакции в электрическую, причём процессы окисления и восстановления пространственно разделены электролитом [2]. Электроды и электролит в реакции не участвуют, но в реальных конструкциях со временем загрязняются примесями топлива.

Среди наиболее очевидных достоинств водородной энергии на базе топливных элементов (ТЭ) следует выделить [1]:

- минимальное влияние на загрязнение окружающей среды;
- технические преимущества;
- повышение энергетической безопасности;
- независимость от энергетических сетей (автономность);
- топливные элементы успешно заменяют батареи.

3.1. Влияние на окружающую среду

Преобразуя топливо через химическую реакцию прямо в энергию ТЭ, получают больше энергии по сравнению с обычными способами получения энергии через процессы сгорания. Прямой процесс получения энергии уменьшает расход и топлива, увеличивая эффективность от 30 до 90 % в зависимости от системы ТЭ и способов утилизации воды и тепла, образующихся при этом.

Минимальная эмиссия вредных веществ. При использовании водорода в качестве топлива в результате химической реакции выделяются вода, тепло и электроэнергия, а при любом самом совершенном сгорании обычных топлив образуются окислы углерода, азота, оксиды серы и другие продукты сгорания.

Уменьшение вредного влияния на окружающую среду, присущую добывающим отраслям промышленности. ТЭ позволяют избежать нарушения экосистемы, связанного с добычей ископаемых топлив из земли, т. к. водород при благоприятных условиях может быть получен из возобновляемых источников энергии. При утечке водорода его пары очень быстро улетучиваются, потому что он легче воздуха.

3.2. Технические достоинства топливных элементов

ТЭ могут работать на водороде, который получают из любого известного сегодня топлива (газ, спирт, бензин и т. д.).

Высокая энергетическая плотность. Мощность ТЭ обычно определяют в кВт/л. Этот показатель постоянно повышается, т. к. очень активно проводятся исследования технологии производства ТЭ.

Низкие рабочие температуры и давления. Температурный диапазон работы ТЭ лежит от 80 до 1000 °С и зависит от типа топливного элемента. Следует заметить, что температура сгорания в двигателе автомобиля может достигать 2300 °С.

Удобство в компоновке. ТЭ, обладающие минимальной шумностью и практически нулевой эмиссией вредных веществ, могут быть расположены в самых разных местах — как внутри системы, так и снаружи.

Потенциальная способность к увеличению эффективности в работе. Тепло, которое получается в результате химической реакции в ТЭ, может быть утилизировано для нагрева воды и помещений. В этом случае КПД (эффективность) теоретически может приблизиться к 90 %.

Высокая чувствительность к изменению нагрузки. Для получения дополнительной мощности при работе ТЭ необходимо больше подавать топлива в систему, т. е. это аналогично работе бензинового двигателя: нажимая на педаль газа, увеличиваем мощность автомобиля.

Техническая простота. ТЭ не включают никаких подвижных, сопряжённых деталей. Отсутствие любого вида движения позволяет получить простую конструкцию, с высокой степенью надёжности, спокойной работы и с меньшей вероятностью отказа.

3.3. Повышение энергетической безопасности

Водород, применяемый в ТЭ, может быть получен из местных источников топлива: природного газа, угля, при помощи электролиза воды и биомассы и других возобновляемых источников: ветровой энергии, фотоэлектричества и др.

Использование местных ресурсов уменьшает зависимость от поставщиков с других регионов и стран, повышает надёжность энергоснабжения.

Независимость от энергетических систем. Автономные системы с ТЭ позволяют получать потребителям стабильную электроэнергию, не опасаясь нарушения в работе электросетей по разным причинам (обледенение проводов, их обрыв и др.).

3.4. Применение и типы топливных элементов

Существует две сферы применения ТЭ: автономная и большая энергетика. Для автономного использования основными являются удельные характеристики и удобство эксплуатации. Для большой энергетики решающим фактором является экономичность. Кроме того, установки должны быть долговечными, не содержать дорогих материалов и использовать природное топливо при минимальных затратах на подготовку.

Наибольшие выгоды связаны с использованием ТЭ в автомобиле.

Основными областями использования автономных установок с ТЭ были военные и военно-морские применения. В конце 1960-х гг. объём исследований по ТЭ сократился, а после 1980-х гг. вновь возрос применительно к большой энергетике [2], [5]. В большой

энергетике очень перспективно использование ТЭ для крупномасштабного накопления энергии, например, получения водорода. Возобновляемые источники энергии (солнце и ветер) отличаются рассредоточенностью. Их активное использование, без которого в будущем не обойтись, немислимо без ёмких аккумуляторов, запасующих энергию в той или иной форме.

Проблема накопления актуальна уже сегодня: суточные и недельные колебания нагрузки энергоносителей заметно снижают их эффективность и требуют маневренных мощностей. Один из вариантов электрохимического накопления энергии — это ТЭ в сочетании с электролизерами и газгольдерами.

При этом в химической промышленности процесс производства водорода, его упаковки и транспортировки успешно реализуется. Но этот водород — химическое вещество, а не товар-энергоноситель. В химической промышленности затраты на производство водорода, его транспортировку и др. входят в цену синтезируемых химических продуктов. Стоимость водорода является приемлемой, пока конечные продукты находят сбыт на рынке. Таким образом, сегодня использование водорода управляется экономическими законами, а не энергетическими и экологическими соображениями [3], [6].

Очевидно, что водород как потенциальный энергоноситель обладает определёнными физическими и экологическими преимуществами, и зародившийся мировой водородный рынок сможет конкурировать с рынком углеводородов [11], [19]. Фундаментальный вопрос о том, сколько энергии необходимо, чтобы использовать водородную экономику, должен быть обязательно изучен. Для этого необходимо проанализировать ключевые стадии жизненного цикла водорода как горючего: производство, упаковку (первичное хранение), транспортировку, хранение на заправочной (или раздаточной) станции и передачу элементного водорода потребителю и сравнить энергию, использованную на этих стадиях, с количеством энергии водорода, поставленного потребителю [10], [12].

Из водорода состоит большая часть видимой материи в нашей Вселенной. На Земле почти весь водород связан с кислородом, образуя воду, или с углеродом — органика и углеводороды, включая уголь, нефть и природный газ. Эти связи могут быть разрушены, чтобы сделать водород подходящим энергоносителем. Он должен быть отделён и доставлен до места выработки энергии. Генерация энергии происходит, когда водород вновь соединяется с кислородом либо путём сжигания, либо в ходе химической реакции водорода и кислорода, происходящей на топливном элементе катода. Процесс горения водорода обеспечивает тепловой энергией, в то время как реакции на топливном элементе дают как тепло, так и электричество.

Производство водорода требует энергии [8]. Способы получения водорода широко и давно известны, вот некоторые из них:

- получение из ископаемых топлив. В химической формуле любого топлива присутствует водород. Некоторые из топлив имеют очень высокое отношение водорода

к кислороду, и это делает их наилучшим кандидатом процесса добывания. Например, природный газ (метан);

- получение водорода из природного газа по технологии реформинга паром. Эффективность данного процесса достигает 70—90 %;

- получение водорода из воды методом электролиза. По сравнению с паровым реформингом электролиз — очень дорогой процесс получения водорода;

- получение водорода методом фотоэлектролиза, т. е. прямым преобразованием солнечной энергии в электрическую;

- получение водорода фотобиологическим методом. Данный процесс включает использование солнечной энергии, катализатора и технической системы. Специфические микроорганизмы, микробы, бактерии могут производить водород при определённых условиях;

- получение водорода пиролизом и газификацией биомассы и угля или другого органического топлива, в ходе которой водород выделяется в виде летучих фракций под воздействием тепла;

- биологические процессы с использованием живых организмов для разложения воды или органики.

Каталитическая реакция является преобладающим способом производства водорода на сегодняшний день, в то время как электролиз только набирает популярность. Остальные способы сейчас находятся на экспериментальной стадии.

Далёкие мечты, продвигаемые исследователями и сторонниками устойчивой энергетики, связаны с электролитическим производством водорода с помощью возобновляемых источников энергии.

Возобновляемые источники энергии (фотогальванические солнечные элементы, ветер, малая гидроэнергетика, геотермальная энергетика и даже энергия волн) — технологии, доступные сегодня и всё в большей степени используемые для производства энергии. Полученный водород может храниться и использоваться, по мере необходимости, для производства электроэнергии или непосредственно в качестве топлива. Стабильное получение и хранение водорода является основным фактором, чтобы возобновляемая энергетика стала экономически целесообразной [3], [9], [15].

Данный сценарий развития для электрических и транспортных систем, основанный на возобновляемом водороде, является весьма привлекательным. Кажется, что это решение для некоторых, самых актуальных проблем энергетики. Пока что такое развитие событий сталкивается с комплексом трудноразрешимых вопросов, и ответы на эти вопросы не менее сложны. Они сосредоточены вокруг реальности, где производство электроэнергии из возобновляемых источников теоретически не сокращено, но на практике преобладают серьёзные ограничения.

Центральный вопрос — как с максимальной выгодой использовать ограниченные электрогенерирующие источники с минимальными выбросами углекислого газа от сжигания

ископаемого топлива, который является главной причиной глобального потепления. Актуальным является также следующий вопрос: являются ли реально возобновляемые источники энергии лучшими кандидатами для получения водорода [4], [8], [11].

В основе данного анализа, главным образом, следует учитывать экономическую эффективность [8], [15]. Очевидно, что степень эффективности использования возобновляемых источников энергии определяет степень реализации экологических преимуществ при их использовании. Все энергосистемы функционируют с некоторым снижением КПД [15].

Количество энергии, которое, на самом деле, производится и используется, меньше количества энергии, что потенциально содержится в топливе, или количества энергии, которое могло бы быть выделено этим топливом. В известном смысле, это несправедливое соревнование, т. к. полученный водород из возобновляемых источников энергии всегда включает ступени преобразования, не предусмотренные традиционной энергосистемой. Например, сначала водород должен быть получен путём электролиза, а затем он должен быть введён в топливные элементы. Два процесса являются зеркальным отражением друг друга. От 10 до 30 % энергии теряется во время электролиза. Тогда лишь часть энергии, заключённой в водороде, превращается в электричество. Посчитать полный КПД несложно. Если при электролизе КПД может достигать 80 %, а топливного элемента 60 %, то на выходе общий КПД системы получается 48 %. Действующая энергосистема таким потерям не подвержена. Это хорошо понимают сторонники водородной экономики, и не только они.

Скромная эффективность получения водорода из возобновляемых источников энергии имеет экономическую важность, вот почему многие эксперты прогнозируют, что полученный из ископаемого топлива водород, вероятно, будет господствовать в ближайшие десятилетия. Сейчас примерно более 500 млрд м³ водорода производится ежегодно для самых разнообразных целей — от очистки масла до кулинарии, 96 % от этого объёма добывается из ископаемых, остальные 4 % получают путём электролиза. В ближайшие десятилетия конверсированный паром природный газ с целью получения водорода, возможно, сможет стать экономически более выгодным способом. Пока природный газ не станет более дорогостоящим и запасы его не пойдут на убыль, водород, добытый с помощью газификации угля, будет ожидать ждать своего часа. Уголь представляет примерно 90 % от мировых запасов традиционных ископаемых топлив [3], [4].

Вторая значительная перспектива использования водородной энергетики — хранение энергии, полученной от возобновляемых источников, дающих энергию скачкообразно; данный способ сможет соперничать с технологиями, включающими батареи, гидроаккумулирующие станции и сжатый воздух.

Между водородом и топливными элементами должно быть сделано важное разграничение. Зачастую они обсуждаются как единое целое. Но водород — это топливо, в то время как топливные элементы — устройство для преобразования энергии. Топливные элементы также являются высокоэффективным устройством для преобразования энергии

водорода. Топливные элементы могут работать в стационарном режиме, питая электрогенераторы, потенциально с большей эффективностью, чем центральные электростанции или другие небольшие технологические системы для распределения энергии.

Такие элементы можно использовать в качестве дополнительного источника, что обеспечит увеличение эффективности системы электроснабжения. Потери на линиях исключаются. Тепло, вырабатываемое топливными элементами, может быть направлено в систему отопления, вентиляции и кондиционирования зданий.

Очень важно придерживаться объективного подхода в анализе энергоэффективности, потому что он предлагает явные и простые способы иллюстрации требований и воздействия на окружающую среду различных путей энергоснабжения. Сравнение относительной эффективности водорода и электричества привносит ясность в суть дела, которую не дадут другие системы показателей [15]. Анализ КПД показывает, как много полезной энергии вырабатывается от одинаковых объёмов затраченной энергии. Время покажет, будет ли тот или иной способ энергоснабжения фактически реализован [8]. В то же время анализ КПД обеспечивает основу для определения того, какие пути являются наиболее перспективными для экологических выгод. Также более уместно при исследовании долгосрочных перспектив использовать анализ энергоэффективности, поскольку экономические прогнозы, как правило, в большей степени подвержены изменчивости и неопределённости [13], [17].

Электричество от возобновляемых источников может вырабатываться на тех же предприятиях, которые используют энергию сжигания ископаемых топлив, в то же время уменьшая выбросы парниковых газов. Но применение некоторых возобновляемых источников сможет уменьшить выбросы парниковых газов.

Тенденции в области технологий, экономики и роста рынка указывают на то, что возобновляемая энергетика в будущем станет более распространённой, но с течением некоторого времени, скорее всего, останется относительно ограниченным ресурсом. Но очевидно, что уже в наши дни прогнозируется увеличение спроса на энергию. Большинство генерируемой от возобновляемых источников энергии найдёт прямые рынки сбыта, и большая часть мира не будет испытывать переизбытка такой энергии в течение, как минимум, десятилетий. Таким образом, вопрос эффективности будет оставаться важным, даже несмотря на то, что возобновляемая энергетика влияет на окружающую среду, как утверждается в различных спорах о ветровых электростанциях. Эти воздействия подразумевают ограничения, которые будут продолжать делать эффективное использование возобновляемой энергетике жизненно важной задачей.

В то время как существует большой интерес к использованию водорода, можно надеяться, что будут активно обсуждаться вопросы энергетических альтернатив. Водород можно получать также электролизом воды, т. е. разложением её под воздействием электрического тока, получаемого от различных источников энергии. Для получения электрической энергии используются ветровой генератор, фотогальванические элементы, сеть переменного тока и энергия солнца, которые являются возобновляемыми источниками энергии. В дальнейшем

полученный водород поступает в системы хранения или транспортируется к потребителям [3], [4]. Как показано на рисунке 2, для получения водорода в данный момент существует множество различных путей добывания из ряда известных источников.

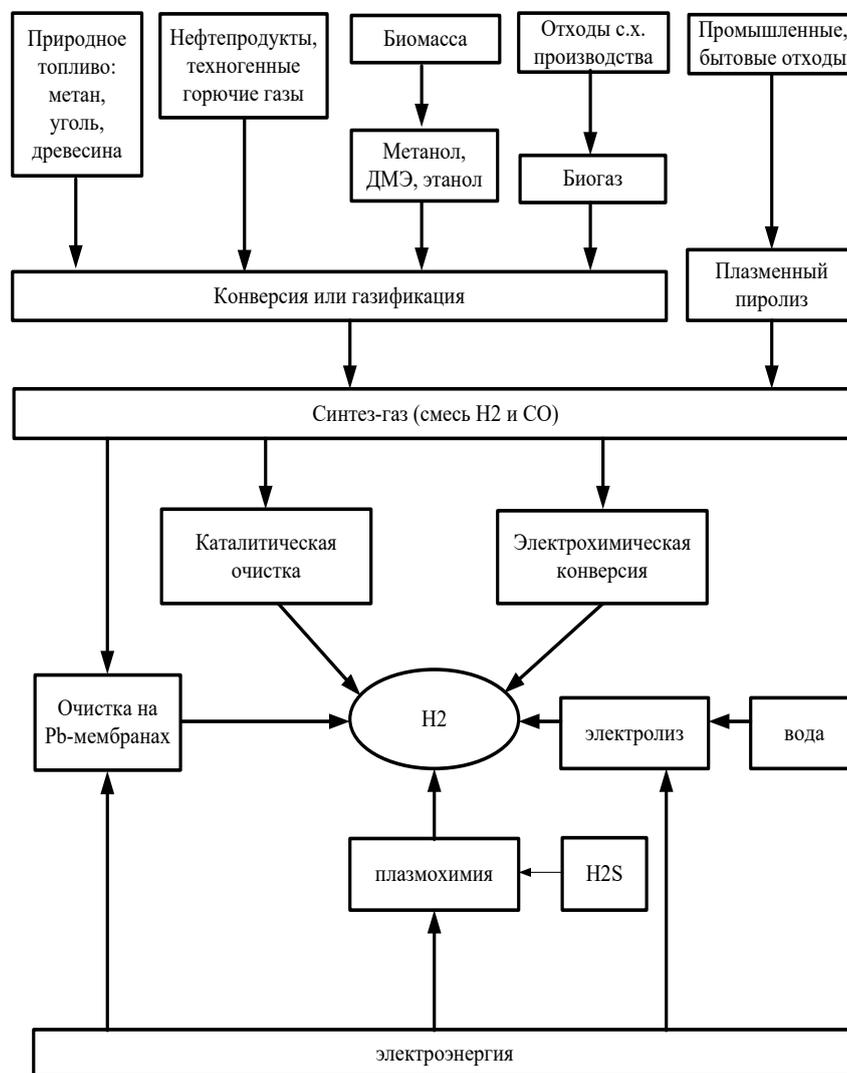


Рисунок 2. Возможные источники и пути получения водорода

Figure 2. Possible sources and ways of obtaining hydrogen

Один из его источников — природное топливо: метан, уголь, древесина, нефтепродукты, техногенные горючие газы. При взаимодействии топлива с парами воды или воздухом образуется синтез-газ — смесь CO и H_2 . Из неё затем выделяется водород. Другой источник — отходы сельскохозяйственного производства, из которых получают биогаз, а затем — синтез-газ. Промышленно-бытовые отходы тоже используются для производства синтез-газа, что способствует одновременно и решению экологических проблем, поскольку отходов много и их нужно утилизировать. В конечном счёте, образуются углекислый газ,

водород и окись углерода. Дальше идёт каталитическая очистка, электрохимическая конверсия и т. д. Очень важным элементом при преобразовании газа, содержащего водород, является очистка газа на палладиевых мембранах. В результате получается чистый водород.

Безопасен ли водород?

Водород является энергоносителем. Он без цвета и не имеет запаха, легче воздуха и очень быстро рассеивается в атмосфере. Один килограмм водорода содержит такое же количество энергии, как 2,1 кг природного газа или 2,8 кг бензина.

Энергетическая плотность водорода составляет 2,36 кВт/л, природного газа — 5,8 кВт/л и бензина — 8,76 кВт/л. Эти факты позволяют сделать вывод о размерах ёмкости для хранения водорода и бензина, а также о мощности взрыва этих двух топлив.

Водород не токсичен. Бензин и нефть достаточно токсичны для человека и живой природы. При утечке водорода он почти мгновенно улетучивается, при потерях нефтепродуктов требуются большие затраты по ликвидации ущерба окружающей среде.

Для воспламенения водорода требуется его большая концентрация в воздухе по сравнению с другими топливами. Действительно, водород обладает широкими пределами воспламенения, нижний предел выше, чем, например, у бензина. Для бензина концентрация его паров в воздухе выше 1 % становится взрывоопасной, у водорода этот уровень составляет от 4 %. Поэтому риск взрыва меньше, чем у паров бензина. Однако, учитывая, что верхний предел воспламенения может быть и 74—75 %, очень сложно управлять процессом сгорания, например, в тепловых двигателях [2].

При соответствующей специальной подготовке обслуживающего персонала водород может быть ничуть не опаснее, чем многие другие виды топлива, широко применяемые в настоящее время [1]. Использование водорода и ТЭ открывает новые перспективы в автомобилестроении.

Концерн «БМВ» провёл серию тестов на безопасность водородных баков при авариях. Удалось создать такой топливный бак, который бы не взрывался ни при каких ситуациях и выдерживает нагрев до 1000 °С в течение 70 мин. Если же бак всё-таки разрушится, то водород будет гореть в воздухе. Бензин, разлившийся при аварии, горит на земле, сжигает всё вокруг. Пример такой аварии представлен на фото 1, где автомобиль заправлен водородом, и на фото 2, где машина заправлена бензином.



Фото 1. Начало аварии топливных баков. Время: 0 мин, 3 с. Происходит воспламенение обоих топлив

Photo 1. Onset of the fuel tanks crash, time is 0 minutes, 3 seconds. Ignition of both fuels occurs



Фото 2. Продолжение аварии. Время: 1 мин, 0 с. Водородный поток спадает, пожар транспортного средства на бензине начинает увеличиваться

Photo 2. Continuation of the accident. Time: 1 minute, 0 seconds. Hydrogen flow subsides, gasoline vehicle fire starts to increase

4. Обсуждение и заключение

В настоящее время максимальное внимание уделяется стадиям хранения и использования водорода, которые справедливо считаются критическими для развития водородной энергетики [14], [16], [18].

Водород, как уже отмечалось, должен быть получен, упакован, транспортирован и передан пользователю. Реализация этих процессов требует затрат энергии.

В современной нефтегазовой экономике энергия, потерянная между производством горючего и его потреблением, составляет приблизительно 12 % для нефти и 5 % для газа. Очевидно, что необходимо оценить эти потери и для вариантов использования водорода в качестве горючего.

Фактически значительное количество водорода уже производится, обрабатывается, транспортируется и используется в химической промышленности. Но этот водород — химическое вещество, а не товар-энергоноситель. В химической промышленности затраты на производство водорода, его транспортировку и др. входят в цену синтезируемых химических продуктов. Стоимость водорода является приемлемой, пока конечные продукты находят сбыт на рынке. Таким образом, сегодня использование водорода управляется экономическими законами, а не энергетическими и экологическими соображениями [3], [9], [15]. Однако если водород должен использоваться как энергоноситель, энергетические и экологические проблемы нужно учитывать наравне с экономическими.

Необходимо иметь в виду, что водород — синтетический энергоноситель. Он только переносит энергию, сгенерированную другими процессами. Например, как уже отмечалось, водород может быть произведён с помощью электричества электролизом воды. Далее высококачественная (в термодинамическом смысле) электрическая энергия должна использоваться для сжатия или сжижения водорода, обеспечения транспортировки и хранения его у потребителя. Во многих случаях на стадии использования водорода в электрохимических генераторах, несмотря на их высокий КПД, не удаётся скомпенсировать все эти потери. Например, в стационарных приложениях водород, получаемый электролизом, не смог бы конкурировать с электричеством сети, которое могло быть распределено непосредственно пользователям с намного меньшими потерями первичной энергии. Очевидно, что стоимость водорода должна быть как можно более низкой. Однако этого недостаточно. Водородная экономика может иметь будущее только в том случае, если водород сможет конкурировать с традиционными энергоносителями [9], [13].

Существующая инфраструктура может обработать почти любой синтетический (жидкий) углеводород, в то время как водород требует полностью новой инфраструктурной сети. Переход к элементной водородной экономике затронул бы общую поставку энергии и его распределение потребителю. Фундаментальный вопрос о том, сколько энергии необходимо, чтобы развивать водородную экономику, должен быть обязательно изучен. Для этого необходимо проанализировать ключевые стадии жизненного цикла водорода как горючего:

производство, упаковку (первичное хранение), транспортировку, хранение на заправочной (или раздаточной) станции и передачу элементного водорода потребителю, а также сравнить энергию, использованную на этих стадиях, с количеством энергии водорода, поставленного потребителю [14], [17].

Список литературы

1. *Беляев С. В., Давыдков Г. А.* Проблемы и перспективы применения водорода в тепловых двигателях // Инженерный вестник Дона: Электронный научный журнал. 2019. № 8. С. 1—10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N8y2019/6123. Текст: электронный.
2. *Беляев С. В.* Топлива для современных и перспективных автомобилей. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2005. 236 с.
3. *Боброва В. В., Борисюк Н. К., Кирхмейер Л. В.* Водородная экономика — возможности и перспективы // Вестник Самарского университета. Экономика и управление. 2021. Т. 13, № 1. С. 7—16.
4. *Козлов С. И., Фатеев В. Н.* Водородная энергетика: современное состояние, проблемы, перспективы. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2009. 520 с.
5. *Коровин Н. В.* Топливные элементы и электрохимические установки: состояние развития и проблемы // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology, ISJAEE. 2004. № 10 (18). С. 9—14.
6. Проблемы аккумулирования и хранения водорода / В. Н. Фатеев, О. К. Алексеева, С. В. Коробцев [и др.] // Chemical problems. 2018. No. 4 (16). P. 453—479.
7. *Barthelemy H., Weber M., Barbier F.* Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives // Int. Journal Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42. P. 7254—7262.
8. *Bossel U., Eliasson B., Taylor G.* The Future of the Hydrogen Economy. Bright Right or Bleak, 2004.
9. The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R & D Needs, Committee on Alternatives and Strategies for Future Hydrogen Production and Use, National Academy of Engineering, National Academies Press. URL: <http://www.nap.edu/books/0309091632/html/2004>.
10. *Carlson E. J.* Cost Analyses of Fuel Cell Stack/Systems // Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies. Cambridge, 2003. Progress Report.
11. Center for Energy and Climate Solutions. Hydrogen and Fuel Cells: A Technology and Policy Review. Prepared for the National Commission on Energy Policy. October 2003.
12. *Lipman T. E.* What Will Power the Hydrogen Economy? Present and Future of Hydrogen Energy. An alysis and Report Prepared for The Natural Resources defense Council. 2004. 74 p.
13. *Lightner V.* Hydrogen Fuel Cell and Infrastructure Technologies Program. Office of Energy Efficiency and renewable Energy, US Department of Energy. Fuel Cell seminar, 2005.
14. *Lishuai Xie, Jinshan Li, Tiebang Zhang.* Microstructure and hydrogen storage properties of Mg—Ni—Ce alloys with a long-period ordered phase // Journal Power Sources. 2017. Vol. 338. P. 91—102.
15. Cost of Some Hydrogen Fuel Infrastructure Options / M. Mintz, S. Folga, J. Molburg [et al.]. Argonne, IL: Argonne National Laboratory, 2002.
16. Complex hydrides for hydrogen storage — new perspectives / B. L. Morten [et al.] // Materials Today. 2014. Vol. 17. P. 122—128.

17. *Spreng D T.* Net-Energy Analysis and the Energy Requirements of Energy Systems. New York: Praeger, 1988.
18. *Todorovic R.* Hydrogen storage technologies for transportation // Application Journal of Undergraduate Research. 2015. Vol. 5, no. 1. P. 56—59.
19. United States Department of Energy. Hydrogen, Fuel Cells and Infrastructure Technologies Program.

References

1. Belyaev S. V., Davydkov G. A Problems and prospects for the use of hydrogen in thermal engines. *Engineering Bulletin of the Don: Electronic scientific journal*, 2019, no. 8, pp. 1—10. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N8y2019/6123. Text. Image: electronic. (In Russ.)
2. Belyaev S. V. *Fuels for modern and advanced vehicles*. Petrozavodsk, Publishing house PetrSU, 2005. 236 p. (In Russ.)
3. Bobrova V. V., Borisyuk N. K., Kirkhmeer L. V. Hydrogen economy — opportunities and prospects. *Bulletin of the Samara University. Economics and Management*, 2021, vol. 13, no. 1, pp. 7—16. (In Russ.)
4. Kozlov S. I., Fateev V. N. Hydrogen energy: current state, problems, prospects. Moscow, Gazprom VNIIGAZ, 2009. 520 p. (In Russ.)
5. Korovin N. V. Fuel Cells and Electrochemical Plants: State of Development and Problems. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology, ISJAEE*, 2004, no. 10 (18), pp. 9—14. (In Russ.)
6. Fateev V. N., Alekseev O. K., Korobtsev S. V., Seregin E. A., Fateeva T. V., Grigoriev A. S., Aliev A. Sh. Problems of accumulation and storage of hydrogen. *Chemical problems*, 2018, no. 4 (16), pp. 453—479 (In Russ.)
7. Barthelemy H., Weber M., Barbier F. Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives. *Int. Journal Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, pp. 7254—7262.
8. Bossel U., Eliasson B., Taylor G. *The Future of the Hydrogen Economy*. Bright Right or Bleak, 2004.
9. The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R & D Needs, Committee on Alternatives and Strategies for Future Hydrogen Production and Use, National Academy of Engineering, National Academies Press. URL: <http://www.nap.edu/books/0309091632/html/2004>.
10. Carlson E. J. Cost Analyses of Fuel Cell Stack/Systems. *Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies*. Cambridge, 2003. Progress Report.
11. Center for Energy and Climate Solutions. Hydrogen and Fuel Cells: A Technology and Policy Review. Prepared for the National Commission on Energy Policy. October 2003.
12. Lipman T. E. *What Will Power the Hydrogen Economy? Present and Future of Hydrogen Energy. An analysis and Report Prepared for The Natural Resources defense Council*. 2004. 74 p.
13. Lightner V. *Hydrogen Fuel Cell and Infrastructure Technologies Program*. Office of Energy Efficiency and renewable Energy, US Department of Energy. Fuel Cell seminar, 2005.
14. Lishuai Xie, Jinshan Li, Tiebang Zhang. Microstructure and hydrogen storage properties of Mg—Ni—Ce alloys with a long-period ordered phase. *Journal Power Sources*, 2017, vol. 338, pp. 91—102.
15. Mintz M., Folga S., Molburg J., Gillette J. *Cost of Some Hydrogen Fuel Infrastructure Options*. Argonne, IL: Argonne National Laboratory, 2002.
16. Morten B. L., Lars H. J., Young-Su Lee, Young Whan Cho. Complex hydrides for hydrogen storage — new perspectives. *Materials Today*, 2014, vol. 17, pp. 122—128.

17. Spreng Daniel T. *Net-Energy Analysis and the Energy Requirements of Energy Systems*. New York, Praeger, 1988.
18. Todorovic R. Hydrogen storage technologies for transportation. *Application Journal of Undergraduate Research*. 2015, vol. 5, no.1, pp. 56—59.
19. United States Department of Energy. Hydrogen, Fuel Cells and Infrastructure Technologies Program.

© Беляев С. В., Левина М. С., 2023