

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГЕТИКИ

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-2-89-96>
УДК 62-622

Современные направления развития водородных энергетических технологий

Филимонова А. А.^{1*}, Чичиров А. А.¹, Чичирова Н. Д.¹, Филимонов А. Г.¹, Куличихин В. В.²

¹ ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»
ул. Красносельская, 51, 420066, г. Казань, Россия

² ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
ул. Красноказарменная, 14, 111250, Москва, Россия

Поступила / Received 30.04.2019

Принята к печати / Accepted for publication 18.06.2019

Водородная энергетика объединяет комплекс технологий производства, транспортировки, аккумулирования и использования универсального вторичного энергоносителя — водорода. Энергетическое использование водорода формируется из возможностей экологически чистого получения электроэнергии и длительного хранения без потерь, в том числе крупномасштабного. Вопросы, связанные с потреблением водорода как перспективного экологически чистого и универсального энергоносителя и аккумулятора энергии в различных отраслях народного хозяйства, были сформулированы в начале 70-х годов прошлого столетия после первого нефтяного топливного кризиса. Стало очевидно, что необходима разработка новых, оптимальных с экологической точки зрения энергетических технологий, основанных на использовании возобновляемых энергоисточников, атомной энергии, угля и универсальных экологически чистых энергоносителей, дающих возможность заменить невозобновляемые энергоресурсы по мере их истощения и удорожания. Водород в качестве вторичного энергоносителя раскрывает свой потенциал в глобальной стратегии устойчивого энергетического развития в 21-м веке, которая противостоит вызовам необратимого изменения климата, неустойчивого производства нефти и усиливающегося загрязнения окружающей среды. Водород может играть ключевую роль в магистральных перевозках автомобильным и железнодорожным транспортом, в прибрежном и международном судоходстве, в авиационных перевозках, а также в долгосрочном и сезонном хранении электроэнергии в сетях, опирающиеся в основном на локальные возобновляемые источники энергии и местное сырье. Решающим звеном коммерциализации технологий водородного топлива в России на текущем этапе является формирование экономически эффективных водородно-транспортно-энергетических комплексов, в том числе в составе электрогенерирующих объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водородная энергетика, производство, очистка, хранение, транспортировка водорода

Адрес для переписки:

Филимонова А. А.
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»
ул. Красносельская, 51, 420066, г. Казань, Россия
e-mail: aachichirova@mail.ru

Address for correspondence:

Filimonova A. A.
Kazan State Power Engineering University,
Krasnoselskaya St., 51, 420066, Kazan, Russia
e-mail: aachichirova@mail.ru

Для цитирования:

Филимонова А. А., Чичиров А. А., Чичирова Н. Д., Филимонов А. Г., Куличихин В. В. Современные направления развития водородных энергетических технологий. Надежность и безопасность энергетики. 2019. – Т. 12, №2. – С. 89–96.
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-2-89-96>

For citation:

Filimonova A. A., Chichirova N. D., Chichirov A. A., Filimonov A. G., Kulichikhin V. V. [Modern directions for the development of hydrogen energy technologies]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2019, vol. 12, no. 1, pp. 89–96. (in Russian)
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-2-89-96>

Modern directions for the development of hydrogen energy technologies

Filimonova A. A.^{1*}, Chichirova N. D.¹, Chichirov A. A.¹, Filimonov A. G.¹, Kulichikhin V. V.²

¹ «Kazan State Power Engineering University»

Krasnoselskaya St., 51, 420066, Kazan, Russia

² National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

Krasnokazarmennaya str., 14, 111250, Moscow, Russia

Hydrogen energy combines a set of technologies for the production, transportation, storage and use of a versatile secondary energy carrier — hydrogen. The energy use of hydrogen is formed from the possibilities of environment-friendly generation of electricity and long-term storage without loss, including on a large scale. Questions related to the consumption of hydrogen as a promising environment-friendly and versatile energy carrier and energy storage in various sectors of the national economy were formulated in the early 70s of the last century after the first oil fuel crisis. It has become obvious that it is necessary to develop new, ecologically optimal energy technologies based on the use of renewable energy sources, nuclear energy, coal and versatile environment-friendly energy carriers, making it possible to replace non-renewable energy resources as these are depleted and become more expensive. Hydrogen as a secondary energy carrier reveals its potential in a global strategy for sustainable energy development in the 21st century, which confronts the challenges of irreversible climate change, unsustainable oil production and increasing environmental pollution. Hydrogen can play a key role in mainline transportation by road and rail, in coastal and international shipping, in air transport, as well as in long-term and seasonal storage of electricity in networks, relying mainly on local renewable energy sources and local raw materials. The decisive element in the commercialization of hydrogen fuel technologies in Russia at the current stage is the formation of cost-effective hydrogen-transport-energy complexes, in particular, within power generating facilities.

KEYWORDS: hydrogen energy, production, purification, storage, transportation of hydrogen

На сегодняшний день возобновляемая энергетика, особенно солнечная и ветровая, меняет роль второстепенного игрока в нише нетрадиционных источников энергии и по своей включенности в экономику развитых стран становится в один ряд с традиционными. Возобновляемая энергетика в 2014 г. покрывала около 19.2% от полного мирового потребления энергии, при этом размер установленных мощностей и генерации стремительно растет с каждым годом [1].

В современном мире процент использования возобновляемых источников энергии доходит до 27% в США, Канаде и Австралии, до 18% в Европе, Китае и Японии и самый низкий среди ведущих экономических держав, всего лишь 3% — у России [2].

Как обещает Всемирное энергетическое агентство [3], в ближайшие десятилетия произойдет серьезная трансформация мировой структуры генерации электрической энергии, которая создаст условия перехода от монополии ископаемых к более равномерному распределению с приблизительно равными долями различных первичных источников энергии. В некоторых странах Европы и отдельных штатах США, например, уже объявлено о полном отказе от традиционных двигателей внутреннего сгорания к 2025 г. Предполагаемые сроки массового замещения углеводородного топлива водородным — 2020–2050-е гг. Таким образом, все развитые страны, в том числе и Российская Федерация, будут индуцированы к участию в конкурентной борьбе технологий [4].

В связи с этим за последние 20 лет кривая интереса к исследованиям в области водородной энергетики пре-

терпевала значительные изменения. В начале 2000-х годов произошел резкий всплеск научной активности в области технологий производства водорода. По данным Европейской комиссии, в 2010 г. главными инвесторами в развитие водородной энергетики были США (\$500 млн.), Япония (\$300 млн.) и страны ЕС (\$230 млн.). К странам-лидерам также относятся Южная Корея (\$100 млн.) и Китай (\$60 млн.). В Китае водородные топливные элементы и использование водорода рассматриваются на правительственном уровне как центральное направление долгосрочного развития науки и технологий. Основные области развития — производство портативной электроники, стационарных и мобильных устройств, получение водорода с использованием солнечной энергии, энергии биомассы, природного газа и угля.

После начала мирового финансового кризиса на рубеже 2010 г. отмечен резкий спад и переход к стабилизации за исключением подъема интереса к технологиям получения водорода электролизом воды. Нужно отметить, что наибольшим интересом исследователей пользуются технологии получения биоводорода. Несмотря на то, что биологическое производство водорода далеко от внедрения в практику, количество публикаций на эту тему превосходит количество опубликованных работ по термохимическим методам получения водорода.

Если рассматривать публикационную активность исследователей из разных стран, изучающих водородную энергетику за период с 1997 по 2018 гг. по данным Scopus, то здесь с существенным отрывом лидируют

исследователи из КНР (20% из 40072 опубликованных работ по данной тематике). Второе место принадлежит США, далее следуют Япония, Южная Корея и страны Евросоюза. Россия занимает 19-е место [5].

В список перспективных технологий, развитию которых исследователи уделяют наибольший интерес в настоящее время, входят твердо-полимерный электролиз воды, пилотные проекты технологии Power-to-Gas и производства водорода за счет возобновляемых источников энергии, создание топливных элементов различных типов, нанотехнологии и наноматериалы при разработке мембран топливных элементов [6–8], поиск дешевых катализаторов для твердо-полимерных топливных элементов. Перспективное и востребованное направление в электроэнергетике построение умных сетей Smart Grid реализуется на сегодняшний день по всему миру в различных масштабных проектах. А в недалеком будущем планируется объединение электрических, топливных и тепловых сетей в интеллектуальную систему. Международное энергетическое агентство рассматривает водород как связующее звено между этими сетями [9].

Водородная энергетика сводится к получению водорода в основном путем электролиза воды, хранению водорода в сжатом или твердофазном связанном виде и получению электрической энергии с использованием электрохимических генераторов (топливных элементов) или водородосжигающих установок, включая двигатели внутреннего сгорания [10–13].

Известны различные способы производства водорода, начиная от традиционных, таких, как электролиз воды и конверсия углеводородов, и заканчивая биологическими методами, когда водород выделяется специально подобранными микроорганизмами.

На сегодняшний день в мире промышленным способом производится порядка 60 млн.т водорода, при этом практически 95% производимого водорода получается из углеродсодержащего сырья, в первую очередь ископаемого — природного газа, угля и нефтепродуктов. Большая часть производимого водорода является побочным продуктом переработки нефти и используется на месте производства в технологической цепочке. Вторым основным источником водорода является природный газ (метан), а сферой потребления — производство аммиака.

Ключевые технологии получения водорода из углеводородов, угля и биомассы:

- паровая конверсия углеводородов;
- газификация твердых топлив;
- термохимическое разложение воды при использовании энергии высокотемпературного ядерного реактора;
- электролиз воды;
- биологические методы (ферментация, фотолиз).

В процессах паровой каталитической конверсии в качестве исходного сырья могут использоваться природный газ, состоящий на 95–99% из метана, сухие газы нефтепереработки, бензин и водяной пар.

Технология паровой конверсии метана (ПКМ) является достаточно эффективной, но имеет ряд проблем,

прежде всего, связанных с неуклонным ростом цен на природный газ в связи с истощением дешевых месторождений. Это приведет к неизбежному росту стоимости водорода, получаемого по этому методу. Кроме того, метод не является экологически абсолютно чистым, поскольку ему сопутствуют выбросы CO_2 и других парниковых газов, которые образуются как в самом процессе ПКМ, так и за его пределами в системе транспорта газа и генерирования электроэнергии, вырабатываемой в энергосистеме, где в течение длительного времени еще будут преобладать тепловые электростанции, сжигающие органические топлива.

Между тем, в краткосрочной перспективе (10–15 лет) природный газ является наилучшим и наиболее дешевым решением для перехода к водородной энергетике, но в долгосрочной перспективе стратегия производства водорода должна быть нацелена на возобновляемые источники энергии или ядерную энергию, имеющие значительно более обнадеживающие перспективы с точки зрения снижения затрат и сокращения выбросов CO_2 .

В процессе газификации водород может быть получен из большого количества топлив: уголь, сланцы, торф, твердые органосодержащие отходы производства. Особый интерес для водородной энергетике представляют угли, природные запасы которых огромны и намного превышают запасы остальных органических топлив.

Установки для газификации угля относительно хорошо освоены. Все эти системы используют пар и воздух (или кислород) для окисления углерода. Наиболее перспективным для промышленной газификации угля на сегодняшний день можно считать высокотемпературный газификатор Винклера с кипящим слоем [14]. Состав газа на его выходе содержит максимальную объемную долю водорода — до 35%. Тепло- и массообмены в кипящем слое при атмосферном давлении достаточно интенсивны. Это обеспечивает высокую степень окисления углерода топлива (до 90%). В газификаторе Винклера предусмотрено шлакоудаление, что обуславливает сравнительно низкую температуру процесса (около 1000°C). Существуют проекты усовершенствования газификатора Винклера за счет повышения температуры и давления. В процессе газификации угля при одинаковом выходе водорода выбросы CO_2 оказываются в 2,3 раза больше, чем при получении газообразного водорода по методу ПКМ.

Газификация угля может оказаться экономически привлекательной в районах дешевого угля. Однако, в этом способе выделяется много "тепличных" газов, что в условиях жесткого контроля за изменением климата может оказаться малоперспективным. Существующие методы улавливания CO_2 пока плохо разработаны, дороги и связаны с локальными условиями захоронения или использования.

Трудностей добавляет то, что в связи с неоднородностью состава углей часто требуется дальнейшая очистка водорода от примесей (сероводород и другие соединения серы, аммиак, СО, смолы, масла, фенолы), не

допустимых в установках электрохимического использования водорода, например, в топливных элементах. Дополнительная очистка водорода от этих загрязнителей усложняет технологический процесс и сильно влияет на стоимостные показатели.

Поскольку многие процессы производства водорода требуют подвода тепла, то в качестве такого внешнего источника могут выступать высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы. Причем, их использование считается одним из перспективных способов энергообеспечения процессов получения водорода в настоящее время. Это обусловлено, во-первых, возможностью подвода высокопотенциальной теплоты в энерготехнологических процессах производства водорода, во-вторых, возможностью обеспечения высокой суммарной термодинамической эффективности использования энергии первичного источника, в данном случае ядерного топлива и, в-третьих, практически полным исключением выбросов CO_2 в атмосферу.

В основе термохимического производства водорода лежит йодносерный процесс (S-I процесс). Название данный химический цикл получил за счет промежуточных продуктов реакции йода и термически разлагаемой серной кислоты. В целом же S-I процесс состоит из трех химических реакций, реагентом в которых выступает вода, а конечными продуктами водород и кислород. Прохождение двух из трех реакций проходит при температуре 800–1000°C с поглощением теплоты, для подвода которой служит тепло от реактора. Электроэнергия для остальных процессов (сжатие или сжижение водорода и др.) поступает от энергосистемы. Эффективность производства водорода в таком процессе может достигать 40–60% [15].

Стоимость производства водорода на базе ядерной энергии может вполне конкурировать с другими методами, однако, на пути внедрения этой технологии встает ряд проблем, в том числе и негативное отношение населения к использованию ядерной энергии. Кроме того, для обеспечения конкурентоспособности данного метода, необходимо использовать крупные установки, соответствующие единичной мощности реактора не менее 100 МВт. Это требует наличия достаточно обширного круга потребителей и развернутой инфраструктуры для доставки водорода.

Водород может быть произведен электролизом воды. Хотя этот способ имеет многолетнюю историю, тем не менее, в настоящее время мировой объем производства водорода путем электролиза воды невелик (не более 2–3%). Это связано с относительно низкой суммарной эффективностью процесса по сравнению с паровой конверсией метана и газификацией угля.

Важное потенциальное преимущество электролиза заключается в том, что его достаточно легко организовать в условиях маломасштабного производства, приблизив его к потребителям. Это позволяет отказаться от сооружения дорогостоящих систем распределения водорода. Электролизеры обеспечивают производство особо чистого водорода.

К недостаткам электролиза относятся низкая суммар-

ная энергетическая эффективность процесса и относительно высокие капитальные затраты. В настоящее время применяются и разрабатываются новые типы электролизеров, позволяющих увеличить эффективность и коммерческую привлекательность процесса электролиза (твердо-полимерные электролизеры, высокотемпературные и др. [14]).

Наиболее широко используется технология электролиза со щелочными электролитами. Усовершенствованные щелочные электролизеры могут быть использованы для крупномасштабного производства водорода из воды с относительно высокой суммарной эффективностью преобразования первичной энергии, равной 28–36% с учетом КПД электростанции на уровне 35–40% [14].

Перспективы электролиза связаны с применением твердо-полимерных электролизеров (ТПЭ) с платиновыми катализаторами, обеспечивающих более высокий выход водорода. В последнее время ведутся разработки ТПЭ, не содержащих драгоценных металлов, хотя, несмотря на некоторые успехи в решении этой задачи для специальных электролизеров с малым ресурсом работы, приемлемого решения для промышленных электролизеров пока не найдено. ТПЭ характеризуются значительно большими удельными капитальными затратами, чем щелочные, но эти затраты уменьшаются при переходе к большим объемам производства. ТПЭ имеют преимущества при эксплуатации, так как способны работать в обратном направлении, как топливные элементы для производства электричества из водорода.

Высокопроизводительные щелочные и твердо-полимерные электролизные системы производятся в настоящее время многими зарубежными компаниями, такими, как CETH2/Areva H2Gen, Hydrotechnik, Hydrogenics, ITM Power, McPhy Energy, NEL, Next Hydrogen, PERIC, Siemens.

Еще один тип электролизеров — высокотемпературные электролизеры. Высокотемпературный электролиз водяного пара происходит при температурах 800–1000°C. Требования к электродным материалам при таких условиях очень высоки. Материалы должны обладать высокой коррозионной стойкостью и механической прочностью. В некоторых исследованиях предлагается в качестве анодных материалов использовать благородные металлы — золото, платину, серебро, сплавы редкоземельных металлов. Однако, применение этих материалов нежелательно как в связи с их высокой стоимостью, так и вследствие образования летучих оксидов и изменения свойств пористой структуры электрода во времени при высоких температурах. В таких электролизерах предлагается использовать керамические материалы в качестве электродов [15]. Но высокие рабочие температуры усложняют производство керамических материалов с заданными свойствами. В целом, электрохимические способы производства водорода требуют серьезных технических усовершенствований.

В качестве источника электроэнергии для электро-

лиза целесообразно рассматривать несколько вариантов: энергоснабжение от энергосистемы и выработка электроэнергии на месте на базе возобновляемых источников энергии, например, солнечной или ветровой энергии.

Основные недостатки метода электролиза с использованием электроэнергии энергосистемы заключаются в количестве используемой энергии и сопутствующих выбросах парниковых газов при производстве электроэнергии. Поэтому задача получения энергии на производство водорода с помощью электролиза воды является трудноразрешимой. Здесь важно учитывать, что если это энергия полезных ископаемых, то преимущество топливных элементов сводится к нулю. Однако, ситуация может измениться в перспективе вследствие изменения структуры генерирующих мощностей в энергосистемах в сторону увеличения доли безуглеродных технологий (ядерной энергии и возобновляемых источников). Это позволяет надеяться, что электролиз воды станет экологически чистым процессом.

В случае электролиза на базе солнечной энергии источником электроэнергии являются фотоэлектрические преобразователи. Стоимость электролизеров и солнечных батарей остается основной проблемой при выборе этой технологии. Важными особенностями солнечной энергии как энергоисточника, являются относительно низкий поток энергии солнечного излучения в умеренных широтах (около нескольких сотен ватт на квадратный метр в условиях России) и большие суточные и сезонные колебания интенсивности излучения. Это ведет к низкому значению коэффициента использования установленной мощности источника, не превышающие в средних широтах 20–40% [16, 17]. Данное обстоятельство является серьезным препятствием для использования солнечной энергии в производстве электроэнергии и, соответственно, водорода. При использовании энергии солнца и ветра основные показатели технологий совпадают с таковыми для энергосистемы, но выбросы CO_2 отсутствуют.

Энергия ветра уже активно используется для производства электроэнергии в ряде зарубежных стран (Дания, Германия, Великобритания). Это позволяет рассматривать ветровую энергию как перспективную базу для производства водорода. Определяющее влияние на эффективность генерирования электроэнергии на ветровых установках оказывают скорость ветра и ее равномерность в местах установки. Кроме того, съем электроэнергии во многом зависит от конструкции турбины, надежности установки, расположения и т. д. При использовании энергии ветра имеют место те же расходные характеристики, что и при получении водорода на базе солнечной энергии. Обе технологии применимы для производительности по водороду не более 10 т/сут.

Благодаря высокому КПД энергоустановки на базе топливных элементов рассматриваются в качестве перспективных источников энергии в киловаттном классе мощности. Такие энергоустановки требуют

использования водорода чистотой выше 99.9%. Поэтому при использовании в автономных системах низкотемпературных топливных элементов может оказаться необходимой доочистка водорода. В настоящее время созданы эффективные электролизеры на повышенные давления с КПД > 75% и энергозатратами 4.2–4.4 кВт·ч/нм³ и низкотемпературные топливные элементы (с твердополимерным и щелочным электролитом) с КПД более 55% [18]. Для комбинации «электролизер — топливный элемент» коэффициент рекуперации электроэнергии может составлять более 40%, что вполне приемлемо для энергоустановок на основе возобновляемых источников энергии. При разработке таких систем аккумулирования электроэнергии основные научно-технические барьеры связаны с созданием энергоэффективных систем очистки и хранения водорода, интегрированных с топливными элементами.

Очистка — важная и затратная часть процесса производства водорода. При крупномасштабном производстве водорода очистка требует как минимум 50%, а иногда и до 80% от общих капиталовложений. Например, при производстве водорода методом паровой конверсии энергозатраты составляют около 131 МДж/кг, а затраты на очистку — 29 МДж/кг [19].

Можно выделить следующие основные способы очистки водорода от примесей:

- адсорбция прочих газов с получением водорода как продукта;
- абсорбция (физическая или химическая) CO_2 с получением углекислоты как продукта;
- мембранная очистка;
- криогенное разделение;
- селективная абсорбция водорода.

Водород можно хранить либо в чистом виде, либо в виде химических водородсодержащих соединений, из которых, при необходимости, он может быть легко получен.

Способы хранения и транспортировки водорода на сегодняшний день включают следующие процессы:

а) изменение параметров или агрегатного состояния водорода:

- сжатие газа или комбинированный процесс сжатия и охлаждения;
- сжижение водорода.

Традиционно водород хранится в сжатом виде. Водородные системы характеризуются возможностью длительного хранения энергии без потерь, что недостижимо для химических источников тока. Современные системы ожижения водорода требуют затрат до 30–40% (10–13 кВт·ч/кг H_2) общей химической энергии хранимого водорода. Водород, обладающий низкой критической температурой, необходимо охлаждать до температуры ниже 20 К, чтобы сохранять его в жидком состоянии в сосудах без избыточного давления. При этом эксплуатация таких систем в энергоустановках автономной и распределенной энергетики затруднена из-за высоких затрат на криогенное оборудование или трубопроводную арматуру высокого давления, обеспечения безопасности, затрат на обучение и подготовку

обслуживающего персонала [20].

б) соединение водорода с другими веществами:

– адсорбция газообразного водорода некоторым подходящим адсорбентом, например, активированным углем;

– образование соединений с высоким содержанием водорода. Такими соединениями могут быть:

• соединения с сильной водородной связью, требующие реализации относительно сложных химических процессов для получения водорода. К таким соединениям можно отнести, например, метанол, этанол, аммиак, а также воду, которую можно рассматривать как «носитель» водорода;

• соединения, которые могут быть обратимо преобразованы в другие вещества с более высоким (или низким) содержанием водорода;

• гидриды металлов, то есть соединения «металл»-«водород», обладающие свойством обратимо абсорбировать и десорбировать водород при изменении температуры [21]. В гидридах основная масса водорода находится в связанном твердофазном состоянии, что обеспечивает повышенную безопасность при эксплуатации. Избирательность поглощения водорода, возможность гибко контролировать термодинамические свойства интерметаллических сплавов с помощью вариации их состава позволяет использовать их не только для хранения, но и для высокоэффективной очистки водорода, создания термохимических тепловых насосов и водородных компрессоров [22, 23]. Разрабатываемые методы водородного аккумулирования энергии с использованием гидридов металлов должны превысить мировой уровень по времени автономной работы, экологической чистоте и безопасности хранения водорода за счет использования металлгидридных технологий [24]. Повышение эффективности работы водородных систем аккумулирования энергии связано со снижением энергетических затрат при получении, очистке и хранении водорода.

Активно прорабатывается вопрос транспортировки водорода. Самый дешевый способ транспортировки по трубопроводу в смеси с природным газом. Поскольку прокладка новых газопроводов требует значительных капитальных затрат, именно способ совместной транспортировки рассматривается как основной в настоящее время и в ближайшем будущем. Плюсы этого решения основаны на относительной дешевизне технологии, использовании существующей инфраструктуры природного газа. При этом безопасность транспортировки водорода находится на том же уровне, что и природного газа. Проницаемость газовых труб в диапазоне от 1.4 – 7 МПа достаточно мала и добавка водорода уменьшает вероятность конденсации тяжелых углеводородов в трубах.

В то же время имеются и недостатки предлагаемого решения. В первую очередь это необходимость разделения газов, которая приводит к затратам 20–30% водорода на разделение, что составляет 25–50% от стоимости готового продукта. Кроме того, добавляемый в природный газ одорант меркаптан содержит серу, от

которой необходима дополнительная очистка. Тем не менее, в настоящее время в Европейском союзе идет большая работа по созданию демонстрационных проектов в рамках этой концепции.

Следует отметить, что основная проблема водородной энергетики состоит в том, что водород является вторичным энергоносителем, который получают переработкой ископаемых ресурсов, сжигая при этом нефть, газ, уголь или уран. Таким образом, водород следует рассматривать не столько как топливо, сколько как аккумулятор энергии, заключенной ранее в других энергоносителях.

Аккумулирование энергии в виде создания запасов водорода является частью следующих концепций:

– Power-to-Power (электроэнергия-в-электроэнергию) с хранением водорода как в газообразном состоянии (в том числе в подземных газохранилищах), так и в связанном состоянии, в том числе в гидридах металлов;

– Power-to-Gas (электроэнергия-в-газ), включающая добавление водорода в существующую инфраструктуру для природного газа (обогащенный водородом природный газ), а также создание синтетического метана из водорода (метанизация). Концепция Power-to-Gas рассматривается как самый простой и быстрый способ создания крупномасштабного рынка водорода.

Мировые тенденции развития энергетики показывают, что водород в качестве энергоносителя может стать вполне конкурентоспособным в перспективе 15–20 лет по сравнению с традиционными углеводородными топливами. Это требует более тщательного анализа и отбора технологий производства и использования водорода с учетом ожидаемых изменений в энергетическом балансе мира и отдельных стран и требований, предъявляемых к источникам энергии в XXI веке.

Развитие водородных энергетических технологий будет способствовать развитию следующих сегментов реального сектора экономики:

- нефтедобыча и нефтепереработка;
- переработка природного газа;
- производство аммиака;
- радиоэлектронная промышленность;
- пищевая промышленность;
- стекольная промышленность.

Водород найдет широкое применение в создаваемых секторах экономики, включая:

- новый экологически чистый электрический и водородный транспорт;
- аккумулирование энергии для возобновляемой энергетики;
- аккумулирование энергии в системах бесперебойного, резервного и аварийного электропитания.

Новые водородные технологии переработки биомассы будут широко применяться в секторах:

- переработки твердых бытовых отходов;
- переработки органических отходов;
- переработки сельскохозяйственных отходов.

Как показал анализ формирования перспективного топливно-энергетического баланса России [15], уже к 2030 г. может потребоваться производство 10–15 млн. т

водорода на базе природного газа и ядерной энергии для удовлетворения нужд электроэнергетики и транспорта, но при условии существенных изменений и развития существующих технологий, а также пересмотра мировым сообществом концепции необходимости и целесообразности перехода на водородную экономику. Таким образом, в перспективе водород может занять устойчивую позицию в энергетическом балансе нашей страны, что требует интенсификации научных исследований по водородным технологиям и разработке мероприятий по встраиванию их в национальную экономику.

Список литературы

1. REN21. Renewables 2016 Global Status Report. — Paris: REN21 Secretariat 2016.
2. U.S. Energy Information Administration. International Energy Outlook 2016 with Projections to 2040 www.eia.gov/forecasts/ieo 2016
3. IEA. World Energy Outlook 2016. — Paris: IEA 2016.
4. Кочергин В. И., Глушков С. П. Особенности решения проблем обеспечения безопасности при реализации инновационных процессов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Безопасность и управление рисками 2016; (5): 203–209.
5. Дуников Д. О. Водородные энергетические технологии. В сборнике: Водородные энергетические технологии Материалы семинара лаборатории ВЭТ ОИВТ РАН: сборник научных трудов. Москва 2017;: 5–21.
6. Чичирова Н. Д., Власов С. М. Наноматериалы мембранных элементов. Наноматериалы и нанотехнологии в энергетике. Монография 2014;: 400.
7. Чичиров А. А. Топливные элементы. Наноматериалы и нанотехнологии в энергетике: монография: Казанский государственный энергетический университет 2014;: 375.
8. Чичирова Н. Д., Чичиров А. А., Власов С. М., Гибадуллина Х. В. Нанотехнологии в разработке топливных элементов // Труды академэнерго 2014; (3): 103–122.
9. International Energy Agency. Technology Roadmap: Hydrogen and Fuel Cells – 2014 edition. – Paris: OECD/IEA 2014.
10. Zoulias E. I., Lymberopoulos N. Hydrogen-based autonomous power systems: techno-economic analysis of the integration of hydrogen in autonomous power systems.: Springer 2008.
11. Hydrogen and Fuel Cells: Fundamentals, Technologies and Applications. Ed. Stolten D. – Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH 2010;: 877.
12. Малышенко С. П. Водород как аккумулятор энергии в электроэнергетике // Российский химический журнал 2005; (XLI): 112–120.
13. да Роза А. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы: Издательский дом МЭИ 2010;: 704.
14. Schultz K. Use of the Modular Helium Reactor for Hydrogen Production, World Nuclear Association Annual Symposium, London, 3–5 September 2003.
15. Синяк Ю. В. Моделирование стоимости водородного топлива в условиях его централизованного производства. В сборнике: Водородные энергетические технологии Материалы семинара лаборатории ВЭТ ОИВТ РАН: сборник научных трудов. Москва 2017;: 39–56.

16. Brown L. C., Besenbruch G. E., Funk J. E., Marshall A. C., Pickard P. S., Showalter S. K., High Efficiency Generation of Hydrogen Fuels Using Nuclear Energy, A Nuclear Energy Research Initiative (NERI), Project for the U.S. Department of Energy, Hydrogen and Fuel Cells Annual Review 6 May 2002.

17. Levene M., Mann K., Margolis R., Milbrandt A., An Analysis of Hydrogen Production from Renewable Electricity Sources, Preprint J. I. National Renewable Energy Laboratory Prepared for ISES 2005 Solar World Congress Orlando, Florida August 6–12, 2005.

18. Hydrogen and Fuel Cells: Fundamentals, Technologies and Applications. Ed. Stolten D. – Weinheim, Germany : WILEY-VCH Verlag GmbH 2010;: 877.

19. Gupta R. B. Hydrogen fuel: production, transport, and storage. CRC Press 2008.

20. DOE. Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs. DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, July 7th, 2009.

21. Verbetsky V. N., Malysenko S. P., Mitrokhin S. V., Solovei V. V., Shmal'ko Y. F. Metal hydrides: properties and practical applications. Review of the works in CIS-countries // International Journal of Hydrogen Energy 1998; 12 (23): 1165–1177.

22. Lototsky M. V., Tolj I., Pickering L., Sita C., Barbir F., Yartys V. The use of metal hydrides in fuel cell applications // Progress in Natural Science: Materials International 2017; 1(27): 320.

23. Lototsky M. V., Yartys V. A., Pollet B. G., Bowman Jr R. C. Metal hydride hydrogen compressors: A review // International Journal of Hydrogen Energy 2014; 11(39): 5818–5851.

24. Borzenko V. I., Dunikov D. O. Feasibility analysis of a hydrogen backup power system for Russian telecom market // Journal of Physics: Conference Series 2017; (891)1: 012077.

References

1. REN21. Renewables 2016 Global Status Report. – Paris: REN21 Secretariat 2016.
2. U.S. Energy Information Administration. International Energy Outlook 2016 with Projections to 2040 www.eia.gov/forecasts/ieo 2016
3. IEA. World Energy Outlook 2016. – Paris: IEA 2016.
4. Kochergin V. I., Glushkov S.P. Specifics of solving problems of ensuring safety at implementation of innovative processes // News Bulletin of Perm National Research Polytechnical University. Safety and risk management 2016;(5): 203–209.
5. Dunikov D. O. Hydrogen energy technologies. In collection of papers: Hydrogen energy technologies. Materials of a seminar of the Hydrogen Energy Technologies Laboratory of the IIHT of RAS: collection of research papers. Moscow 2017;: 5–21.
6. Chichirova N. D., Vlasov S. M. Nanomaterials of membrane elements. Nanomaterials and nanotechnologies in power engineering. Monograph 2014;: 400.
7. Chichirov A. A. Fuel cells. Nanomaterials and nanotechnologies in power engineering. Monograph. Kazan State Power Engineering University. 2014;: 375.
8. Chichirova N. D., Chichirov A. A., Vlasov S. M., Gibadullina Kh. V. Nanotechnologies in development of fuel cells // Proceedings of Academenergo 2014; (3): 103–122.
9. International Energy Agency. Technology Roadmap: Hydrogen and Fuel Cells – 2014 edition. – Paris: OECD/IEA 2014.
10. Zoulias E. I., Lymberopoulos N. Hydrogen-based autonomous

power systems: techno-economic analysis of the integration of hydrogen in autonomous power systems.: Springer 2008.

11. Hydrogen and Fuel Cells: Fundamentals, Technologies and Applications. Ed. Stolten D. — Weinheim, Germany : WILEY-VCH Verlag GmbH 2010;: 877.

12. Malyshenko S. P. Hydrogen as energy storage in power engineering // Russian Chemical Journal 2005; (XLI): 112–120.

13. da Roza A. Renewable sources of energy. Physical-engineering fundamentals: MPEI Publishing House 2010;: 704.

14. Schultz K. Use of the Modular Helium Reactor for Hydrogen Production, World Nuclear Association Annual Symposium, London, 3–5 September 2003.

15. Sinyak Yu. V. Simulation of the cost of hydrogen fuel in conditions of its centralized production. In collection of papers: Hydrogen energy technologies. Materials of a seminar of the Hydrogen Energy Technologies Laboratory of the JIHT of RAS: collection of research papers. Moscow 2017;: 39–56.

16. Brown L. C., Besenbruch G. E., Funk J. E., Marshall A. C., Pickard P. S., Showalter S. K., High Efficiency Generation of Hydrogen Fuels Using Nuclear Energy, A Nuclear Energy Research Initiative (NERI), Project for the U.S. Department of Energy, Hydrogen and Fuel Cells Annual Review 6 May 2002.

17. Levene M., Mann K., Margolis R., Milbrandt A., An Analysis of Hydrogen Production from Renewable Electricity Sources, Preprint J.

I. National Renewable Energy Laboratory Prepared for ISES 2005 Solar World Congress Orlando, Florida August 6–12, 2005.

18. Hydrogen and Fuel Cells: Fundamentals, Technologies and Applications. Ed. Stolten D. – Weinheim, Germany : WILEY-VCH Verlag GmbH 2010;: 877.

19. Gupta R. B. Hydrogen fuel: production, transport, and storage. CRC Press 2008.

20. DOE. Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs. DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, July 7th, 2009.

21. Verbetsky V. N., Malyshenko S. P., Mitrokhin S. V., Solovei V. V., Shmal'ko Y. F. Metal hydrides: properties and practical applications. Review of the works in CIS-countries // International Journal of Hydrogen Energy 1998; 12 (23): 1165–1177.

22. Lototskyy M. V., Tolj I., Pickering L., Sita C., Barbir F., Yartys V. The use of metal hydrides in fuel cell applications // Progress in Natural Science: Materials International 2017; 1(27): 320.

23. Lototskyy M. V., Yartys V. A., Pollet B. G., Bowman Jr R. C. Metal hydride hydrogen compressors: A review // International Journal of Hydrogen Energy 2014; 11(39): 5818–5851.

24. Borzenko V. I., Dunikov D. O. Feasibility analysis of a hydrogen backup power system for Russian telecom market // Journal of Physics: Conference Series 2017; (891) 1: 012077.

