

УДК 662.769«31»

Водородная энергетика: прошлое, настоящее, виды на будущее

Б. П. Тарасов, М. В. Лотоцкий

БОРИС ПЕТРОВИЧ ТАРАСОВ — кандидат химических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией водородаккумулирующих материалов Института проблем химической физики РАН. Область научных интересов: неорганическая химия, химия гидридов и углеродных наноструктур, водородная энергетика.

142432 Черноголовка, Московская обл., просп. Акад. Семенова, 1, ИПХФ РАН, тел. (496)522-17-43, факс (496)515-54-20, E-mail btarasov@icp.ac.ru

МИХАИЛ ВЛАДИМИРОВИЧ ЛОТОЦКИЙ — кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института проблем материаловедения Национальной Академии наук Украины. Область научных интересов: неорганическая химия, материаловедение, водородная энергетика.

03142 Украина, Киев, ул. Кржижановского, 3, Институт проблем материаловедения НАНУ, тел. +38-044-424-33-64, факс +38-044-424-21-31, E-mail mvlot@inbox.ru

Введение

Дефицит ископаемых органических топлив в сочетании с глобальными экологическими проблемами обусловил огромный интерес к использованию водорода в качестве универсального энергоносителя для стационарных и мобильных энергоустановок. К настоящему моменту в мире сложилось мнение, что благодаря неограниченным ресурсам, высокой энергонасыщенности, технологической гибкости и экологической чистоте процессов преобразования энергии с участием водорода, его следует рассматривать как наиболее перспективный энергоноситель будущего.

Переход на водородную энергетику* предусматривает значительное изменение сложившейся структуры топливно-энергетического комплекса и связан с постепенной заменой углеродсодержащих энергоносителей (нефть, природный газ, уголь и продукты их переработки) на водород, получаемый из воды с использованием традиционных (гидро- и атомная энергетика) и возобновляемых (солнечные, ветровые, геотермальные и т.п.) источников энергии. Новая инфраструктура, формирование которой планируется завершить к концу нынешнего века [1, 2], предусматривает использование водорода и электроэнергии как основных компонентов энергетической составляющей мировой экономики, включая энергетику, промышленность, транспорт, сельское хозяйство и коммунально-бытовую сферу.

В настоящее время работы в области водородных технологий активно стимулируются. Эта тенденция характерна для большинства стран мира. Начиная с 2002 г. указанный процесс затронул и Россию, где работы по водородной энергетике и топливным элементам (ТЭ) возведены в ранг приоритетных и получают инвестиционную поддержку государства и крупных коммерческих структур.

Данный обзор содержит краткий анализ современного состояния и тенденций развития работ в области водородной энергетике и технологии, которая объединяет усилия многих ученых, инженеров, экономистов и политиков. Все они заняты решением большого числа частных проблем, вместе с тем, для успешной реализации концепции необходимо выработать системный подход к решению проблемы в целом. Авторы приглашают специалистов, работающих в разных областях, связанных с получением, хранением и использованием водорода, к дискуссии, тема которой вынесена в заглавие настоящей статьи.

Особенности физико-химических свойств водорода

Водород обладает уникальным набором свойств, определяющих его широкое использование в различных областях промышленности, и, с другой стороны, порождающих ряд технических проблем при организации процессов с участием водорода [3–6].

Водород является наиболее распространенным элементом во Вселенной (93%(ат.)) и одним из самых распространенных на Земле — 15,52%(ат.), среднее содержание водорода в земной коре 1,4 г/кг. Основными источниками водорода на Земле являются вода и органические соединения, включая нефть, природный газ и биомассу.

Способность водорода вступать при повышенных температурах в каталитические реакции гидрирования широко используется в химической (синтез аммиака и метанола), нефтехимической (гидрокрекинг) и пищевой (гидрирование растительных жиров) промышленности, а также в ряде других отраслей. Восстановительные свойства водорода используются в химической технологии, в порошковой металлургии, металлообработке, машиностроении, микроэлектронике.

Среди известных газов водород имеет самую низкую вязкость и самую высокую теплопроводность. Так, при комнатной температуре и атмосферном давлении теплопроводность водорода — 0,182 Вт/(м·К) — в 1,24 раза выше теплопроводности гелия, в 5,9 — метана, в 7,2 — азота и кислорода, в 10,7 — аргона. В тех же условиях коэффициент динамической вязкости

* На наш взгляд термин «водородная энергетика» не является удачным, поскольку водород — не первичный источник энергии, а только энергоноситель; правильнее говорить об «энергетике, основанной на использовании водорода и топливных элементов».

газообразного водорода составляет $8,92 \cdot 10^{-6}$ Па·с, что в 2,11 раза ниже, чем у гелия в тех же условиях [3, 7]. Благодаря данному обстоятельству водород эффективно применяется для уменьшения трения и охлаждения в движущихся частях установок (например, в турбогенераторах в тепловой и атомной энергетике). В то же время низкая вязкость водорода повышает вероятность его утечек через уплотнения, что ужесточает требования к качеству водородной газовой аппаратуры.

Водород относят к горючим газам с повышенной пожаро- и взрывоопасностью [8]. Он имеет широкие концентрационные пределы горения и детонации, высокую скорость распространения пламени (в 8 раз выше, чем у метана), а также низкую (в 14,5 раза ниже, чем у метана) энергию воспламенения. Вместе с тем, низкая плотность и высокая скорость диффузии водорода способствуют быстрому снижению его концентрации на открытой местности и в вентилируемых помещениях. К тому же водород имеет достаточно высокую нижнюю границу детонации (в 2,06 раза выше, чем у метана), что существенно снижает его взрывоопасность в реальных условиях.

Производство водорода и структура его потребления

К настоящему времени технологии крупномасштабного производства и переработки водорода хорошо освоены. В соответствии с данными зарубежных источников [9—13], ежегодное мировое производство водорода к концу 1990-х гг. составляло 40—45 млн т или 450—500 млрд м³. В других источниках [6] приводятся несколько большие значения: 60 млн т в 1990 и 80 млн т в 1998 г. В любом случае указанные объемы соответствуют 20—25% ежегодной мировой добычи природного газа. Большую часть водорода получают паровой конверсией, либо частичным окислением углеводородного сырья, главным образом природного газа (рис. 1а). Следует отметить, что только 62% водорода производят как целевой продукт, остальные 38% являются побочным продуктом других производств (нефтепереработка, коксохимия и т.п.). К последним также относится почти весь электролитический водород, получаемый в настоящее время в производстве хлора и каустической соды.

Структура потребления водорода [6, 12—14] показана на рис. 1б. Как видно из данных рисунка, основными потребителями водорода (95%) являются хими-

ческая промышленность и нефтепереработка. Водород является ключевым реагентом в производстве минеральных удобрений (получение аммиака), в многочисленных процессах органического синтеза. Особое место водород занимает в нефтепереработке (гидрокрекинг, гидроочистка), его применение увеличивает глубину переработки сырой нефти и повышает качество конечных продуктов — углеводородных топлив. Потребность нефтепереработки в водороде в 1998 году составляла около 1% (масс.) от количества перерабатываемой сырой нефти и неуклонно увеличивается [14].

Более половины потребляемого в мире водорода на сегодняшний день используется в качестве химического сырья. Остальная часть используется в технологических процессах, протекающих с участием водорода (гидрирование, раскисление и т.п.). Раскисляющее действие водорода широко применяют в порошковой металлургии, металлообработке, производстве стекла, синтетических рубинов и т.п. (в сумме примерно 2% от общего потребления водорода). Применение водорода в микроэлектронике, главным образом, связано с получением кремния восстановлением SiCl_4 .

Основным потребителем водорода как топлива является космонавтика. Комбинация «жидкий водород (топливо)—жидкий кислород (окислитель)» обеспечивает максимальное выделение энергии на единицу веса, что является определяющим критерием для аэрокосмических приложений.

Следует отметить, что из значительного объема производимого водорода только 5% в настоящее время является коммерческим продуктом. Как правило, крупные потребители водорода сами производят его для собственных нужд [3, 5], что вызвано экономическими факторами (высокие цены на товарный водород), а также техническими трудностями хранения и транспортировки больших количеств водорода.

Совершенствование водородных технологий сопряжено с решением трех групп проблем, связанных с разработкой эффективных, экономически выгодных и безопасных процессов и оборудования для производства, использования, а также компактного хранения водорода. Соответственно работы в области водородных технологий развиваются преимущественно по этим трем направлениям.

Существующие способы производства водорода базируются на использовании в качестве исходного сырья воды (электролиз, фотолиз и радиолиз), угля и

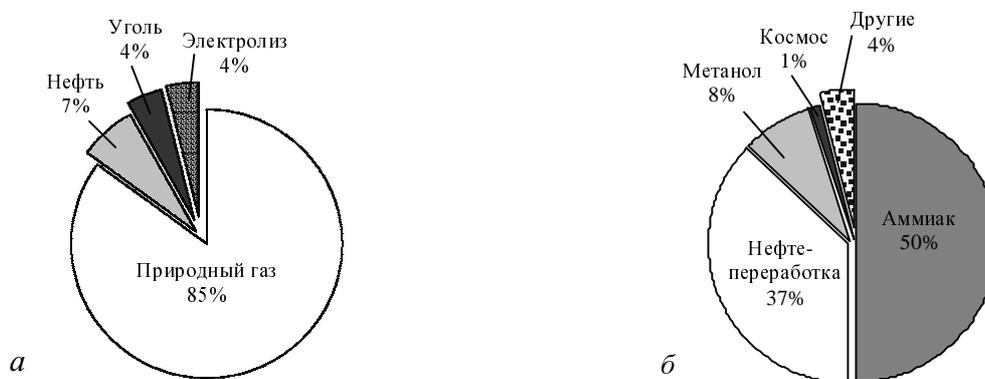


Рис. 1. Структура мирового производства (а) и потребления (б) водорода

природного газа (паровая и парокислородная конверсии), сероводорода (химическое и плазмохимическое разложение) и некоторых других веществ. Основное направление совершенствования всех процессов производства водорода состоит в увеличении их эффективности, уменьшении капитальных затрат и эксплуатационных расходов, увеличении надежности и технологической гибкости.

Получение водорода из природных органических топлив в настоящее время наиболее широко освоено. Основной технологией является паровая конверсия метана [13, 15–17]. Как видно из данных рис. 1а, по указанной технологии получают около 85% производимого в мире водорода, что обусловлено достаточно высокой (более 80%) эффективностью процесса, приемлемой стоимостью и отлаженной инфраструктурой транспортировки исходного сырья. Стоимость водорода для данной технологии оказывается самой низкой по сравнению с другими методами и существенно снижается по мере увеличения производительности: от 11,2 долл. США за 1 ГДж (1,3 долл. США/кг H_2) для сравнительно малых промышленных установок мощностью 270 тыс. m^3 водорода/сутки до 5,5 долл. США за 1 ГДж (0,66 долл. США/кг H_2) для крупных (7–25 млн m^3 водорода/сутки) [16].

Основным недостатком получения водорода из природного газа является зависимость от поставок сырья, запасы которого распределены всего между несколькими регионами мира (Ближний Восток — 40,8%, Россия — 26,7%, Иран — 15,2%, Катар — 14,7%). Серьезную проблему составляют и выбросы в атмосферу больших количеств CO_2 , утилизация которого требует значительных капитальных затрат и эксплуатационных расходов, что существенно повышает стоимость конечного продукта. Кроме этого, метод паровой конверсии метана плохо адаптируется на установки малой производительности для децентрализованного производства водорода (например, заправок станций, автономных энергосистем и т.п.). Еще одним недостатком метода является наличие в водороде примесей оксидов углерода, что предъявляет дополнительные требования к его очистке, особенно при использовании в ТЭ.

По указанным причинам конверсия метана обычно рассматривается как переходная технология от сложившейся инфраструктуры энергорынка к водородной экономике будущего. В перспективе технологии производства водорода из органических топлив (природного газа, угля, нефтепродуктов, биомассы и т.п.), видимо, будут вытесняться другими.

Следует отметить, что с точки зрения экологии стратегия производства водорода из природного топлива мало чем отличается от их непосредственного сжигания. Если в последнем случае вредные выбросы в атмосферу появляются на стадии использования топлива, то в первом мы имеем практически те же выбросы, но на стадии получения водорода. Поэтому основными компонентами новых технологий производства водорода из углеводородов являются процессы улавливания сопутствующих газов, в первую очередь CO_2 . В качестве примера можно привести последние разработки по паровой конверсии угля [18]. Кроме этого, важным косвенным фактором здесь является

повышение эффективности использования топлива. Водородные энерготехнологии обладают в этом отношении рядом преимуществ по сравнению со сжиганием ископаемых горючих.

Электролиз воды является наиболее перспективной технологией получения водорода в будущем, хотя в настоящее время из-за высокой стоимости электроэнергии доля этого метода в мировом производстве водорода не превышает 5% (рис. 1а). Наиболее привлекательными особенностями электролиза воды являются экологическая чистота (при условии, что производство первичной энергии не сопряжено с загрязнением окружающей среды), возможность создания установок с широким диапазоном производительности (от нескольких литров до сотен m^3 водорода в час), простота эксплуатации и удобство в работе, высокая чистота производимого водорода и наличие ценного и экологически чистого побочного продукта — газообразного кислорода.

В настоящее время существуют три способа электролитического производства водорода [16–21], отличающиеся типом электролита и условиями проведения электролиза (табл. 1). Основной вклад в стоимость электролитического водорода (70–90%) вносят затраты на электроэнергию [17]. В отличие от рассмотренного метода получения водорода из природного газа, с ростом производительности электролизной установки цена водорода существенно снижаться не будет, и основным фактором, определяющим конкурентоспособность электролизера, будет не стоимость, а эффективность его работы (кпд). В то же время, при наличии дешевой электроэнергии (например, в «провальные» периоды ее потребления) электролитическое получение водорода может стать рентабельным.

Другие методы производства водорода в настоящее время находятся на стадии технологических разработок. К ним, в частности, можно отнести следующие.

Расщепление воды на основе термохимических циклов с использованием тепловой энергии ($T \sim 800^\circ C$) от ядерных реакторов или гелиоустановок. Достаточно подробный обзор данных методов по состоянию на середину 1980-х гг. приводится в справочнике [3]; примеры более поздних перспективных разработок можно найти в технических статьях Департамента энергетики США [22].

Биохимическое расщепление воды (фотосинтез) с использованием специально выведенных типов водорослей и микроорганизмов [23].

Фотокаталитическое расщепление воды на основе полупроводниковых материалов (смешанные оксиды, сульфиды и селениды, нитриды и оксинитриды) [24].

Производство энергоаккумулирующих веществ (сплавы кремния и алюминия) с последующей генерацией из них водорода при разложении водой на месте потребления [6, 25].

Хранение, транспортировка и использование водорода

Компактное и безопасное хранение водорода является очень важной проблемой, от решения которой зависит успешная реализация концепции водородной энергетики и технологии в целом. Данной проблеме посвящен отдельный обзор в настоящем выпуске журнала [26].

Основные характеристики процессов получения водорода в различных электролизерах

Типы электролизеров, электролит	Температура электролиза, °С	Энергозатраты на производство 1 м ³ Н ₂ , кВт·ч	Особенности процесса	Производители
Водно-щелочные 20–30%-ный водный раствор КОН (NaOH)	50–100	4–6	Производительность до 500 м ³ /ч Н ₂ (P = 0,1–5 МПа). Допустимый уровень нагрузки от 20 до 100% от номинальной производительности	Stuart IMET, The Electrolyser Corporation Ltd. (Канада); Norsk Hydro (Норвегия); De-Nora (Италия); НПО «Уралхиммаш» (Россия) и др.
С твердым полимерным электролитом (ТПЭ) Ионнообменная мембрана с протонной проводимостью	80–100	4–6	Производительность до 100 м ³ /ч Н ₂ (P = 0,1–15 МПа). Малые габариты, безопасность, возможность работы в нестационарных режимах, простота обслуживания, отсутствие коррозионно-активных веществ. ПЭ электролизеры в 5–7 раз дороже водно-щелочных с аналогичными характеристиками. Жесткие требования к чистоте подаваемой воды	Proton Energy Systems, Inc. (Канада); Hamilton Substandard (США); H-Tec (Германия); РНЦ «Курчатовский институт» НТЦ «Водород» и др. (Россия)
С твердым оксидным электролитом Цирконий-иттриевая керамика с кислород-анионной проводимостью при высоких температурах	800–1000	3,5–4	Может работать только в стационарном режиме; в ходе эксплуатации следует избегать многочисленных циклов «пуск/остановка», сопряженных с циклическими изменениями температуры рабочих ячеек. Перспективны для получения электроэнергии в крупных стационарных установках	Экспериментальные и опытно-промышленные образцы

Транспортировку водорода, в основном, предполагается осуществлять в виде сжатого газа по сети трубопроводов. Соответствующие технические решения и инфраструктура хорошо отработаны для природного газа и могут быть при соответствующей доработке адаптированы под водород. Более того, существующая сеть газопроводов допускает подачу в них водорода до концентрации в природном газе не выше 10% [27], что может облегчить начало перехода к водородной энергетике без существенного изменения сложившейся инфраструктуры.

Использование водорода как топлива основано на реакции окисления водорода кислородом, протекающей при нормальных условиях (0 °С, 0,1 МПа) с большим тепловыделением (120,6 МДж/кг Н₂ = 33,5 кВт·ч/кг Н₂ = 3 кВт·ч/м³ Н₂). При получении водорода электролизом воды при кпд электролизной установки 60–75% фактические энергозатраты составляют 4–5 кВт·ч на 1 м³ водорода. При сжигании 1 м³ водорода в энергоустановке с кпд 15–20% может быть получено 0,45–0,6 кВт·ч полезной работы, а при использовании топливного элемента с кпд 40–60% — 1,2–1,8 кВт·ч. Таким образом, суммарный кпд водородного энергетического цикла при конечной выработке механической работы или электроэнергии составляет 10–15% при использовании тепловых машин и 24–45% при электрохимической утилизации водорода.

Преимуществами водородного топлива при сжигании его в двигателях внутреннего сгорания (ДВС),

парогенераторах, реактивных двигателях и т.п. являются высокая теплотворная способность, полнота сгорания практически во всем диапазоне соотношений топливо/окислитель, высокие температура пламени и тепловой кпд, который для ДВС — на 30–50% выше, чем при работе на бензине, отсутствие вредных выбросов в атмосферу. В настоящее время водород широко используется как ракетное топливо. Разработки автомобилей с ДВС на водороде, либо смеси водорода с традиционным топливом к настоящему времени реализованы целым рядом автомобильных компаний на уровне демонстрационных образцов; в ближайшее время планируется серийное производство некоторых из них. Разработаны водород-кислородные парогенераторы для получения электроэнергии в периоды пиковой нагрузки в составе турбогенераторных энергоустановок, а также для ряда других целей [4, 28].

Водород может быть конвертирован в различные формы энергии (тепловую, электрическую, химическую) в процессах каталитического горения, электрохимического преобразования, гидрогенизации и др. Эффективность указанных процессов для водорода выше, чем для других видов топлива. Поэтому разработке перспективных технологий на основе водорода уделяется повышенное внимание.

Основным направлением современных разработок по использованию водорода в энергетике являются электрохимические генераторы энергии — топливные элементы (ТЭ) [4, 16, 27, 28 и др.]. В ТЭ производится

подача топлива и окислителя на разделенные электроды, в результате электрохимического процесса окисления вырабатывается электроэнергия.

В зависимости от вида используемого электролита существуют ТЭ различных типов. В щелочных ТЭ используют в качестве электролита 35–50%-ный водный раствор щелочи (KOH или NaOH). Эти ТЭ обычно эксплуатируют при 100–120 °С; при работе на концентрированных, до 85%-ных, растворах щелочи температуры могут быть повышены до 250 °С. Щелочные ТЭ наиболее разработаны и широко применяются в автономных энергосистемах в космонавтике и военно-морском флоте. Их основным недостатком является недопустимость наличия CO₂ в топливе и в окислителе.

В ТЭ с электролитом на основе полимерной ионообменной мембраны с протонной проводимостью мембрана представляет собой тонкую пленку на основе фторированных кислотных полимеров (типичный представитель — нафион) с нанесенным по обе стороны катализатором (металлы платиновой группы). Рабочая температура ТЭ данного типа составляет 60–80 °С. Хотя в таких ТЭ допускается наличие CO₂ в топливе или окислителе, что обуславливает возможность их длительной работы с использованием в качестве окислителя атмосферного воздуха, присутствие других примесей (СО, соединения серы) нежелательно. Кроме этого, подаваемые топливо/окислитель должны быть увлажнены, поскольку высыхание мембраны выводит ее из строя. Как и ТПЭ электролизеры, данные ТЭ довольно дороги, но благодаря малым габаритам и удобству использования, они могут успешно применяться в малых и средних автономных энергоустановках, в частности для водородного транспорта.

В ТЭ с фосфорнокислым электролитом используют несущую матрицу из карбида кремния, которую пропитывают концентрированной (~100%) фосфорной кислотой. Диапазон рабочих температур 150–220 °С. В настоящее время эти ТЭ вытесняются другими, более эффективными и экономичными.

Электролитная часть ТЭ на основе расплавов карбонатов представляет собой керамическую матрицу (LiAlO₂), пропитанную расплавом смеси карбонатов щелочных металлов (лития, натрия, калия). ТЭ данного типа работают при 600–700 °С без электрокатализаторов. По своим характеристикам данный вид ТЭ аналогичен фосфорнокислым. В силу потенциальной дешевизны его планируют применять в будущем для создания стационарных энергоустановок.

Твердооксидные ТЭ используют в качестве электролита керамику на основе оксида циркония, модифицированного добавками оксида иттрия. Данный вид ТЭ работает при 900–1000 °С и наиболее перспективен для работы в составе крупных стационарных энергоустановок. Высокотемпературные ТЭ используют в качестве окислителя атмосферный воздух и в качестве топлива — водород, метан и другие топлива, причем крайне неприхотливы к их качеству. Единственным недостатком данных видов ТЭ, как и электролизеров с твердооксидным электролитом, является нежелательность частых пусков/остановок, сопряженных с разо-

Таблица 2

Стоимость энергоустановок на топливных элементах, долл.США/кВт

ТЭ	1999	Перспектива
Щелочные	2000	50–100
С полимерными мембранами:		
стационарные	8000	300
транспортные	550	30
Фосфорнокислые	3000	1000
Карбонатные	5000	600
Твердооксидные	1000	600

гревом до рабочей и охлаждением до комнатной температуры.

Если к концу 1990-х годов в мире насчитывалось около 100 (исключая военные применения) демонстрационных энергоустановок на топливных элементах [14], то к настоящему времени интенсивность разработок в данном направлении резко возросла. ТЭ различных типов выпускаются промышленностью мелкими и средними сериями, включая довольно крупные (1 МВт) энергоустановки на твердооксидных ТЭ, серийно выпускаемые фирмой Westinghouse, мобильные энергоустановки на полимерных мембранах для водородного автотранспорта (Ballard Technologies) и целый ряд других.

Основными задачами новых разработок в области ТЭ являются повышение ресурса работы и КПД ТЭ и снижение стоимости. В табл. 2 приведены стоимостные показатели энергоустановок на различных типах ТЭ на 1999 г. и прогноз на середину нынешнего века [16].

Другим перспективным направлением является разработка новых технологий на основе металлгидридов, подробно описанных в [26].

Концепция водородных энерготехнологических систем

Получение водорода из природных источников требует значительных энергозатрат, так что водород следует рассматривать как вторичный (промежуточный) энергоноситель. Наиболее перспективным сырьем для производства водорода является вода, ресурс которой на Земле неисчерпаемы. С другой стороны, продуктом использования водорода в энергосистемах также является вода. Таким образом, применение водорода как энергоносителя при экологически чистом производстве первичной энергии обеспечивает замкнутый экологический цикл. Элементы энерготехнологической цепи, включая производство водорода из воды, его хранение, транспортировку и потребление, не оказывают какого-либо вредного воздействия на окружающую среду. Они также не сопряжены с выбросами парниковых газов (СО₂ и др.).

Концепция водородных энергосистем предусматривает широкомасштабное производство водорода и его дальнейшее использование как энергоносителя,

топлива и реагента в областях, связанных с потреблением энергии (промышленность, транспорт, коммунально-бытовая сфера и т.п.). На рис. 2 представлена схема данной концепции по материалам доклада Комиссии ЕС по водородным технологиям и топливным элементам [29]. Производство водорода планируется осуществлять как традиционными методами, включая конверсию природного газа и угля, так и по вновь разрабатываемым технологиям: биохимической, термическому расщеплению воды с использованием солнечной и ядерной энергии и т.п. Приоритетным направлением считается электролитическое производство водорода из воды с использованием возобновляемых источников энергии или ядерной энергетики для получения электроэнергии. На настоящий момент данные технологии экономически неконкурентоспособны по сравнению с получением водорода из углеводородного сырья, и главной проблемой этого направления является увеличение эффективности электролиза.

Для выработки энергии на месте потребления водород предполагается либо сжигать в ДВС, турбинах или парогенераторах, либо электрохимически окислять в топливных элементах. Последнему подходу отдается предпочтение вследствие более высокой эффективности, компактности и удобства в работе электрохимических энергоустановок.

Ниже приводится краткая историческая информация о развитии концепции водородной энергетики, в основном цитируемая по размещенному в Интернете обзору [30].

Идея широкомасштабного использования водорода как искусственного топлива, получаемого электролизом воды, появилась в научно-фантастическом романе Жюль Верна «Таинственный остров» (1874 г.). Первые попытки ее реализации относятся к 1920—1930 гг., когда в Канаде было освоено промышленное производство водно-щелочных электролизеров и принята первая программа в области создания водородных энергосистем на основе первичной электроэнергии, вырабатываемой на ГЭС. Данная программа выполнялась до 1936 года, после чего канадский рынок энергоносителей был переориентирован на потребление дешевого природного газа.

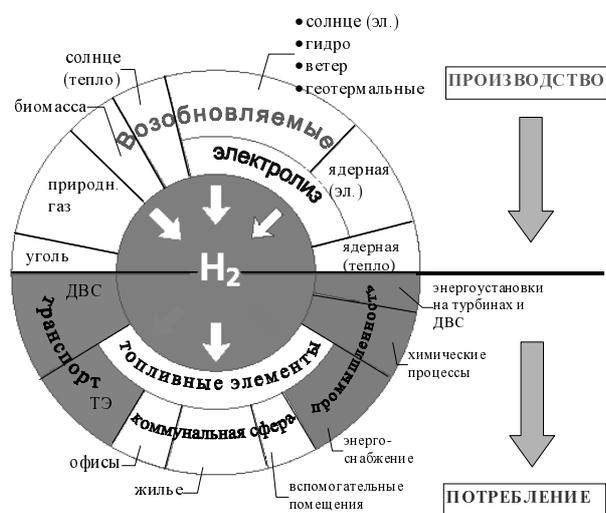


Рис. 2. Схематическое представление концепции водородной энергосистемы

В 20—40-е годы XX века основная активность европейских ученых и инженеров в области водорода была направлена на адаптацию тепловых машин, в первую очередь ДВС, для работы на нетрадиционных топливах, в том числе на водороде. Было показано, что использование водорода при соответствующей перестройке топливной системы (переход к внутреннему смесеобразованию) позволяет увеличить мощность двигателя на 10% и более. Добавка водорода к традиционному моторному топливу позволила повысить экономичность двигателей при снижении вредных выбросов в атмосферу. Всего за этот период на нетрадиционные топлива, включая водород, было переведено до 4 тысяч единиц автотранспорта, причем стоимость перестройки одного двигателя, как было подсчитано позднее, не превышала нескольких сот долларов США в ценах 1970 г.

Интересно отметить, что в годы II мировой войны исследования и разработки в указанном и смежных направлениях даже несколько интенсифицировались. В Германии в годы войны широко использовалось синтетическое моторное топливо, производимое путем гидрогенизации угля. В СССР, в условиях блокадного Ленинграда, грузовой автотранспорт был переоборудован на водородное топливо из отработавших свой ресурс аэростатов войск ПВО [31]. Указанные работы проводились под руководством техника-лейтенанта Б.И. Щелища.

С 1942 г. особый интерес к водородным разработкам для автономных энергосистем для дизельных подводных лодок проявляет военно-морской флот Великобритании. В качестве топлива для подводного плавания использовали сжатые водород и кислород, получаемые электролизом воды. В Австралии, отрезанной в годы войны от поставок нефти, были начаты программы по развитию крупномасштабного производства водорода и его использованию как моторного топлива. С послевоенным возобновлением поставок дешевой нефти эти программы были приостановлены.

С 1950 г. интерес к водороду возобновился в связи с успехами в разработках топливных элементов. Хотя ТЭ были изобретены еще в XIX веке, первые пригодные к практическому использованию образцы появились в начале 1950-х гг. в Великобритании и ФРГ. Впоследствии (1970—80 гг.) данные разработки имели большое значение для реализации космических программ США и СССР. Использование ТЭ позволило существенно повысить эффективность генерации электроэнергии на стадии потребления водорода.

Бурное развитие исследований в области водородной энергетики и технологии пришлось на 1974—1983 гг. и явилось прямым следствием энергетического кризиса, охватившего в то время большое число промышленно развитых стран. С середины 1970-х годов начинаются интенсивный обмен информацией и международная кооперация деятельности занимающихся водородом групп, в конце 1974 г. создается Международная ассоциация по водородной энергетике (ИАНЕ). Основным направлением деятельности Ассоциации является информационное обеспечение исследований и разработок в области водородных технологий, а также ознакомление с ними широкой мировой общественности. С этой целью Ассоциацией раз в два

года организуются представительные Всемирные конференции по водородной энергетике (World Hydrogen Energy Conferences) и издается Международный журнал (International Journal of Hydrogen Energy). Ассоциация активно способствовала учреждению Национальных ассоциаций по водородной энергетике, которых к настоящему времени насчитывается несколько десятков. Краткий отчет о деятельности IАНЕ за 1974—2000 гг. содержится в обзорной статье, которая была опубликована в российской научной периодике [1].

Изменение конъюнктуры на мировом рынке энергоресурсов во второй половине 1980-х годов привело к некоторому снижению темпов роста интенсивности исследований в области водородной энергетике и технологии. Особенно это было характерно для США, где при администрации Рейгана бюджет программ по возобновляемым источникам энергии и водороду был урезан на 80%. Высокая себестоимость производства водорода, в особенности методом электролиза, сдерживала интерес бизнесменов и политиков к водородной энергетике. Немалую роль также сыграло некоторое разочарование американских ученых, которые возлагали до этого слишком большие надежды на возведенную в ранг панацеи концепцию водородной энергетике и питали иллюзии в отношении ее быстрой реализации. Подход европейских и, в особенности, японских научно-технических, деловых и правительственных кругов был более реалистичным. Здесь сознавали, что широкое внедрение водородных технологий потребует длительной интенсивной работы. В Японии уже в 1974 г. стартовал долгосрочный проект «Sunshine», который выполнялся до 2000 г. Это была самая крупная программа по альтернативной энергетике, по размаху сравнимая с американской космической программой «Аполлон». Всего было израсходовано около 15 млрд долл., из них 3,6 млрд составлял водородный бюджет. В 1976 г. Международное энергетическое агентство (IEA) со штаб-квартирой в Париже начало финансирование водородных работ. В 1978 г. бюджет водородной программы IEA составлял порядка 16 млн долл. США, распределенных на несколько лет. Вместе с тем, общие тенденции расширения применения водорода в энергетике и технологии хотя и сохранились, но стали менее динамичными.

Важной вехой в развитии водородной энергетике и технологии явились результаты экономических исследований, проведенных в конце 1980-х годов в НИИ чистой энергии при Университете в Майями (США). В них было проведено детальное обоснование экономического ущерба от загрязнения атмосферы промышленными и транспортными выбросами и предложена методика введения соответствующих поправок в экономические расчеты. С учетом данных поправок, экологическая чистота водорода сделала его использование потенциально рентабельным в целом ряде производств [32].

Несколько забегая вперед, приведем диаграмму, на которой показаны современные европейские цены (в энергетическом эквиваленте) на водород, полученный различными методами, и сопутствующие выбросы CO_2 в атмосферу (рис. 3). Здесь же приведены цены на бензин, рассчитанные с учетом принятого в ЕС налога на загрязнение окружающей среды (вычисляемого по методике, аналогичной вышеупомянутой) и без него.

Из рисунка видно, что если 50% водорода производится из природного газа и 50% с использованием возобновляемых источников энергии, то средняя стоимость водородного топлива близка к стоимости бензина с учетом налога. В то же время бензин без налога на CO_2 примерно в 2 раза дешевле [33].

В целом, с середины 1970-х до конца 1990-х годов были заложены научно-технические основы современных водородных технологий. Значительные успехи были достигнуты в области производства водорода с использованием возобновляемых источников энергии. Были усовершенствованы и доведены до опытно-промышленных образцов базовые технические решения электролизеров различных типов с улучшенными характеристиками. Параллельно разрабатывались топливные элементы с более высокой эффективностью, сроком службы и надежностью, чем существовавшие ранее образцы. Появились принципиально новые технические решения электрохимических систем, использующих водород (новое поколение электролизеров и топливных элементов с твердым полимерным или оксидным электролитом). Также были разработаны принципиально новые экологически чистые технологии производства водорода, например биохимическая и фотокаталитическая.

Динамично развивались также конструкции тепловых двигателей и энергоустановок для сжигания водорода. В ряде стран (США, Германия, Япония, СССР) в 1970—1980 гг. были созданы демонстрационные образцы автомобилей и другого транспорта с ДВС на водородном топливе, либо с добавками водорода. В 1990-х годах появились первые образцы автомобилей и автобусов с электродвигателями, работающими от мобильных энергоустановок на топливных элементах.

В это же время был выполнен ряд крупных разработок по использованию водорода как авиационного или космического топлива. В США (программа «Space Shuttle») и СССР («Буран-Энергия») были созданы крупные ракеты-носители, главные двигатели которых

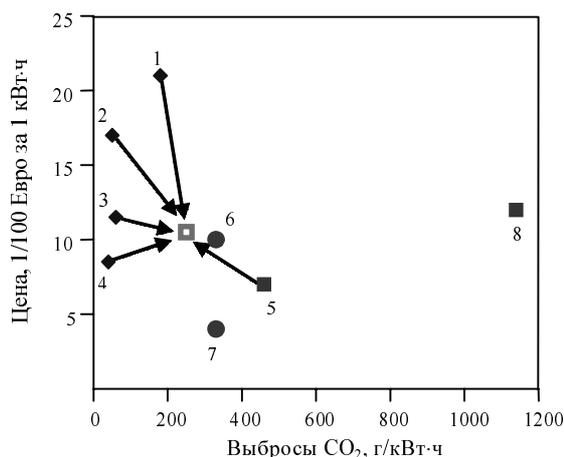


Рис. 3. Цены на водород при его производстве различными методами и сопутствующие выбросы CO_2 .

□ — водород, полученный с использованием различных источников энергии: 1 — солнце (4%); 2 — ветра (24 %); 3 — биомассы (14%); 4 — гидро (8%); 5 — водород из природного газа (50%); 6 — бензин с налогом на CO_2 ; 7 — бензин без налога; 8 — водород из угля.

использовали в качестве топлива и окислителя жидкие водород и кислород. Первое успешное испытание самолета на водороде (экспериментальная модель Ту-155 на базе самолета Ту-154, один из трех двигателей которого работал на жидком водороде) прошло в СССР в апреле 1988 г. Месяц спустя в США был испытан легкий (четырёхместный) самолет с одним двигателем, топливом которого был только водород.

Существенный прогресс был достигнут и в области решения сложной технической проблемы компактного хранения водорода. Было разработано новое поколение композитных газовых баллонов высокого давления, позволивших существенно увеличить массовую и объемную плотности хранения водорода. Также были усовершенствованы технологии получения и хранения жидкого водорода. Получили интенсивное развитие физико-химические методы хранения водорода в связанном состоянии, включая металлогидридные технологии. Одним из важных результатов явилось создание к началу 1990-х гг. высокоэффективных никель-металлогидридных аккумуляторов электроэнергии, которые в настоящее время используются в компактных химических источниках тока.

Вместе с тем хранение, транспортировка и распределение водорода остаются узким местом водородных энерготехнологий и содержат целый ряд технических проблем, требующих своего решения в ближайшем будущем.

Большое число новых разработок посвящено использованию водорода в бытовых целях (отопление, горячее водоснабжение, приготовление пищи). В основном, используется каталитическое горение водорода; на уровне демонстрационных моделей был создан целый ряд высокоэффективных, экономичных и удобных в эксплуатации бытовых устройств. Показана перспективность новых технических решений тепловых установок бытового и промышленного назначения (системы отопления, холодильники и кондиционеры, системы транспортировки низкопотенциального тепла и т.п.), основанных на использовании водородных металлогидридных технологий.

Основным результатом работы международного сообщества ученых и инженеров в области водородных энергосистем в 1970—1990 годах стало то, что данное направление вышло за рамки исследований и опытных разработок и перешло к стадии коммерциализации. К работам в данной области подключаются крупные коммерческие компании, в первую очередь, автомобильные (General Motors, Daimler-Benz, Toyota, BMW, Ford, Volvo и др.), нефтедобывающие (Royal Dutch/Shell), энергетические (Norsk Hydro, Tokyo Electric Utility). С 1989 г. начинается разработка стандартов в области водородной энергетики и технологии, для чего в Цюрихе по инициативе Международной организации по стандартам (ISO) создается постоянно действующий международный комитет. Успешно выполняется ряд крупных международных проектов по созданию демонстрационных образцов новой техники в области водородных энерготехнологий. В результате выполнения совместного Германско-Саудовского проекта «HYSOLAR» в 1994 году в районе Эр Рияда была запущена первая крупная установка по производству водорода с использованием солнечной энергии. В том же году в Европе появляются

первые водородные автобусы на топливных элементах. Одним из результатов работ по японскому проекту «Sunshine», который с 1993 года преобразован в комплексную международную программу «Мировая энергетическая сеть» (WE-NET) с бюджетом около 2 млрд. долл. США до 2030 года, явилось создание на базе компании Tokyo Electric Utility одной из первых в мире электростанций (11 МВт) на топливных элементах.

Существенный вклад в развитие водородной энергетики и технологии в рассматриваемый период внесли многочисленные группы, работавшие в бывшем СССР. Их работы координировались Всесоюзной комиссией по водородной энергетике, созданной по инициативе академика В.А. Легасова, и охватывали практически все направления данной проблемы.

Современное состояние исследований и разработок в области водородных энерготехнологий

Мотивация и общие тенденции

Тенденция роста количества исследований и разработок в области водородных энерготехнологий в настоящее время характерна для большинства стран мира и обусловлена стремлением к энергетической безопасности, глобальным ухудшением экологической обстановки и климата, поиском общедоступных источников энергии, необходимостью инвестиций в современную инфраструктуру энергообеспечения.

Анализ динамики общемирового спроса на энергию [34] показывает, что при сохранении существующей энергетической политики доля углеводородных топлив в балансе первичных энергоисточников будет неуклонно возрастать и составит к 2030 г. 90% прироста потребления условного топлива. Большая часть указанной потребности будет покрываться за счет нефти, 3/4 которой будет потребляться автотранспортом. Нужды других потребителей (энергетика, промышленность) будут, в основном, удовлетворяться за счет природного газа и, в меньшей степени, угля. В результате объем международной торговли углеводородными топливами увеличится по отношению к ситуации на 2000 г. вдвое. Это приведет к существенно-му росту экономической зависимости стран-импортеров.

Существенное увеличение потребления углеводородных топлив также приведет к значительному осложнению экологической обстановки: только выбросы CO₂ в атмосферу увеличатся за 2000—2030 гг. на 70%, в то время как по данным Межправительственной комиссии по изменению климата (IPCC) для избежания глобального потепления концентрация CO₂ в атмосфере за 2020—2050 гг. должна быть снижена на 50—60% по сравнению с уровнем 1990 г.

Таким образом, кардинальное изменение энергетической политики и сокращение потребления традиционных энергоносителей: нефти, природного газа и угля является чрезвычайно актуальной проблемой, затрагивающей общечеловеческие (климат и экология) и экономико-политические интересы стран-импортеров углеводородных топлив. Решение этой проблемы сопряжено с необходимостью разработки и внедрения энергосберегающих технологий и структурных изменений в энергетике, направленных на увеличение доли энергии, производство которой не связано

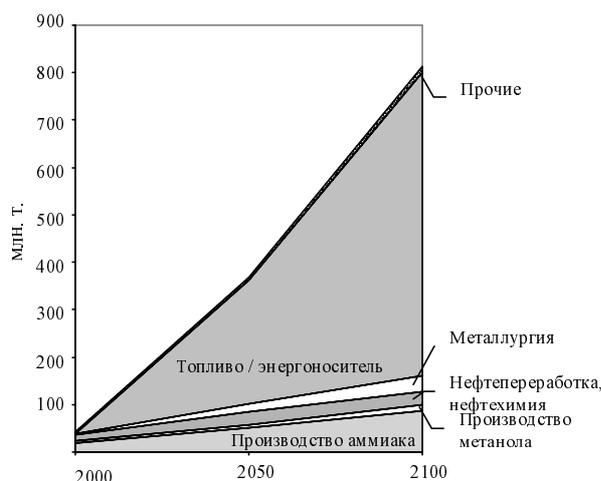


Рис. 4. Прогноз потребления водорода в XXI веке

с потреблением углеводородных топлив и выбросами CO_2 в атмосферу.

Реализация концепции водородных энергосистем является основным путем изменения энергетической инфраструктуры в желаемом направлении. На рис. 4 показан один из прогнозов изменения рынка водорода на XXI век [35]. Прогноз предусматривает увеличение потребления водорода по сравнению с уровнем 2000 г. в 16–20 раз, причем большая часть этого увеличения (до 80%) связана с использованием водорода как топлива и энергоносителя, две трети которого будет использоваться на нужды автотранспорта.

Для успешной реализации концепции водородные энерготехнологии должны быть усовершенствованы до такой степени, чтобы стать конкурентоспособными в техническом и экономическом отношении, пройдя путь от исследований и разработок до создания новой водородной инфраструктуры: производственных мощностей для получения водорода, систем его хранения, транспортировки, распределения, высокоэффективных стационарных и транспортных энергоустановок и т.п. Работы в данном направлении требуют тщательного планирования, координации и больших инвестиций в национальном и международном масштабах. По мнению экспертов, в ближайшие 30–50 лет инвестиции в создание водородной экономики составят от 1 до 10 триллионов долларов США [34].

Национальные водородные программы

В конце 1990-х годов в мире стартовал ряд крупных международных и национальных программ по коммерциализации научно-технических разработок по водородным технологиям, топливным элементам, возобновляемым источникам энергии и ряду других направлений, конечной целью которых является реализация концепции водородных энерготехнологических систем. Помимо государственных и неправительственных общественных организаций, работы в области водородных технологий инвестируются рядом коммерческих структур, главным образом, крупными автомобильными компаниями.

Ниже приводится краткий анализ типичных национальных программ.

США. Наиболее крупным комплексным планом развития работ в области водородных энерготехнологий на североамериканском континенте является программа Департамента энергетики США (DOE) «Водород, топливные элементы и технологии инфраструктуры», принятая в 1999 г. [36] и скорректированная в феврале 2004 г. [37]. Основной мотивацией является снижение зависимости США от импорта сырой нефти, две трети которой потребляется автотранспортом. Поэтому основной упор делается на широкомасштабное использование водорода на транспорте. С данным направлением также тесно связаны принятые в 2002 г. проекты модернизации автотранспорта: «Водородная инициатива» Президента США [38] и программа «FreedomCAR» [39]. Суммарные инвестиции в эти проекты на 5 лет составляют до 1,7 млрд долл. США, из которых 1,2 млрд выделено Президентом Дж. Бушем. Показательно, что финансирование и координация указанных проектов осуществляются DOE совместно с крупнейшими автомобильными компаниями США: DaimlerChrysler Corp., Ford Motor Co. и General Motors Corp. Другими важными компонентами комплексной водородной программы DOE являются программы исследований и разработок в области использования возобновляемых источников энергии солнца, ветра, гидроресурсов, геотермальных источников, биомассы и т.д. Фактический бюджет водородных разработок в США составил 92 млн долл. за 2003 г., 147,2 млн долл. за 2004 и 172,8 млн долл. в 2005 г.

Развитие водородной экономики США (рис. 5) предусматривает четыре этапа. На первом должны быть разработаны критические технологии, которые обеспечат практическую реализацию поставленных стратегических целей. Работы, которые сейчас ведутся на данном этапе учеными и инженерами в государственном и частном секторах, к 2015 г. должны привести к созданию демонстрационных образцов техники и оборудования; разработке исчерпывающих правил безопасности, соответствующих стандартов и технических условий. Тем самым будет осуществлена подготовка к широкомасштабным инвестициям в водородную инфраструктуру и ее коммерческой реализации. Решение по данному вопросу должно быть принято в 2015 г.

Второй этап (2010–2025 гг.) связан с началом коммерциализации водородных энергетических и транспортных систем и будет проходить при значительной поддержке правительства, как в виде прямых инвестиций, так и путем принятия политических решений, стимулирующих расширение данного рынка. С 2015 г. начнется третий этап реализации водородной программы, предусматривающий создание к 2035 году инфраструктуры водородной экономики и расширение рынка водородных технологий. Начало третьего этапа будет согласовано с принятием решения о коммерциализации водородных технологий, в первую очередь, применительно к транспортным средствам на топливных элементах. Соответствующие инвестиции планируется, в основном, привлекать из бизнеса при опеке правительства.



Рис. 5. Стратегия развития водородной экономики в США

Внедрение водородных технологий в ходе выполнения работ по этапам I—III будет сопровождаться их дальнейшим совершенствованием в техническом и в экономическом плане (переход к самоокупаемости и возврат инвестиций в виде прибыли). Последний процесс связан с началом в 2025 году четвертого этапа водородной программы, на котором к 2040 г. будут полностью сформированы самодостаточный рынок и инфраструктура и тем самым осуществлен полный переход к водородной экономике. В результате потребность США в нефти должна снизиться на 11 млн баррелей в день, а ежегодные выбросы парниковых газов в атмосферу уменьшиться более чем на 500 млн т.

Водородная программа США, в основном, ориентирована на использование водорода как топлива для автотранспорта, ее основными особенностями являются приоритет работ по мобильным энергоустановкам на топливных элементах, а также высокий уровень требований к характеристикам систем хранения водорода для транспорта. В частности, массовая емкость (плотность) систем хранения водорода, разработанных к 2005 г., должна составить 4,5%(масс.) водорода (36 кг/м^3), к 2010 г. — 6,0%(масс.) (45 кг/м^3) и к 2015 г. — 9,0%(масс.) (81 кг/м^3). Основным результатом выполнения данной программы должна стать конкурентоспособность водородного автотранспорта на топливных элементах с традиционными автомобилями с ДВС. Это, в частности, означает снижение стоимости водорода в 3—4 раза и стоимости 1 кВт установленной мощности топливных элементов более чем в 10 раз по сравнению с нынешним уровнем.

Япония. В настоящее время основные работы в Японии в области водородных технологий и топливных элементов курируются Министерством экономики, торговли и промышленности (METI). Работы направлены на создание инфраструктуры и широкое внедрение как стационарных энергоустановок на топливных элементах, так и автотранспорта на водородном топливе и топливных элементах. Программа METI предусматривает увеличение суммарной мощности стационарных энергоустановок на ТЭ с 2,2 ГВт в 2010 г. до 10 ГВт в 2020 г. и 12,5 ГВт в 2030 г., соот-

ветствующее число единиц автомобильной техники на ТЭ планируется на уровне 50 тысяч (2010 г.), 5 млн (2020 г.) и 15 млн (2030 г.). Годовое потребление водорода при этом составит 6 (2010 г.), 28,5 (2020 г.) и 46 (2030 г.) млрд м^3 [40].

С этой целью правительством Японии предусматриваются значительные инвестиции в работы по ТЭ и водороду. Так, бюджет METI на данные работы увеличился от 106 млн долл. США в 2001 до 303 млн долл. США в 2004 г. [41]. Работы по программе METI проводятся в три этапа. На первом (2002—2005 гг.) проводились детальные исследования и начат пересмотр нормативов и правил по производству, хранению и использованию водорода, проведены первые демонстрационные работы по внедрению водородной инфраструктуры. Так на март 2004 г. в Японии функционировало 30 стационарных водородных энергоустановок на ТЭ, 10 водородных заправочных станций и около 50 единиц автотранспорта (в частности, предназначенных для обслуживания Правительства) с ТЭ на водородном топливе. Второй этап (2005—2010 гг.) предусматривает расширение внедрения водородных энерготехнологий с постепенным построением их полной инфраструктуры. На третьем этапе (2020—2030 гг.) планируется перенос источника инвестиций из госбюджета в бизнес-структуры и естественное развитие водородной экономики.

Исследования и разработки в области водородных энерготехнологий в Японии проводятся в государственных университетах и научных лабораториях и в исследовательских подразделениях крупных автомобильных (Toyota, Honda, Mitsubishi, Nissan) и металлургических/машиностроительных (Japan Steel Works, Japan Metals and Chemicals и др.) компаний.

В водородных программах Японии большое внимание уделяется также использованию водородных технологий в промышленности и бытовом секторе. В частности, это использование металлгидридных технологий в процессах преобразования и транспортировки тепла [42].

Европейское сообщество. Начало широкомасштабной активности ЕС в области водородных технологий [43, 44] можно отнести к 1999—2001 гг., когда была создана Европейская тематическая сеть по водородной энергетике. Данная группа объединяет представителей европейской науки и промышленности (компании Norsk Hydro, Shell Hydrogen, Air Products, BMW и др.). Основным направлением ее деятельности является выработка единой стратегии развития водородной энергетики в странах Европы и внесение соответствующих предложений в официальные структуры ЕС. В 2002—2003 гг. группа способствовала выработке комплексной программы ЕС (FP6 R&D program) в части, относящейся к водороду, топливным элементам и работам в области возобновляемых источников энергии [45].

Основными целями водородных программ ЕС является снижение зависимости экономики от импорта ближневосточной нефти, сокращение выбросов в атмосферу*, сохранение лидерства в области наукоемких

* В соответствии с Киотским протоколом, подписанным ЕС, выбросы парниковых газов странами Сообщества к декабрю 2008 г. должны быть сокращены на 8% по сравнению с уровнем 1990 г.

технологий, а также увеличение доли возобновляемых источников энергии в балансе стран Европы с 6% в 2000 г. до 12% в 2010 г. и 33% в 2020 г.

Программа перехода стран ЕС от экономики, ориентированной на использование органических топлив, к водородной экономике рассчитана на 50 лет (2000—2050 гг.) и включает два основных этапа: I этап (2000—2020 гг.) — разработка и создание демонстрационных прототипов водородных энергосистем; II этап (2020—2050 гг.) — широкомасштабная коммерциализация технологий, основанных на водороде и топливных элементах. Работы проводятся по двум основным направлениям:

- производство и распределение водорода;
- системы потребления водорода и топливные элементы.

Первое направление включает производство водорода конверсией природного газа и электролизом воды, начало создания региональных элементов водородной инфраструктуры (заправочных станций и распределенное производство водорода для них) и трубопроводных сетей распределения водорода. В дальнейшем планируются работы по организации производства водорода из возобновляемых источников, включая газификацию биомассы; модернизация технологий получения водорода из органического сырья с улавливанием CO₂, а также с использованием ядерной энергетики.

По второму направлению планируется создать стационарные коммерческие системы на низкотемпературных (до 50 кВт) и на высокотемпературных ТЭ (до 500 кВт) (водородный автотранспорт на ДВС и демонстрационные автобусы на водородном топливе). Следующим этапом должно стать снижение стоимости и коммерциализация стационарных и мобильных энергоустановок на ТЭ (портативные источники тока, автомобильный транспорт, крупные — до 10 МВт энергоустановки), создание автономных энергосистем на ТЭ и использование водорода в авиации.

Финансирование НИОКР по водородной тематике осуществляется из фондов ЕС на конкурсной основе. Так в рамках программы FP6 в 2003 г. было выделено 1 млн евро на водородные проекты и 1 млн евро на проекты по топливным элементам. Дальнейшие инвестиции предусматривают выделение порядка 2,8 млрд евро на период 2005—2015 гг. на разработку технологий производства водорода и электроэнергии из углеводородных топлив с утилизацией CO₂ (1,3 млрд) и на производство водорода из возобновляемых источников энергии, его стационарное и транспортное использование (1,5 млрд). Частичное финансирование исследований по соответствующим проектам также осуществляется коммерческими компаниями.

По оценкам общие инвестиции в водородные программы ЕС составляют от 4 до 15 млрд евро. В результате выполнения водородных программ производство водорода в странах ЕС планируется увеличить с 2,3 млрд м³ в 2000 г. до 20,6 млрд м³ в 2025 г. Количество работающих на водороде автомобилей к 2020 г. должно составить 2 млн (1% от общего автопарка), при потреблении водородного топлива — порядка 300 тыс. т/год. Общая доля водорода в топливном балансе стран ЕС должна составить 2% к 2015 г. и 5% — к 2020 г.

Важный вклад в развитие водородных технологий в странах Европы также вносят отраслевые программы, финансируемые и координируемые Международным энергетическим агентством (IEA), Европейским космическим агентством (ESA) и рядом других организаций. Большое значение также имеют работы по двусторонним соглашениям ЕС с другими странами, в частности с Канадой.

Страны Северной Европы. Активно участвуя в водородных программах ЕС, страны северной Европы, включая те из них, которые формально не являются членами Сообщества, имеют также целый ряд собственных национальных и межгосударственных водородных программ. Наибольшую активность в этом отношении проявляют государства, энергетика которых базируется на использовании возобновляемых источников энергии: гидроресурсов (Норвегия) и геотермальных источников (Исландия).

В Норвегии водородные разработки, в основном, финансируются Советом по исследованиям в энергетике (Nordisk energiforskning, NEF), имеющим статус правительственного учреждения. Планируемый бюджет исследований и разработок в рамках водородной программы NEF составляет 17—29 млн долл. США на период до 2010 г. и 7—14 млн долл. США — на 2010—2014 гг. Госбюджетное финансирование составляет 50%, остальные 50% вносят промышленные и бизнес-структуры. Работы ориентированы на производство водорода, его хранение и распределение, а также на создание автономных энергосистем, использующих возобновляемые источники энергии. Часть исследований и разработок ведется также в рамках двусторонних соглашений Норвегии с США и Японией [46].

В настоящее время вклад возобновляемых энергоресурсов (гидро и геотермальных) в энергетику Исландии является определяющим. В то же время потребности в топливе для автотранспорта и флота (главным образом рыболовного) удовлетворяются только за счет импорта нефтепродуктов. Основной стратегической целью водородной программы Исландии [47] является снижение зависимости страны от импорта путем перевода автотранспорта и рыболовного флота на водородное топливо, получаемое на основе возобновляемых энергоресурсов. Данное направление с 1998 года является приоритетом политики страны и поддерживается национальным Правительством. В результате реализации водородной программы Исландия должна к 2030 году стать первой страной в мире, где будет полностью реализована концепция и построена инфраструктура водородной экономики. С этой целью в 1999 г. в стране создан концерн Icelandic New Energy Ltd (INE), 51% акций которого принадлежит Исландским государственным учреждениям и частным фирмам, а остальные 49% — крупным иностранным компаниям (Shell Hydrogen, Norsk Hydro, DaimlerChrysler — по 16,33%). В настоящее время интенсивно ведутся работы по реализации программы, включая, в частности, эксплуатацию водородных автобусов с топливными элементами на городских маршрутах столицы. Одна из составляющих водородной транспортной инфраструктуры — заправочная станция в Рейкьявике, характерной особенностью которой является получение водорода на месте электролизом и

его дальнейшая подача в промежуточную систему хранения (газ под давлением 40 МПа).

Китай. Большое внимание исследованиям и разработкам в области водородной энергетики уделяется в Китае [48, 49]. Являясь одним из крупнейших в мире импортеров нефти (в перспективе — и природного газа), Китай крайне заинтересован в изменении структуры своего энергорынка и сокращении потребления данных видов природных энергоносителей. Одним из путей такой реструктуризации могло бы стать дальнейшее расширение использования угля, который и в настоящее время занимает значительную долю в энергобалансе страны (71,5% на 1997 г.). Однако такой подход сопряжен с необходимостью кардинального усовершенствования технологий использования угля, снижения вредных выбросов в атмосферу. На сегодняшний день Китай занимает второе после США место в мире по выбросам CO₂ и как страна, подписавшая Киотский Протокол, должен принимать меры по сокращению этих выбросов.

Радикальным путем решения указанных проблем, по мнению правительства Китая, является постепенный переход к водородной экономике, для построения которой Китай имеет все предпосылки. Данная страна является вторым в мире производителем водорода (рис. 6), имеет хорошо освоенные технологии его производства (в том числе методом электролиза), извлечения, очистки и использования. В Китае освоены на промышленном уровне новые наукоемкие технологии, в частности металлгидридная.

В настоящее время исследованиями и разработками в области водородных энерготехнологий в Китае занимаются десятки университетов и НИИ. Работы по водородной энергетике выделены отдельной строкой в пятилетнем плане развития науки и технологий Китая (Программа № 973 Министерства науки и технологий). Общие инвестиции государства в работы по водороду и топливным элементам в настоящее время оцениваются в пределах 290—460 млн долл. США. К указанным работам широко привлекаются промышленность и бизнес, большое внимание уделяется работам в рамках международного сотрудничества. Показательна высокая активность китайского бизнеса на европейском рынке возобновляемых источников энергии.

Российская Федерация. Ядро экономики и основа бюджета нынешней России строятся на экспорте российской нефти и газа. Российские правительственные

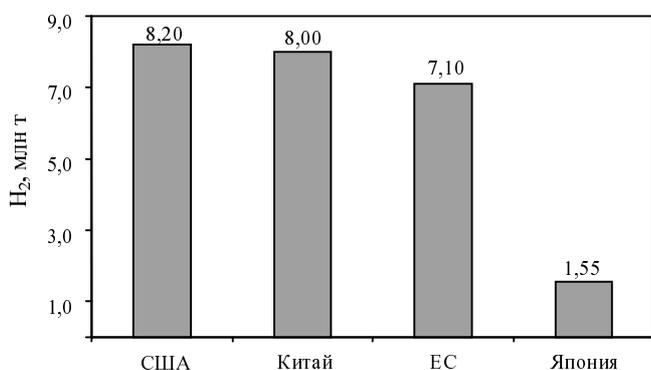


Рис. 6. Производство водорода (млн т) в 2002 году

и деловые круги понимают, что необходимо быть готовыми к снижению такой зависимости во избежание депрессионной модели развития страны. Россия имеет высокий научный потенциал и контролирует 50% мирового производства палладия, использование которого необходимо для реализации целого ряда водородных технологий, что создает благоприятную ситуацию для развития водородной энергетики. Основной целью российских водородных программ является создание к 2010—2012 гг. конкурентоспособных экспортно-ориентированных разработок в данной области [50, 51]. Политика финансирования данных разработок предусматривает инвестиции крупных нефтяных, газовых и энергетических компаний совместно с государственными средствами.

10 ноября 2003 г. Президент РАН Ю.С. Осипов и Генеральный директор ГМК «Норильский никель» М.Д. Прохоров подписали соглашение о сотрудничестве, в соответствии с которым инвестиции ГМК «Норильский никель» в исследования по водородной энергетике будут составлять 40 млн долл. США в год. «Комплексная программа поисковых, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по водородной энергетике и топливным элементам», разработанная в рамках данного соглашения, была подписана 9 декабря 2003 г. Программа предусматривает проведение исследований по расширению промышленного использования палладия, разработке перспективных технологических процессов по изготовлению продукции на его основе; создание научно-технологического, технологического и конструкторского задела по ключевым устройствам, агрегатам и системам водородной энергетики и ТЭ (твердополимерных, щелочных и твердооксидных) с характеристиками, превосходящими зарубежные аналоги; создание топливных процессоров для конверсии углеводородных топлив и получения водорода и комплексов по производству, очистке, аккумулированию, хранению и транспортировке водорода; разработку промышленной технологии изготовления элементной базы и новых материалов для водородной энергетики и автономных энергоустановок с ТЭ различных типов; создание унифицированного ряда высокоэффективных экологически чистых энергоустановок и электрохимических генераторов водорода широкого класса на основе ТЭ мощностью от 1 до 25 кВт. В Программе предусмотрено также создание портативных источников тока на основе ТЭ для бытовой электронной аппаратуры и формирование базовой кооперации научных организаций РАН и промышленных предприятий для производства конкурентоспособных энергоустановок на основе ТЭ и высокотехнологичной продукции на основе использования палладия и металлов платиновой группы. В ходе выполнения Программы будут подготовлены предложения по развитию национальной инфраструктуры водородной энергетики и разработке национальной программы по водородной энергетике и ТЭ, включающей также варианты и схемы финансирования работ.

Существуют еще несколько крупных российских водородных программ. Так весной 2002 г. была принята программа по созданию коммерческих энергоустановок на ТЭ (РАН, МНТЦ, Минатомпром, Газпром). Общий объем поддержки водородной тематики

МНТЦ составляет 35 млн долл. США. Кроме этого, имеет место финансирование российских водородных разработок рядом зарубежных компаний.

Международное сотрудничество

Приведенный перечень национальных водородных программ является далеко не полным. В реализации концепции водородных энергосистем активно участвуют многие другие страны (Канада, Австралия, Новая Зеландия, Бразилия, Индия и т.д.), и практически все ведущие автомобильные компании мира, целый ряд транснациональных нефтегазовых корпораций (Royal Dutch/Shell, ExxonMobil, Texaco, British Petroleum и др.). Большую роль в выполнении данных работ играет международное сотрудничество в рамках двусторонних и многосторонних соглашений, программ крупных международных организаций, таких как уже упоминавшиеся Международное энергетическое агентство (IEA), Международная ассоциация по водородной энергетике (ИАНЕ) и т.п.

В ноябре 2003 года в Вашингтоне 12 стран* и ЕС (3,5 млрд жителей, 85% общемирового ВВП) учредили Межгосударственное партнерство по водородной экономике [52]. Данная межправительственная организация, открытая для принятия в нее новых членов, осуществляет координацию существующих и способствует выработке новых национальных и международных программ по созданию и внедрению высокоэффективных водородных технологий.

Заключение

За последнее десятилетие в области водородной энергетики и технологии произошли качественные изменения. Если ранее основное внимание уделялось научным, технологическим и энергетическим аспектам, то в настоящее время на первый план выходят экологические, экономические и политические составляющие проблемы создания межотраслевой инфраструктуры, обеспечивающей широкомасштабное использование водорода.

Зародившаяся на фоне мирового нефтяного кризиса 1970-х годов концепция водородных энергосистем к настоящему времени переросла в динамично развивающееся научно-техническое направление, поддержка которого возведена в ранг приоритетов политики международных сообществ, национальных правительств, руководства коммерческих компаний и общественных организаций.

В то же время следует отметить, что в большинстве работ по конкретным направлениям водородной энергетики, технологии и экономики ощущается недостаток системного подхода, выявления взаимосвязи между этими направлениями и, как следствие, отсутствуют сбалансированные рекомендации стратегического порядка. Одним из немногих исключений являются экономические исследования по учету фактора загрязнения окружающей среды. В результате экономическая мотивация водородных программ остается в рамках представлений сегодняшнего дня. Примером такого подхода является чрезмерный, на наш взгляд, акцент на автотранспорт. Без должного внимания к

стационарным водородным установкам, в первую очередь технически и экономически апробированным в настоящее время, реализация такого подхода представляется проблематичной.

По нашему мнению, для реализации концепции водородных энергосистем необходим всесторонний системный анализ с последующей выработкой стратегии расширения использования водорода в областях, где он уже прочно занял свое место, и постепенного перехода в новые области энергетики и технологии. При таком подходе на внедрение водородной экономики потребуются более длительное время, зато внедрение будет органичным и надежды на его реализацию, в конечном счете, сбудутся, а не останутся красивой, но утопической мечтой.

Авторы благодарны Б.М. Булычеву (МГУ, Химический факультет) и Н.А. Штейнбергу (Минэнерго Украины) за инициирование дискуссии, в результате которой была написана данная статья.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Veziroglu T.N.* Межд. науч. ж. «Альтернативная энергетика и экология» (Int. Sci. J. for Alternative Energy and Ecology), 2004, № 12(20), с. 5—11.
2. *Bockris J.O'M., Veziroglu T.N., Smith D.* Solar Hydrogen Energy. The Power to Save the Earth. London: Macdonald & Co. Publ., 1991.
3. *Гамбург Д.Ю., Семенов В.П., Дубовкин Н.Ф., Смирнова Л.Н.* Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение. Справочник. Под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина. М.: Химия, 1989, 672 с.
4. *Barbir F.* Review of Hydrogen Conversion Technologies. Clean Energy Research Institute, University of Miami, 15 p.
5. *Шпильрайн Э.Э., Малышенко С.П., Кулешов Г.Г.* Введение в водородную энергетику. М.: Энергоатомиздат, 1984, 264 с.
6. *Козин Л.Ф., Волков С.В.* Водородная энергетика и экология. Киев: Наукова думка, 2002, 335 с.
7. База данных «Термические Константы Веществ» (Рабочая версия от 17 декабря 2002 г.), <http://www.chem.msu.ru/cgi-bin/tkv2.pl?show=welcome.html>
8. Hydrogen: Hazardous Substance Fact Sheet. New Jersey Department of Health and Senior Services, June 1996 (revision August 2002), 6 p.
9. *Dresselhaus M.S., Thomas I.L.* Nature, 2001, v. 414, № 15, p. 332—337.
10. *Dell R.M., Rand D.A.J.* J. Power Sources, 2001, v. 100, p. 2—17.
11. *Browning L.* Projected Automotive Fuel Cell Use in California, P600-01-022, Consultant Report — Prepared for California Energy Commission, October, 2001, 28 p.
12. *Wurster R., Zittel W.* Workshop on Energy technologies to reduce CO₂ emissions in Europe: prospects, competition, synergy, Energieonderzoek Centrum Nederland ECN, Petten, April 11—12, 1994, (<http://www.hyweb.de/Knowledge/Ecn-h2a.html>).
13. *Zittel W., Wurster R.* Hydrogen in the Energy Sector, Issue: 8.7.1996 (<http://www.hyweb.de/index-e.html>)
14. *Ramachandran R., Menon R.K.* Int. J. Hydrogen Energy, 1998, v.23, № 7, p. 593—598.
15. *Riis T., Hagen E.F., Vie P.J.S., Ulleberg Ø.* Hydrogen Production — Gaps and Priorities. IEA Hydrogen Implementing Agreement (HIA), http://www.ieahia.org/pdfs/HIA_Production_G&P_Final_with_Rev.pdf

* Австралия, Бразилия, Индия, Исландия, Канада, КНР, Корея, Новая Зеландия, Норвегия, Россия, США, Япония.

16. *Hodson M., Marvin S.* Technology Characterisation of the Hydrogen Economy. Work. Pap. 1, May 2004, Centre for Sustainable Urban and Regional Futures (SURF), <http://www.surf.salford.ac.uk>
17. *McHugh K.* Hydrogen Production Methods. Report MPR-WP-0001, Revision 0, February 2005, Prepared for MPR Associates, Inc., 41 p.
18. *Chiesa P., Consonni S., Kreuz T., Williams R.* Int. J. Hydrogen Energy, 2005, v. 30, p. 747–767.
19. *Smith A.F.G., Newborough M.* Rep. to the Carbon Trust and ITM-Power PLC, November 2004, Heriot-Watt University Edinburgh EH14 4AS, 209 p.
20. Electrolyser (<http://www.itpower.co.uk/investire/pdfs/electrolyser.pdf>)
21. *Григорьев С.А., Фатеев В.Н., Порембский В.И.* Тр. Третьей Межд. конф. «ВОМ–2004», Донецк–Святогорск, 17–21 мая 2004, с. 35–39.
22. *Parker R., Clapper W.L.* Hydrogen-based utility energy storage system. Proc. 2001 DOE Hydrogen Program Review NREL/CP-570-30535.
23. *Lindblad P.* Proc. 15th World Hydrogen Energy Conf. «Hydrogen 2004», Yokogama, Japan; June 27–July 2, 2004, 30PL-02.
24. *Domen K.* Proc. 15th World Hydrogen Energy Conf. «Hydrogen 2004», Yokogama, Japan; June 27–July 2, 2004, 29PL-08.
25. *Sarmurzina R.G., Sokolskii D.V., Kurapov G.G., Vasyuk V.P., Morozova O.I.* Proc. the 7th World Hydrogen Energy Conf. «Hydrogen Energy Progress VII», Moscow, USSR, 25–29 September, 1988. Eds. T.N. Veziroglu, A.N. Protsenko. New York e.a.: Pergamon Press, 1988, v. 2, p. 931–941.
26. *Тарасов Б.П., Лотоцкий М.В., Яртысь В.А.* См. статью в этом номере, с. 34.
27. *Dutton G.* Hydrogen: The Fuel of the Future? Energy Research Unit, CLRC Rutherford Appleton Laboratory. www.h2net.org.uk
28. *Малышенко С.П.* Российские исследования и разработки в области водородных технологий и топливных элементов. Презентация на сем. «Европейский Союз–Россия. Совместная программа исследований в области водородных технологий и топливных элементов», Москва, 29 сентября 2004 года.
29. Hydrogen Energy and Fuel Cells. A vision of our future. Final report of the High Level Group (EUR 20719 EN), European Commission, 2003, 36 p.
30. A History of Hydrogen Energy: The Reverend Cecil, Jules Verne, and the Redoubtable Mr. Erren. Columbia Earthscape, <http://www.earthscape.org/r3/hop01/hop01.pdf>
31. *Раменский А.Ю., Шелищ П.Б., Нефедкин С.И., Рычков А.А., Старостин М.В.* Применение водорода на автомобильном транспорте: перспективы на российском рынке. Презентация Нац. ассоц. водородной энергетики РФ, 2005.
32. *Bockris J.O'M., Wass J.C.* Proc. the 7th World Hydrogen Energy Conf. «Hydrogen Energy Progress VII», Moscow, USSR, 25–29 September 1988. Eds. T.N. Veziroglu, A.N. Protsenko. New York e.a.: Pergamon Press, 1988, v. 1, p. 101–151.
33. *Rubbia C.* Hydrogen at crossroads between science and politics. 1st Eur. Hydrogen Energy Conf., Grenoble, 2–5 September 2003.
34. *Haug M.* Energy perspectives: future energy requirements and the role for hydrogen. 1st Eur. Hydrogen Energy Conf., Grenoble, 2–5 September 2003.
35. *Ponomarev-Stepnoi N.N., Stolyarevsky A.Ya.* Major aspects of the strategy of hydrogen-based power development with nuclear energy sources. Presentation at the Int. Conf. «Fifty Years of Nuclear Power — the Next Fifty Years», Obninsk, Russia, 29–02.07.2004.
36. A Multiyear Plan for the Hydrogen R&D Program Rationale, Structure, and Technology Roadmaps. Office of Power Delivery; Office of Power Technologies; Energy Efficiency and Renewable Energy; U.S. Department of Energy; August, 1999, 55 p.
37. Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program. Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan. Planned program activities for 2003–2010. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy (<http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/mypp/>)
38. *Chalk S., Inouye L.* The President's Hydrogen Initiative: US DOE's Approach. A Paper for the Biennial Asilomar Conf. on Energy and Transportation on «The Hydrogen Transition», July–August, 2003.
39. FreedomCAR and Fuel Partnership Plan, November, 2004.
40. *Inui M., Iwabuchi H., Fukuda K.* Proc. 15th World Hydrogen Energy Conf. «Hydrogen 2004», Yokohama, Japan, June 27–July 2, 2004, 28A-01.
41. *Futita M.* Proc. 15th World Hydrogen Energy Conf. «Hydrogen 2004», Yokohama, Japan, June 27–July 2, 2004, 28PL-02.
42. *Uchida H.* An overview of hydrogen related research & technology development in Japan. Norstore Conf./Workshop, Stavern, Norway, June 3–5, 2004.
43. *Bunger U.* An Overview of Hydrogen Energy Related Research and Technology Development in Europe. Norstore Conf./Workshop, Stavern, Norway, June 3–5, 2004.
44. *Bunger U.* Proc. 15th World Hydrogen Energy Conf. «Hydrogen 2004», Yokohama, Japan, June 27–July 2, 2004, 28A-04.
45. Eur. Fuel Cell and Hydrogen Projects. 1999–2002. Project Synopses. Eur. Commission, Directorate J, Energy. Unit RTD-J-2, Energy Production and Distribution Systems, 2003.
46. Hydrogen som fremtidens energibærer. Norges offentlige utredninger 2004:11.
47. *Sigfusson T.I.* Proc. 15th World Hydrogen Energy Conf. «Hydrogen 2004», Yokohama, Japan, June 27–July 2, 2004, 28A-03.
48. *Shi Ding Huan.* Speech at the IPHE conf., Nov. 20, 2003, Washington DC, USA, <http://www.iphe.net/>
49. *Mao Z.* Proc. 15th World Hydrogen Energy Conf. «Hydrogen 2004», Yokohama, Japan, June 27–July 2, 2004, 28A-07.
50. *Прохоров М.Д.* Химия и жизнь, 2004, № 1, с. 8–9.
51. *Комаров С.М.* Там же, 2004, № 1, с. 9–15.
52. International Partnership for the Hydrogen Economy, IPHE, <http://www.iphe.net/>