

## Проблематичность становления водородной энергетики

Асланян Г.С.<sup>1</sup>, доктор физ.-мат. наук, Реутов Б.Ф.<sup>2</sup>, канд. техн. наук

Центр энергетической политики<sup>1</sup> — Министерство образования и науки Российской Федерации<sup>2</sup>

Сделана попытка дать реальную оценку достоинств водородной энергетики и перспектив ее развития.

В последнее десятилетие наблюдается необычно большой интерес к водородной энергетике и топливным элементам (ТЭ). Ежегодные затраты на научно-исследовательские и опытно конструкторские работы (НИОКР) по этой тематике исчисляются несколькими миллиардами долларов. Поражает воображение и количество информации, посвященной данной проблеме. Достаточно сказать, что поиск в информационной системе Интернета Google.com лишь по ключевому слову «топливный элемент» обнаруживает свыше 8,9 млн источников. Возникает вопрос, что стоит за этим бумом? Действительно ли водород может стать принципиально новым источником энергии, имеющим неоспоримые и широко рекламируемые преимущества перед используемыми в настоящее время энергетическими источниками, и человечество находится на пороге очередной технологической революции, предполагающей переход к водородной экономике? Если ответ на этот вопрос положителен, то Россия должна немедленно начать широкомасштабные работы в этой области с использованием всех имеющихся материальных и человеческих ресурсов, чтобы своевременно войти в водородную экономику, заняв при этом хоть какие-либо ниши в промышленном освоении соответствующих наукоемких технологий.

В 1984 г. была опубликована книга «Введение в водородную энергетику» [1]. Особый оптимизм утвердился после появления в Интернете статьи известного американского ученого Амори Ловинса, названной «Двадцать водородных мифов» [2]. В ней делается попытка опровержения различных сомнений (а их насчитано 20), касающихся перспективности водородной энергетики. На фоне этой работы с энтузиазмом была встречена идея создания российской комплексной программы по водородной энергетике и топливным элементам в рамках соглашения между Российской академией наук и ОАО «ГМК Норильский никель», которая могла бы стать основой подобной российской национальной программы. Один из авторов настоящей статьи был приглашен к участию в разработке программы: перед ним стояла задача информационно-аналитической поддержки ее реализации, определения статуса проблемы и выявления вопросов, которые российские ученые могли бы решить. Он видел свою роль в привлечении к данной те-

матике должного внимания лиц, принимающих решения в российской науке, и в убеждении широкой общественности в неизбежности наступления «водородной эры». Однако по мере углубления в суть проблемы, осмысления фундаментальных принципов, стоящих за ключевыми звеньями водородного цикла, оптимизм сменился определенным скептицизмом, поскольку многие утверждения и доводы в пользу водорода, в том числе и высказываемые в [2], стали представляться спорными и неоднозначными, а значит, требующими обсуждения и доказательств. Именно эта цель и ставится в данной публикации. Прежде чем перейти к обсуждению утверждаемых в [2] достоинств водородной энергетики необходимо напомнить о некоторых специфических характеристиках и свойствах водорода.

Прежде всего следует указать на хорошо известное среди специалистов положение о том, что водород не является первичным источником энергии и в природе встречается лишь в виде различных соединений, среди которых доминирующим является вода. Поэтому идея водородной энергетики основана на повсеместном использовании водородсодержащего топлива в качестве вторичного энергоносителя, каким в настоящее время является электроэнергия.

В свободном состоянии и при нормальных условиях водород — это бесцветный газ, без запаха и вкуса, плотностью 0,084 кг/м<sup>3</sup>. Последнее означает, что 1 кг водорода занимает объем 11 м<sup>3</sup>. В газообразном состоянии при любом давлении водород обладает меньшей энергией, чем природный газ, метанол, пропан, не говоря уже о бензине (на единицу объема).

Жидкий водород (при температуре 20 К) занимает 1/700 объема в газообразном состоянии. При давлении 80 МПа газообразный водород практически сравнивается с жидким водородом по показателю удельного объемного энергетического содержания и значительно уступает жидким топливам. В частности, 1 л жидкого водорода содержит столько же энергии, сколько 0,28 бензина, 0,22 дизельного топлива или керосина, 0,4 жидкого пропана и 0,54 л метанола (рис. 1). Однако по удельному массовому энергосодержанию жидкий водород, имеющий высшую теплоту сгорания ( $Q_v = 142,8$  МДж/кг\*), почти в 3,5 раза превышает данный

\*Разница между высшей  $Q_v$  и низшей теплотой сгорания  $Q_n$  составляет для водорода 18,3, метана 10,4 и бензина 6,4 %.

<sup>1</sup>103051, Москва, ул. Петровка, д. 14. ЦЭП.

<sup>2</sup>125009, Москва, ул. Тверская, д. 11. Минобрнауки России.

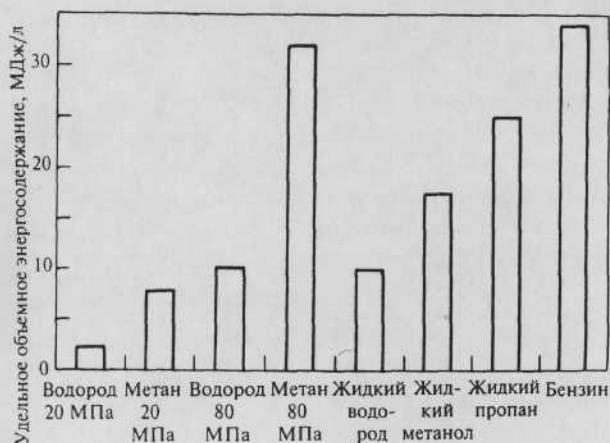


Рис. 1. Высшая теплота сгорания водорода и топлива других альтернативных видов

показатель нефтяных видов топлива. Это главная причина, по которой жидкий водород используется как топливо для летательных аппаратов, где высокое энергосодержание на единицу массы имеет первостепенное значение. Далее обсуждается бесперспективность утверждаемых основных достоинств водорода.

### Наличие обширной и диверсифицированной ресурсной базы

С этим доводом следует однозначно согласиться, поскольку действительно водород можно получить из первичной энергии всех видов, включая практически все ископаемые топлива и первичную электроэнергию (ядерную, гидравлическую, фотоэлектричество и ветровую). Именно это достоинство придает водороду особую стратегическую значимость с точки зрения возможностей снижения зависимости стран-импортеров органических топлив (США, Японии, стран ЕС, а в последнее время и Китая) от внешних поставок углеводородов, в первую очередь нефти, используемой для обеспечения топливом транспорта.

Применительно к ископаемым топливам речь идет о процессе конверсии различных углеводородов, чаще всего метана и попутного нефтяного газа, угля (как наиболее распространенного в природе) и биомассы, относящейся к категории возобновляемых источников энергии. Помимо этого, источником водорода могут служить преобразованные виды синтетического жидкого углеводородного топлива: метанол, этанол, диметил-эфир, бензин и другие, а также некоторые распространенные в природе соединения, например сероводород  $H_2S$ .

На сегодняшний день именно риформинг углеводородов получил в мире промышленное распространение. На его долю приходится 96%<sup>\*\*</sup> мирового произ-

водства водорода, (50 млн т), из которых 48 производится риформингом метана, 30 — нефти, 18 — угля [2].

Поскольку доминирующей промышленной технологией является риформинг метана, то следует рассмотреть технико-экономические показатели этого процесса. Сначала нужно учесть, что для получения 1 кг водорода необходимо 159 МДж метана. Тогда вклад топливной составляющей в стоимость производства 1 кг водорода (при цене метана 3,5 дол/ГДж<sup>\*\*\*</sup> [3]) равен 0,56 дол/кг. Что касается КПД парового риформинга метана, то со ссылкой на источник [4], в котором дан квалифицированный анализ имеющейся по этому вопросу информации, можно говорить об усредненном значении КПД, равном 76%.

С учетом полных капитальных и эксплуатационных затрат себестоимость производства водорода может варьироваться от 1 до 4,5 дол/кг на крупных промышленных заводах и малых децентрализованных установках. Однако водород, полученный на крупных заводах, должен быть доставлен и распределен среди потребителей, для чего требуются дополнительные энергетические и капитальные затраты. С учетом этого стоимость водорода для потребителя становится равной тем же 4,5 дол/кг, что эквивалентно цене бензина около 1 дол/л, тогда как по данным [3] летом 2002 г. она не превышала 0,2 дол/л.

Альтернативный способ производства водорода основан на традиционном электролизе воды (4% мирового производства) с потреблением электроэнергии, получаемой различными способами (в том числе при использовании ядерного топлива и возобновляемых источников энергии). Однако электролиз воды — это высокоэнергозатратный процесс с КПД не более 70% даже в самых совершенных устройствах. Поэтому на выработку 1 кг водорода необходимо затратить  $57 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$  ( $5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$ , здесь и далее при нормальных условиях)<sup>3</sup> или 204 МДж электроэнергии [5], что с учетом КПД генерирования последней около 33% приводит к потребности в первичной тепловой энергии в объеме 612 МДж на 1 кг электролизного водорода. При этом потери, связанные с передачей электроэнергии, не учитываются. Таким образом, приходится сделать вывод о том, что термический КПД получения электролизного некомпримированного водорода не превышает 23%, т.е. неполный цикл первичное топливо — электроэнергия — электролизный водород сопровождается потерями 77% первичной тепловой энергии.

<sup>\*\*\*</sup> В 2004 г. цена природного газа в США была 5,5 дол/ГДж на устье скважины и 7 дол/ГДж для потребителя [5].

<sup>3</sup> В мире наилучшими признаются электролизеры канадской фирмы Stuart Energy, потребляющие для получения водорода менее  $5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$ .

<sup>\*\*</sup> В 1980 г. при объеме производства водорода 40 млн т прогнозы на 2000 г. превышали 100 млн т [1].

В итоге электролитический водород, несмотря на свою доступность, является дорогим продуктом, в настоящее время его цена в зависимости от тарифа на электроэнергию и объема производства варьируется от 10 до 35 дол/кг (от 1 до 3 дол/м<sup>3</sup>) [3, 6].

### Универсальность применения

Данное достоинство определяется возможностью использования водорода практически во всех секторах экономики, в централизованной и децентрализованной электроэнергетике, коммунальной теплоэнергетике, на транспорте в качестве моторного топлива, наконец, для питания многочисленных бытовых электронных приборов, а также различных видов современного военного снаряжения.

С этим трудно не согласиться, поскольку водород могут потреблять как существующие двигатели внутреннего сгорания, паровые и газовые машины, так и инновационные двигатели и, что особенно важно, энергетические установки на основе ТЭ, преобразующие непосредственно химическую энергию топлива в электрическую. Именно ТЭ отводится центральное место в водородной энергетике, поэтому этот вопрос будет обсуждаться далее.

Безусловно согласившись с универсальностью применения водорода, нельзя не отметить, что данное достоинство присуще не только водороду, но и другим жидким и газообразным углеводородам. Несмотря на то что не все углеводороды, как природные так и синтетические, применимы в качестве прямого топлива для ТЭ, все они без исключения могут быть риформированы в водород на месте потребления, непосредственно перед подачей в ТЭ. Более того, наблюдается очевидная тенденция создания ТЭ с прямым использованием синтетических жидких топлив, в первую очередь метанола.

### Высокая эффективность преобразования в электрическую энергию

Этот аргумент основан на распространенном представлении о том, что процесс производства электроэнергии на базе ТЭ, как не связанный с ограничением Карно, характеризуется высокими значениями КПД, который может достигнуть даже 85...90 % [2]. К сожалению, данное утверждение представляется спорным и требует внесения большей ясности.

Следует учитывать, что когда говорится о значении КПД ТЭ около 90 %, то, по-видимому, подразумевается теоретический КПД некоего идеального процесса. Причем как правило, имеется в виду использование  $Q_H$  водорода и подразумевается утилизация вторичной теплоты для выработки тепловой энергии. Тогда с такими значениями при определенных оговорках можно согласиться. Более того, КПД когенерационного парогазового процесса на природном газе может достигнуть такого же значения. Сопоставимые КПД имеют даже существующие теплофикационные установки, созданные на базе газопоршневых двигателей.

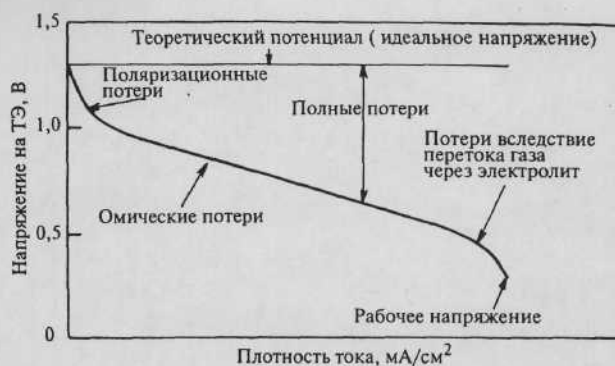


Рис. 2. Зависимость напряжения идеального и действительного ТЭ от плотности тока

Если же рассматривать ТЭ как только электрохимическое устройство, то анализ термодинамических процессов преобразования химической энергии водорода в электроэнергию обнаруживает следующее. Теоретический КПД идеального конвертера следует определять как отношение изменения свободной энергии Гиббса  $\Delta G^0$  к изменению энтальпии  $\Delta H^0$  реакции водород — кислород, т.е.  $\eta = \Delta G^0 / \Delta H^0 = 237,1 / 285,8 = 0,83$  в расчете на  $Q_H$  водорода при стандартных условиях [7, 8]. Обратимый электрический потенциал идеального ТЭ при стандартных условиях соответствует свободной энергии Гиббса и рассчитывается как  $V_{ид}^0 = \Delta G_{ид}^0 / nF = 1,29$  В (где  $F$  — константа Фарадея;  $n = 2$  — число электронов в реакции). По аналогии КПД действительного ТЭ находится как  $\eta_d = \Delta G_d / \Delta H^0 = 0,83 V_d / 1,29 = 0,643 V_d$ . Таким образом, КПД ТЭ определяется значением действительного напряжения на клеммах, которое при замыкании внешней цепи и протекании тока заметно снижается в результате так называемых поляризационных потерь, уменьшающих напряжение по сравнению с равновесным потенциалом; омических потерь на электролите и электродах; появления побочных реакций и потерь, обусловленных прохождением части топлива через электролит (рис. 2) [8].

Среди дополнительных факторов, снижающих КПД ТЭ, надо еще отметить неполноту окисления топлива, затраты энергии на собственные нужды, в частности на компримирование воздуха (по оценкам, они могут составить до 15 % генерируемой энергии), а также потери в инверторе, преобразующем постоянный ток в переменный. В результате влияния всех рассмотренных факторов значение напряжения ТЭ снижается и на практике варьируется в пределах 0,6...0,7 В. Поэтому электрический КПД реального водородного ТЭ должен быть равен 40...50 %, а с учетом затрат энергии на собственные нужды и потерь в инверторе (5 %) и того ниже — 32...40 %.

Полезно сопоставить, как теоретические оценки КПД согласуются с реальными значениями КПД существующих образцов ТЭ. Надо отметить, что немногие разработчики и производители ТЭ предоставляют

ясную информацию о значениях фактических КПД созданных агрегатов. Интересные данные приводятся Министерством обороны США, которое провело испытания 30 образцов ТЭ фосфорно-кислотного типа и 76 образцов ТЭ с полимерной мембраной, показавшие, что в среднем электрический КПД первых составляет 31,6, а вторых — 23,4 %. По данным компании Fuel Cell Corporation, ее жидкокарбонатный ТЭ мощностью 200 кВт достиг КПД, равного 40 % по  $Q_n$  [8], что в пересчете на  $Q_v$  соответствует 33,8 %; КПД демонстрационных образцов трубчатых твердооксидных ТЭ (производства компании «Сименс Вестингауз») мощностью 100 и 200 кВт составляет 46 % по  $Q_n$  (при пересчете по  $Q_v$  — 38,9 %). Компания Fuel Cell Energy приводит два несколько отличающихся значения КПД (29 и 31 %) для своих последних пластинчатых ТЭ мощностью 2 кВт с твердым электролитом [9].

Таким образом, обоснованно можно говорить о среднем электрическом КПД ТЭ, равном примерно 40 %, в каком бы противоречии не находилось это с утверждениями автора [2]. Поэтому с учетом затрат на производство и доставку топлива водородный цикл на ТЭ в отношении энергоэффективности представляется неконкурентоспособным по сравнению как с транспортными дизельными и гибридными двигателями, так и с передовыми парогазовыми циклами энергетического назначения, особенно при комбинированной выработке тепловой и электрической энергии.

Далее необходимо рассмотреть вопрос о стоимости ТЭ. Основная имеющаяся информация относится к фосфорно-кислотным элементам. В 1990 г. цена такой установки мощностью 200 кВт составляла 600 тыс. дол. В настоящее время, несмотря на субсидии, она возросла еще на 50 %. Стоимость жидкокарбонатного ТЭ мощностью 250 кВт (Германия) оценивается в 2,5 млн евро. Есть данные также о затратах на сооружение некоторых демонстрационных образцов. Например, для сооружения твердооксидного ТЭ (мощностью 250 кВт) в Ганновере потребовалось 6,2, а для ТЭ такой же мощности с протонообменной мембраной (Берлин) — 3,5 млн евро. Заявленная стоимость автомобиля «мерседес-бенц» с ТЭ доходит до 1,4 млн дол. [9], хотя очевидно, что эта сумма кроме цены ТЭ включает в себя и стоимость собственно автомобиля, которая, тем не менее, вряд ли превышает 0,4 млн дол. Несомненно, что приведенные стоимостные показатели носят демонстрационный характер, и они неизбежно будут снижаться по мере налаживания массового выпуска ТЭ. Однако вопрос, когда ТЭ могут стать конкурентоспособными с существующими энергетическими установками и транспортными двигателями, не находит оптимистического ответа.

### Высокая технологичность потребления

Возможность аккумулирования и хранения в различных формах и состояниях, транспортирования и распределения через сетевую систему, и, наконец, доставки потребителю в нужный момент и требуемое

место — это важнейшее достоинство водорода, практически отсутствующее у электроэнергии. Поэтому водород можно рассматривать в качестве потенциально перспективного энергоаккумулирующего вещества, которое может выполнять роль аккумуляторной батареи. При этом возникает естественный вопрос, как реализовать данное достоинство водорода, т.е. как технически обеспечить его аккумулирование и хранение в компактных, экономичных и безопасных емкостях, либо физически или химически связанных формах. Далее рассматриваются принципиальные технические решения этой проблемы.

Наиболее освоенным в настоящее время является хранение сжатого под высоким давлением газообразного водорода в водородонепроницаемых баллонах. Трудность состоит в том, что необходимы прочные емкости, выдерживающие сотни атмосфер и не проницаемые для молекул водорода. По-видимому, таким требованиям в значительной степени удовлетворяет продукция фирм: Quantum, Dynatek, и Nissan<sup>4</sup>, поставляющих на рынок композитные баллоны (трехслойные углеродно-волоконные, футерованные изнутри алюминированным полиэфиром), выдерживающие давление до 70 МПа. Зависимость теоретических характеристик (объемной и массовой плотности водорода) таких, а также традиционных стальных баллонов от давления в сосуде (указаны цифрами на каждой кривой) представлены на рис. 3 [10]. При его анализе выявляется важное обстоятельство: с увеличением давления снижается массовое содержание водорода, а при достижении определенного значения (80 и 500 МПа для стального и композитного баллонов) начинает уменьшаться и объемная плотность водорода.

К сожалению, производители не приводят конкретных достигнутых на сегодняшний день значений объемной массовой плотности в таких баллонах.

По косвенной информации, по-видимому, можно утверждать, что стоит задача создать баллон на давление 70 МПа, массой 110 кг с объемной плотностью аккумулирования водорода 30 кг/м<sup>3</sup> при его массовой плотности около 6 %, что соответствует удельному объемному энергосодержанию 4,3 МДж/л, т.е. в 8 раз меньше, чем у бензинового бака. Тогда одного заряженного баллона, занимающего 0,22 м<sup>3</sup> пространства, должно хватать всего на 200 км пробега легкового автомобиля. При этом особого внимания заслуживает вопрос предотвращения утечек водорода, компримированного до 70 МПа, и обеспечения безопасности такого сосуда в целом, особенно если он размещен на борту транспортного средства. Разработчики утверждают, что эти баллоны достаточно безопасны и могут оставаться целыми даже в случае таких аварий, при которых расплющивается металлический корпус автомобиля и разрушается обычный бензиновый бак.

По данным [3, 10] стоимость хранения 1 кг водорода при 70 МПа составляет более 2 000 дол. Тогда стои-

<sup>4</sup><http://www.msn.com/>

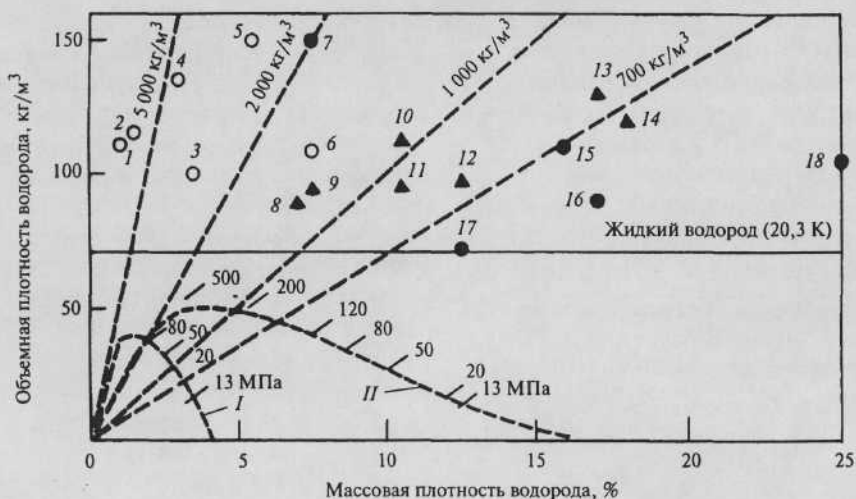


Рис. 3. Объемная и массовая плотность аккумуляции водорода в различных системах.

*I* — компримированный водород в стальном баллоне; *II* — в композитном баллоне; 1 — FeTiH (300K; 0,15МПа); 2 — LaNi<sub>5</sub>H<sub>6</sub> (300K; 0,2МПа); 3 — Mg<sub>2</sub>NiH<sub>4</sub> (550K; 0,4МПа); 4 — BaReH<sub>9</sub> (ниже 373K; 0,1МПа); 5 — Mg<sub>2</sub>FeH<sub>6</sub> (620K; 0,1МПа); 6 — MgH<sub>2</sub> (620K; 0,5МПа); 7 — CH<sub>0,95</sub>; 8 — KBH<sub>4</sub> ( $T_p = 580K$ ); 9 — NaAlH<sub>4</sub> ( $T_p = 520K$ ); 10 — NaBH<sub>4</sub> ( $T_p = 680K$ ); 11 — LiAlH<sub>4</sub> ( $T_p = 400K$ ); 12 — LiH ( $T_p = 650K$ ); 13 — Al(BH<sub>4</sub>)<sub>3</sub> ( $T_p = 373K$ ); 14 — LiBH<sub>4</sub> ( $T_p = 553K$ ); 15 — C<sub>8</sub>H<sub>18</sub> (жидкость); 16 — C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (жидкость,  $T_k = 273K$ ); 17 — CH<sub>3</sub>OH<sub>3</sub> (жидкость); 18 — CH<sub>4</sub> (жидкость,  $T_k = 112K$ );  $T_p$  — температура разложения;  $T_k$  — температура кипения

мость баллона, содержащего 6 кг водорода, будет равна 12 000 дол. (практически цена массового автомобиля).

Необходимо учитывать и энергетические затраты на компримирование водорода, которые в настоящее время даже для самого современного многостадийного цикла равны примерно 5 кВт·ч на 1 кг сжатого до 70 МПа водорода, что в пересчете на первичную энергию при КПД генерирования электроэнергии, равного 33 %, составляет как минимум 50 МДж/кг, т.е. 35 %  $Q_v$  водорода.

Кроме сосудов под давлением газообразный водород может храниться в гидридах некоторых металлов и сплавов, которые обладают свойством абсорбировать водород в заметных количествах и освобождать его при нагреве. Наиболее перспективным является гидрид магния MgH<sub>2</sub> (плотность 1 800 кг/м<sup>3</sup>), имеющий достаточно высокие среди гидридных систем массовую (7 %) и объемную (100 кг/м<sup>3</sup>) плотности (рис. 3). Это означает, что масса гидридного устройства для аккумуляции 20 кг водорода составляет 285 кг, а вместимость почти 200 л.

На рис. 3 значения показателей металлогидридного аккумуляции водорода располагаются в верхней левой части. Это свидетельствует о том, что гидриды металлов не являются перспективными для аккумуляции водорода. Однако за последние 6 лет было установлено, что водородоаккумулирующими материалами с лучшими значениями объемной и массовой плотности являются комплексные гидриды: тетрабораты  $M(BH_4)$  и тетрагидроалюминаты  $M(AlH_4)$  (табл. 1, рис. 3). Комплексным гидридом с наибольшей массовой плотностью водорода является LiBH<sub>4</sub> (18 %), кото-

рый десорбирует три из четырех имеющихся в соединении атомов водорода, разлагаясь при этом на гидрид лития LiH и B. Процесс адсорбции водорода — реверсивный и протекает в течение нескольких часов при давлениях от нескольких до десятков мегапаскалей. Процессу адсорбции благоприятствуют высокое давление и низкая температура, для десорбции аккумуляированного водорода нужно низкое давление (из-за эндотермического характера процесса). Количество энергии, необходимой на зарядку гидрида водородом и его высвобождение, зависит от типа гидрида и параметров загрузки. Если ориентироваться на компримирование до 5 МПа, то можно принять, что необходимо 5 МДж электроэнергии или 15 МДж первичной энергии для адсорбции 1 кг водорода. Для процесса высвобождения применительно к MgH<sub>2</sub> требуется израсходовать энергии примерно 35 МДж на 1 кг водорода, т.е. общие затраты составляют около 50 МДж/кг, или 35 %  $Q_v$ .

В целом, несмотря на очевидные достоинства гидридов, в первую очередь комплексных соединений, перспективы их использования в качестве компактного аккумулятора водорода все еще проблематичны. Решение этой задачи зависит от ожидаемых успехов в создании дешевых составов, которые будут при умеренном давлении быстро запасать существенное количество водорода с высокой плотностью энергии, легко и быстро освобождать его и быть при этом полностью реверсивными.

Хранение жидкого водорода по сравнению с газообразным требует хранилищ значительно меньших объемов (плотность 71 кг/м<sup>3</sup>), однако для этого необходимы специальные криогенные контейнеры. Кроме того, процесс сжижения водорода является весьма энер-

Таблица 1. Показатели различных систем для аккумулирования и хранения водорода

Среда	Содержание водорода, кг/кг	Объемная плотность водорода, кг/м <sup>3</sup>	Массовая плотность энергосодержания кДж/кг	Объемная плотность энергосодержания, кДж/л
MgH <sub>2</sub>	0,070	100	9,93	14,33
Mg <sub>2</sub> NiH <sub>4</sub>	0,032	80	4,48	11,49
FeTiH <sub>1,95</sub>	0,018	100	2,48	13,62
LaNi <sub>5</sub> H <sub>7,0</sub>	0,014	90	1,94	12,63
Комплексные соединения (AlH <sub>4</sub> , BH <sub>4</sub> )	Менее 0,18	Менее 150	Менее 25,56	Менее 21,3
Композитный баллон, 70 МПаа	0,06	30	8,52	4,3
перспективная разработка	0,13	35	19,3	5,1
Жидкий водород, бак вместимостью 230 л	0,13	71	19,3	10
Жидкое топливо:				
бензин	0,16	110	40	34
метанол	0,12	100	13,6	17

гоемким: даже в наиболее совершенных установках требуется не менее 35 МДж электроэнергии на 1 кг (или около 100 МДж первичной энергии, что составляет 70 %  $Q_0$  водорода<sup>5</sup>). Следует учитывать и потери криогенного водорода в результате его испарения, которые могут составлять 1...2 %/сут для небольших хранилищ, предназначенных, например, для бортового размещения. Это обстоятельство особенно важно, когда режим потребления водорода сопровождается длительными простоями (например, при парковках автомобиля) [7].

Существует также возможность адсорбирования водорода углеродными наноструктурами. В этом случае количество адсорбированного водорода пропорционально площади поверхности наноструктурного углерода (максимальное значение 1 315 м<sup>2</sup>/г нановещества). Удельная абсорбирующая способность углерода (по массе) при температуре 77 К составляет  $1,5 \times 10^{-3}$  г/м<sup>2</sup>, что приводит к 2 %-ной массовой плотности водорода. Однако по некоторым теоретическим оценкам, можно надеяться, что в принципе возможно достижение и более высоких значений массовой плотности, например 7 % для CН<sub>0,95</sub> (рис. 3). В настоящее время нет каких-либо экспериментальных доказательств того, что значения массовой плотности водорода в углеродных наноструктурах и в жидком водороде могут стать сопоставимыми.

В табл. 1 и на рис. 3 приведены сравнительные показатели различных способов хранения и транспортирования водорода. Видно, что высокими характеристиками по аккумулированию обладают комплексные гидриды, однако необходимо дополнительное подтверждение с учетом реверсивности, степени высвобождения водорода, срока службы гидридной системы и прочих

факторов. Кроме того, промышленное применение гидридов далеко от воплощения, поэтому показатели промышленных образцов нуждаются в уточнении. Как уже отмечалось, относительно высокие показатели имеет и сжиженный водород, однако по удельному объемному энергосодержанию он все еще значительно уступает жидким углеводородам, в первую очередь бензину, и даже метанолу, этанолу и диметил-эфиру (см. рис. 1 и 3). Массовая плотность сильно зависит от объема криогенной емкости (точнее от отношения объема емкости к площади ее поверхности), поэтому она резко снижается для небольших сосудов, которые могли бы быть установлены на транспортных средствах. Затраты энергии, необходимой на получение, транспортирование, хранение и распределение жидких углеводородов, по сравнению с аналогичными затратами для водорода несоизмеримо меньше. Из этого следует сделать важный вывод о том, что применение жидких углеводородов в качестве энергоаккумулирующих веществ предпочтительнее, чем водорода, особенно на транспорте. Кроме того, применение водородонесущих соединений (жидких при атмосферном давлении) значительно упрощает системы транспортирования и хранения топлива, нашло повсеместное распространение и опирается на широко развитую инфраструктуру. Последнее представляется особенно важным, если принять во внимание, что жидкие углеводороды, а также газообразные (метан, аммиак и другие) могут трансформироваться в водород непосредственно на месте его потребления, например на борту транспортного средства или же на площадке электростанции. Более того, некоторые жидкие углеводороды можно непосредственно использовать для питания ТЭ (например, ТЭ с прямым использованием метанола).

### Экологическая чистота использования водорода

Водород считается экологически чистым топливом, так как при его сжигании не образуются парниковые газы и другие вредные для окружающей среды веществ-

<sup>5</sup>Сжигающие установки весьма капиталоемки (удельные затраты составляют около 1 000 дол. · кг водорода/день) [3].

**Таблица 2. Основные технические и экономические барьеры на пути коммерциализации ТЭ**

Применение	Проблема	Сложность устарения
Транспорт	Высокая стоимость	Крайне высокая
	Короткий срок службы	Высокая
	Нерешенность проблемы хранения водорода	Высокая
Стационарная энергетика	Отсутствие топливной инфраструктуры	Высокая
	Высокая стоимость	Высокая
	Короткий срок службы	Выше средней
Портативные системы	Отсутствие топливной инфраструктуры	Низкая
	Нерешенность проблемы хранения водорода	Средняя
	Высокая стоимость	Средняя
	Короткий срок службы	Средняя
	Необходимость миниатюризации	Невысокая
Создание компактных водородных емкостей	Средняя	
Отвод выделяющегося тепла	Средняя	

ва и соединения и даже не нарушается круговорот воды в природе. Все это действительно так, однако при этом ничего не говорится о предыстории получения водорода и связанных с этим выбросах в атмосферу. Поэтому данное утверждение представляется обоснованным, если источником водорода служит первичный источник энергии, не вызывающий загрязнения атмосферы, например, солнечная или атомная энергия. Наоборот, если водород получается конверсией углеводородного топлива, то тогда общие выбросы в атмосферу возрастают пропорционально потерям риформинга, оцениваемым в 30...35 %, не говоря уже об энергетических потерях, обусловленных транспортированием, распределением и хранением. Поэтому можно говорить лишь об отсутствии загрязнения окружающей среды только на месте использования водорода.

### Проблемы, препятствующие становлению водородной энергетики

Как следует из сказанного, при всех потенциальных достоинствах и выгодах водородной энергетики для ее становления необходимо преодолеть существенные технологические и экономические сложности. Среди них наиболее существенными являются следующие.

В настоящее время водородное топливо в 4—5 раз дороже бензина. Топливные элементы не достигли еще необходимой технической зрелости, их КПД составляет около 40 %, они имеют небольшой технический ресурс эксплуатации, а главное — существенно дороже конкурирующих технологий транспортного и энергетического назначения. При этом коммерциализация ТЭ предполагает разрешение различных проблем (табл. 2).

Энергетический КПД полного водородного цикла невысок, характеризуется существенными потерями энергии на стадиях производства, транспортирования в компримированном либо сжиженном состоянии, распределения и, наконец, использования. Если ориентироваться на органическое топливо, то на сегодняшний день обоснованно принять КПД процесса конверсии углеводорода в водород равным 65...76 % в зависимости от типа риформера и исходного сырья. В частности, при риформинге метана КПД цикла метан — риформер — водород — доставка — ТЭ — электроэнергия не должен превышать  $0,76 \cdot 0,65 \cdot 0,4 \cdot 100 \% = 18 \%$ , что существенно меньше, чем КПД парогазового цикла на природном газе (50...55 %) и современной угольной электростанции с паротурбинным циклом (40...42 %), а также КПД современного бензинового двигателя внутреннего сгорания (30...35 % на валу двигателя<sup>6</sup>), не говоря уже о КПД дизельных, тем более, гибридных, двигателей. Еще менее эффективным представляется реализация водородного цикла на основе электролиза воды.

Традиционные системы хранения водорода в газобразном и сжиженном состояниях весьма дороги, энергетически неэффективны, имеют большую массу и объем и поэтому малоприспособлены для размещения на борту транспортного средства. Определенные перспективы создания компактных водородоаккумулирующих систем связываются с комплексными гидридами, работа над которыми, однако, находится на стадии НИОКР и требует больших усилий для достижения необходимой технической зрелости и экономической конкурентоспособности.

Реализация водородного цикла на основе органических топлив не предоставляет ощутимых экологических выгод вследствие низких КПД, а наоборот, приводит к существенно большим выбросам загрязняющих веществ, в первую очередь диоксида углерода.

Существуют большие риски инвестирования в создание необходимой водородной инфраструктуры при существующем уровне технологического развития элементов водородного цикла и при неопределенности спроса на водородное топливо.

Необходимо учитывать повышенную опасность водородного цикла, особенно при отсутствии необходимых требований, норм и стандартов обеспечения соответствующей безопасности.

### Выводы

1. Водородная энергетика в силу своих потенциальных достоинств претендует на право существенного изменения картины будущего мирового энергопотребления, поскольку она может заметно расширить ресурсную базу энергетики, повысить энергетическую безопасность благодаря снижению зависимости от импор-

<sup>6</sup>Полный КПД автомобиля с бензиновым двигателем оценивается в 15...25 %.

тируемой энергии, а также способствовать снижению загрязнения окружающей среды.

2. В целом речь идет о переходе к водородоориентированной экономике (получившей название «водородная экономика»), предполагающей реализацию всех выгод от внедрения водородной энергетики, основанной на широкой и диверсифицированной базе ископаемых топлив, ядерной энергии и энергии возобновляемых источников, в сочетании с повсеместным использованием водорода практически во всех секторах экономики. Все это предполагает создание соответствующей инфраструктуры и подкрепление адекватными институциональными отношениями.

3. Несмотря на большие усилия и объемы финансирования НИОКР в западных странах по всем звеньям водородного цикла (производство, транспортирование, хранение, распределение и потребление), нельзя говорить о заметных успехах в данной области. По-видимому, необходимо еще не одно десятилетие для ее окончательного становления, поскольку существует еще много технических вопросов, которые необходимо решить с учетом требований по обеспечению приемлемых энергетической эффективности, экономической конкурентоспособности и экологического совершенства.

4. Наиболее тщательный анализ нужен для обоснования достижимых уровней энергетической эффективности (КПД) различных звеньев и вариантов водородного цикла с учетом всех накладываемых фундаментальных ограничений на их осуществление.

5. Проведенное обсуждение свидетельствует о том, что, с точки зрения энергетической эффективности, водородный цикл, основанный на риформинге первичного органического топлива, не является всеобъемлющим решением проблем энергетики, быть может, за исключением небольших областей применения (например, питание портативных электронных устройств или военного снаряжения различного назначения).

6. Водородный цикл, основанный на использовании первичной электроэнергии (высокотемпературный ядерный реактор, фотоэлектричество, ветроагрегаты), требует в первую очередь обеспечения развития самих этих источников, что проблематично в условиях современной отечественной экономики. Только после этого можно рассмотреть их применение к водородному циклу. Однако, к сожалению, даже работы в области создания высокотемпературных реакторов не получили должного развития, а их использование в водородной энергетике сводится к теоретическим выкладкам.

7. Помимо энергетической неэффективности существенным препятствием для становления водородной энергетики является высокая стоимость производства (даже на базе относительно дешевого газа) и поставки водорода потребителю, которая в настоящее время в 4—5 раз превышает стоимость соответствующего бензинового эквивалента.

8. Представляется, что большие перспективы могут открыться при реализации топливного цикла, основанного на применении различных видов синтетического

жидкого топлива (метанола, этанола, бензина, диметил-эфира), получаемых не только из ископаемого топлива, но и на базе возобновляемой биомассы и напрямую используемых в специальных топливных элементах, примером которых является активно проникающий на рынок ТЭ с прямым использованием метанола.

9. Одной из причин активной пропаганды «водородной революции», которая как бы в состоянии обеспечить человечество неиссякаемой, бесконфликтной и чистой энергией, является стремление развитых стран-импортеров энергии (в первую очередь США и государств ЕС) создать иллюзию возможности замены иссякающей нефти неисчерпаемым водородом. Отсюда делается вывод о том, что сохранение нефтяных запасов странами, богатыми углеводородными ресурсами и активно ими торгующими (Россия, страны ОПЕК), на длительный период времени бессмысленно и чревато для них серьезными экономическими трудностями, если нефть, потеряв потребительскую стоимость, останется невостребованной. Кроме того, это может быть новой попыткой втянуть Россию с ее крайне скудными ресурсами, выделяемыми на НИОКР, в технологическую гонку типа проигранной гонки вооружений.

10. Современное состояние экономики России не позволяет расходовать средства на достижение ложной цели, поскольку это пойдет в ущерб развитию других отечественных инноваций, в которых страна остро нуждается. До провозглашения водородной энергетики стратегическим направлением российские ученые должны в обязательном порядке предоставить правительству и обществу обоснованные доказательства перспективности этого направления в целом, применимости для российских условий, а также четко и прозрачно обосновать целесообразность вложения бюджетных средств в «водородные» НИОКР с точки зрения затрат и получаемой выгоды.

#### Список литературы

1. Шпильрайн Э.Э., Малышенко С.П., Кулешов Г.Г. Введение в водородную энергетику. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Amory B. Lovins. Twenty Hydrogen Myths, 20 June 2003. [www.rmi.org](http://www.rmi.org)
3. Simbeck D., Chang E. Hydrogen supply: Cost Estimate for Hydrogen Pathways-Scoping Analysis. January-July 2002. National Renewable Energy Laboratory. <http://www.nrel.gov>
4. Makihira A., Barreto L., Riahi K. Assessment of Alternative Hydrogen Pathways: Natural Gas and Biomass, Interim Report IR-03-037 International Institute for Applied Systems Analysis, 2003. [www.iiasa.ac.at](http://www.iiasa.ac.at)
5. F. David Doty, Fuels for Tomorrow's Vehicles Nov. 29, 2004 Doty. Scientific, Inc., Columbia, SC. [www.dotynmr.com](http://www.dotynmr.com)
6. Pamela L., Spath M., Mann K. Life Cycle Assessment of Hydrogen Production via Natural Gas Steam Reforming, Revised February 2001. NREL/TP-570-27637, National Renewable Energy Laboratory. <http://www.dlnet.vt.edu>
7. Bossel U. The Physics of the Hydrogen Economy. The European Fuel Cell News. Vol. 10. № 2. July, 2003. <http://www.efcf.com/reports>
8. Fuel cell: A Handbook — 6th edition handbook, By EG&G Services Parsons, Inc. Science Applications International Corporation U.S. Department of Energy, Business Technology Books, 2003.
9. Biegler T. Fuel Cells — A Perspective // ATSE Focus. 2005. № 135. Jan/Feb. <http://www.atse.org.au>
10. Zuttel A. Materials for hydrogen storage. Materials today, September 2003. <http://www.fuelcelltoday.com>