

Состояние и перспективы развития водородной энергетики

Т.В. Полякова

Термин «водородная энергетика» (ВЭ) приобрела огромную популярность в мире науки, экономики и политики в последние десять лет в связи с проблемой истощения невозобновляемых источников энергетических ресурсов – углеводородов. Анализ многочисленных публикаций на эту тему, однако, показывает, что под этим термином часто понимается ряд различных программ. Мы постараемся разделить эти программы, выявить главную движущую идею каждой из программ и критически оценить их состояние в данный момент, а также рассмотреть некоторые технологические достижения, которые могут оказать существенное влияние на дальнейшее развитие ВЭ.

Термин «водородная энергетика» (ВЭ) в последние десять лет приобрел огромную популярность в мире науки, экономики и политики в связи с проблемой истощения невозобновляемых источников энергии – углеводородов. Анализ многочисленных публикаций на эту тему показывает, однако, что под этим термином часто понимается ряд различных программ. В работе сделана попытка эти программы разделить, выделить главные движущие идеи каждой из них и критически оценить состояние в настоящий момент. Рассмотрены некоторые технологические достижения, которые могут оказать существенное влияние на дальнейшее развитие ВЭ, а также программы развития водородных технологий ведущих стран мира и крупнейших компаний.

Иногда в популярной литературе ВЭ противопоставляется «углеводородной» энергетике. Сразу необходимо отметить, что *сфера водородной энергетике* – «downstream», то есть транспортировка, переработка и использование энергии, но не «upstream» (добыча первичного энергосырья). ВЭ лишь дополняет нефтяную, атомную или «возобновляемую» энергетiku, но сама по себе не является новым источником

энергии. Другими словами, водородная энергетика – это способ наиболее эффективного применения имеющихся источников энергии, повышения КПД их использования или получения иных преимуществ.

В свободном виде водород на Земле практически не существует, поэтому его надо производить. Из закона сохранения энергии следует, что потери на цикл «производство водорода – использование водорода» неизбежны. Поэтому одной из задач настоящей данной статьи является выяснение, где эти потери оправданы. Остановимся на наиболее перспективных и широкомасштабных приложениях водородных технологий. Концепция экологически чистой водородной энергетике, часто называемая «водородной экономикой», включает:

- производство водорода из воды с использованием невозобновляемых источников энергии (углеводороды, атомная энергетика, термоядерная энергетика);
- производство водорода с использованием возобновляемых источников энергии (солнце, ветер, энергия морских приливов, биомасса);
- надежная транспортировка и хранение водорода;

Полякова Татьяна Викторовна – с.н.с. Центра глобальных проблем ИМИ МГИМО(У) МИД России.
E-mail: vestnik@mgimo.ru

– широкое использование водорода в промышленности, на транспорте (наземном, воздушном, водном и подводном), в быту;

– обеспечение надежности материалов и безопасности водородных энергетических систем.

Производство, хранение, транспортировка водорода. Продолжающееся непрерывное повышение цен на энергоносители и бензин сделало привлекательными самые фантастические возможности замены наиболее распространенного силового агрегата современного автомобиля – двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с баком бензина. Ситуация напоминает начало XX в., когда какие только устройства ни ездили, летали и плавали, но победили тогда двигатели внутреннего сгорания. Предрекают, что их век заканчивается... А что на смену? Даже обзор готовых образцов займет несколько страниц: гибридные, электрические, двигатели Стрилинга, новые типы дизельных двигателей, газотурбинные – это только те, что уже стоят на серийных автомобилях. На смену баку бензина приходят быстро заряжаемые аккумуляторы различных типов и топливные элементы.

Идет поиск наиболее энергоэффективных силовых установок, причем соревнуются не столько сами двигатели и схема транспортного средства, сколько вся транспортная инфраструктура, от источника энергии до заправки и до конечного потребителя. Массовый переход на электромобили потребует сети электрических заправок. Точно так же переход на водородные двигатели или топливные элементы потребует сети водородных заправок, трубопроводного или грузового транспорта для доставки водорода или другого носителя энергии от завода-производителя к этим заправкам и достаточного количества заводов по производству водорода, которые должны заменить НПЗ.

До 70% углеводородов расходуется на транспорте. КПД бензиновых двигателей составляет 15–17%, дизельных – 25%. КПД низкотемпературных водородных элементов не превышает 40–50%, а высокотемпературные оксидные водородные элементы в сочетании с турбинами на выхлопном газе могут иметь КПД до 90%. Казалось бы – прямой выигрыш в энергии. Но, прежде чем вкладывать триллионы долларов, необходимо разобраться, что такое «водородный автомобиль» и каким образом получается выигрыш в использовании исходной энергии. Для этого необходимо рассмотреть весь производственный цикл, от источника энергии и производства водорода до конечного потребителя.

Производство водорода. Водород – не источник энергии, это средство преобразования других источников энергии в химическую энергию в форме запасенного чистого водорода, которую можно использовать впоследствии при его окислении. По сути, резервуар или другой накопитель водорода в техническом смысле подобен аккумуляторной батарее или бензо-

баку, и поэтому сравнивать нужно не только КПД, но и другие параметры. Водород нужно произвести и преобразовать для получения конечной энергии, и то и другое требует энергии. Из ископаемого топлива, главным образом из нефти, в настоящее время в мире получают 96% конечной энергии, причем углерод по-прежнему переводится в CO₂, так что это не решает проблему выбросов¹.

В Соединенных Штатах 90% чистого водорода получается из природного газа, с КПД использования 72%². Это означает, что 28% энергии, содержащейся в природном газе – метане, теряется, не считая энергии, которая расходуется на добычу и транспортировку природного газа до завода, производящего водород. Только 4% водорода получают из воды посредством электролиза. Себестоимость производства водорода из воды (различные виды электролиза) в 3–6 раз выше, чем получение водорода из природного газа. Этот метод используют лишь тогда, когда необходимо получить особо чистый водород.

И так как большая часть электричества для электролиза производится с использованием ископаемого топлива с эффективностью 30% и КПД электролиза составляет 70%, то это означает, что затрачивается четыре единицы энергии для создания одной единицы водородной энергии. В результате мы получаем, что эффективность использования водородной энергии составляет приблизительно 20%³. По-видимому, цель получения дополнительного эффекта от применения водородных технологий должна состоять в том, чтобы использовать возобновляемую энергию и с ее помощью получать водород из воды посредством электролиза.

Эффективность ветровой турбины может составлять 30–40%, достигая КПД производства водорода 25% в полном цикле. Другими словами, надо затратить 3 единицы энергии ветра, чтобы получить 1 единицу водородной энергии. Лучшие промышленные солнечные батареи имеют КПД 10%, или надо затратить 9 единиц солнечной энергии, чтобы получить 1 единицу водородной энергии. Если использовать морские водоросли, которые синтезируют водород как побочный продукт, КПД равен примерно 1%⁴. Таким образом, производство водорода из воды – это чистая потеря энергии.

Водород можно получить из биомассы, но тогда возникают следующие проблемы:

- 1) сезонность;
- 2) биомасса содержит много воды и требует расхода энергии на ее хранение и осушку до получения водорода;
- 3) поставки биомассы ограничены, и ее недостаточно для крупномасштабного производства водорода;
- 4) требуется огромное количество земли, потому что даже выращенная в хороших условиях биомасса имеет малую мощность – до 10 т с гектара;

■ Экономика

5) деградация почвы от эрозии и потеря биопродуктивности почв;

6) потери энергии в виде удобрений и ядохимикатов, энергии на сбор урожая;

7) затраты на транспортировку.

В результате можно прийти к выводу, что и это - не совсем подходящий путь для производства водорода⁵.

Одна из главных причин переключения на водород – предотвращение глобального потепления, вызванного использованием ископаемых топлив. Когда энергия, расходуемая на получение водорода, берется из природного газа, производятся окислы азота, выпуск которых в атмосферу в 58 раз более эффективен для создания условий для парникового эффекта, чем углекислого газа⁶. Использование угля сопровождается большими выбросами CO₂ и ртути. Нефть – слишком мощный и полезный энергоноситель, чтобы использовать ее для производства водорода. Природный газ также слишком ценное сырье, чтобы делать из него водород.

Уменьшение объема. Важнейший параметр аккумулятора или бензобака – энергоемкость, то есть сколько энергии содержится в 1 кг массы или 1 л объема. Чем выше энергоемкость, тем легче транспортное средство, больше пробег на одной заправке и удобнее эксплуатация. Победа двигателей внутреннего сгорания в начале прошлого века в значительной мере обеспечена высокой энергоемкостью жидких топлив.

Независимо от того, как его получают, водород - самое неэнергоемкое топливо на Земле. Это видно из нижеследующей таблицы. Требуется 3,73 литра жидкого водорода, чтобы получить энергию, эквивалентную энергии 1 литра бензина. Газообразный водород хранится под давлением. При базовом давлении 400 атмосфер требуется 8 литров водорода для получения энергии, эквивалентной 1 литру бензина. Чем выше давление, при котором хранится водород, тем меньший объем он занимает⁷.

Вид топлива	Плотность (кг/литр)
Сжатый водород (400 атмосфер)	0,016
Бензин	0,8
Метанол	0,72

При комнатной температуре и давлении водород занимает в 3000 раз больший объем, чем бензин, содержащий эквивалентное количество энергии⁸. Чтобы адекватно разместить водород, его нужно сжать, сжижить или связать химически. Сжатие водорода до давления 10 000 паскалей - многоступенчатый процесс, на который будет дополнительно израсходовано 15 % энергии, содержащейся в водороде. Если водород сжижен, это позволит поместить большее количество водородной энергии в меньший объем, но потери энергии на процесс сжижения составят 30–40%. Сам процесс сжижения требует чрезвычайных мер безопасности и очень низкой температуры – минус 423 градуса по Фаренгейту. Заправка топливом должна быть роботизирована.

Водород можно хранить в пористых веществах, например в силикагелях, покрытых некоторыми металлами (платиной, титаном, специальными сплавами). Такая «губка» может поглотить значительное количество водорода, до 6 атомов на один атом металла, в химическом виде так называемого гидрида, и высвободить его при нагревании. Однако металл намного тяжелее водорода, и поэтому энергоемкость гидридных аккумуляторов водорода крайне низка.

Транспортировка. Если использовать жидкий водород в автомобиле, необходимо иметь тяжелую криогенную систему обеспечения. Резервуар или бак для хранения водорода должен быть достаточно холодным в целях безопасности. Если добавить изоляцию, вес и без того тяжелой емкости значительно увеличится. Предположим, что водородный автомобиль может пройти на 1 кг водорода 90 км⁹. Бак содержит 3 кг сжатого газа, которого хватает на 270 км пути, и весит этот бак 400 кг¹⁰. Сравним с топливным баком Honda Accord: он весит 11 кг, стоит \$ 100 и вмещает 65 литров бензина, которого хватает на 800 км пути.

Согласно данным National Highway Safety Traffic Administration – NHTSA, сокращение веса транспортного средства – наиболее мощный способ повышения экономии топлива. Сокращение веса транспортного средства на каждые 10% снижает затраты топлива на 8%. Чем больше сжимать водород, тем меньший бак можно использовать. Но поскольку растет давление, необходимо увеличивать толщину стальной стенки бака и, следовательно, его вес. Стоимость бака увеличивается с ростом давления. Для бака, обеспечивающего давление 2000 паскалей, стоимость составляет \$ 400 за 1 кг веса бака. При давлении 8000 паскалей уже 2100 долл. за 1 кг веса бака¹¹. И сам бак будет огромным - при давлении 5000 паскалей такой водородный бак будет в 10 раз более объемным, чем бензиновый, содержащий то же количество энергии.

Сами топливные элементы, которые являются наиболее эффективными преобразователями химической энергии в электрическую, также очень тяжелые. «Металл – гидридная система хранения, которая может содержать 5 кг водорода, включая пластины, контейнер и теплообменник, весит примерно 300 кг. «Это снижает топливную эффективность транспортного средства», – так считает Роза Янг, физик и вице-президент компании Energy Conversion Devices из Трои, штат Мичиган¹².

Топливные элементы дороги. В 2003 г. они стоили от 1 млн. долл. и более. Сегодня, конечно, с появлением новых катализаторов, их стоимость быстро снижается. Однако получить надежные данные по стоимости водородных топливных элементов весьма затруднительно. Дело в том, что на данном этапе технологического развития ТЭ имеют низкую надежность, нуждаются в очень чистом водороде и гораздо более дешевом катализаторе, чем платина. Де-

шевый катализатор может быстро засоряться и терять энергию, если в водороде имеются примеси, а стоимость особо чистого водорода значительно отличается от стоимости технического водорода. Срок работы элементов – не более 1000 часов. ТЭ все еще не могут преодолеть расстояние без дозаправки в 100 миль и не могут конкурировать с бензино-электрическими гибридами, подобно серийной Toyota Prius, которая энергетически более эффективна и обладает более низким уровнем выбросов CO₂, чем проектируемые ТЭ¹³.

Водород ведет к ломкости металла¹⁴. Хрупкий металл может создавать утечки. На трубопроводе или в аккумуляторе это может вести к взламыванию или растрескиванию стенок и, как следствие, – к катастрофе. Создание соответствующего сплава, стойкого к воздействию водорода, добавляет водородному проекту дороговизны. Водород – очень «текучий» элемент. Как только его закачали в бак, он старается выйти из него, как самый легкий из всех газов. Он быстро растворяется и проникает в металлы, резину, пластики и даже стекло, поэтому требуются дополнительные усилия, чтобы застраховаться от утечек. «Запирающие» устройства на баках с водородом нуждаются в сложном наборе запоров, прокладок и клапанов. Утечки вероятны также и из-за высокого давления. Это может происходить по швам, неметаллическим прокладкам и т.п. Сверхпрочная топливная задвижка ТЭ может иметь тысячи условно опасных мест¹⁵.

Водород имеет самую низкую точку зажигания из всех видов топлива, в 20 раз более низкую, чем бензин. В смеси с воздухом образуется чрезвычайно взрывоопасный гремучий газ. Поэтому, если имеется утечка, то даже в состоянии покоя при взрыве водородного бака одного автомобиля площадь пораженной территории охватит несколько квадратных километров. И пока не видно путей устранения утечек и полного исключения взрывов и пожаров. В современном мире нельзя забывать о возможности терроризма. Нельзя недооценивать риск предоставления террористам тысяч автомобилей, каждый из которых в злонамеренных руках может быть относительно легко превращен во взрывное устройство в сотни килограммов тротилового эквивалента.

Грузовики – перевозчики водорода от завода до сети заправок (стоимость каждого может составить примерно 250 тыс. долл.) могут перевозить топливо, достаточное для заправки 60 автомобилей¹⁶. Весит такой грузовик 40 т и перевозит только 400 кг водорода. При расстоянии поставки в 250 км 20% энергии поставленного водорода будет израсходована на транспортировку. При расстоянии в 500 км – это уже 40%. Тот же самый грузовик, перевозящий бензин, может заправить 800 автомобилей¹⁷.

Другая альтернатива – трубопроводы. Средняя стоимость газопровода для прокачки природного газа приблизительно составляет 1 млн

долл. за милю. Ранее проложенные газопроводы нельзя использовать для прокачки водорода, потому что они сделаны из металла, который для водорода был бы слишком ломким и способствовал утечкам. Вторая причина – диаметр трубы слишком большой. Если строить подобную трубопроводную инфраструктуру для водорода, то только в США на это было бы потрачено 200 трлн долл. Главные эксплуатационные расходы водородных трубопроводов – мощные компрессоры и обслуживание¹⁸. Не говоря уже о том, что на прокачку водорода на 1000 км будет затрачено 8 % энергии прокачанного водорода¹⁹.

Топливные элементы. ТЭ – электрохимическое устройство, подобное гальваническому элементу, но отличающееся от него тем, что вещества для электрохимической реакции подаются в него извне – в отличие от ограниченного количества энергии, запасенного в гальваническом элементе или аккумуляторе. Топливные элементы не имеют такого ограничения на коэффициент полезного действия (КПД), как у тепловых машин. В связи с этим они могут иметь очень высокий коэффициент преобразования химической энергии в электрическую. Конструкция любого топливного элемента состоит из двух электродов (анода и катода) и находящегося между ними слоя электролита – среды, обеспечивающей перемещение ионов от одного электрода к другому и блокирующей движение электронов. Для того чтобы реакция протекала с более высокой скоростью, в электродах часто используют катализаторы.

Работа топливных элементов поддерживается путем подачи двух применяемых для поддержания реакции компонентов – топлива и окислителя. В зависимости от типа топливного элемента в качестве топлива могут использоваться газообразный водород, природный газ (метан), а также жидкое углеводородное топливо (например, метиловый спирт). В роли окислителя обычно выступает содержащийся в воздухе кислород, а некоторые типы топливных элементов могут работать только с чистым кислородом.

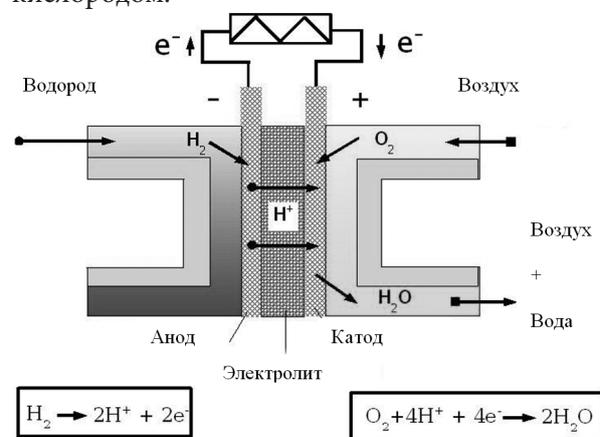


Рис. 1. Принцип действия топливного элемента (превращения химической энергии водорода в электроэнергию).

■ Экономика

В мире принята следующая классификация топливных элементов:

- PEM – топливный элемент с протон-обменной мембраной (Proton Exchange Membrane Fuel Cell);
- AFC – щелочной топливный элемент (Alkaline Fuel Cells);
- DMFC – топливный элемент прямого действия на метаноле (Direct Methanol Fuel Cell);
- PAFC – топливный элемент на фосфорной кислоте (Direct Methanol Fuel Cell);
- MCFC – топливный элемент на расплаве карбоната (Molten Carbonate Fuel Cell);
- SOFC – топливный элемент на твердом окисле (Solid Oxide Fuel Cell).

Преимущества топливных элементов. В топливных элементах нет превращения химической энергии топлива в тепловую и механическую, как в традиционной энергетике (рис. 3). В связи с этим КПД топливных элементов значительно выше, чем у традиционных энергоустановок, и может достигать 90%. Имеется возможность практически мгновенного возобновления их энергоресурса – для этого достаточно установить новую емкость (картридж) с используемым топливом. Применение не расходующихся в процессе реакции электродов позволяет создавать топливные элементы с очень большим сроком службы.

Расходным материалом для топливных элементов служат лишь емкости с топливом, а основным продуктом реакции является обычная вода.

Замена используемых в настоящее время батареек и аккумуляторов на топливные элементы позволит значительно сократить объем подлежащих переработке отходов, содержащих ядовитые и вредные для окружающей среды вещества.

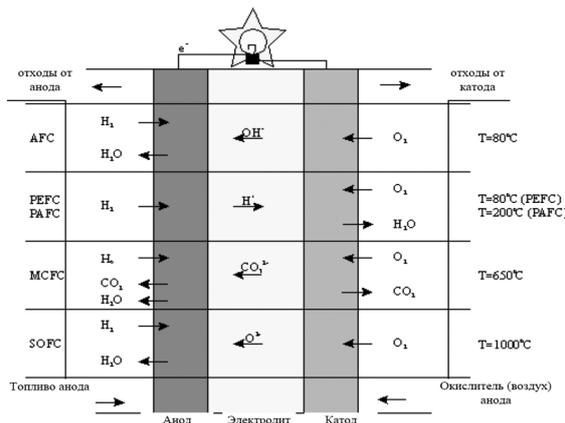


Рис.2. Электрохимические реакции в различных типах топливных элементов.

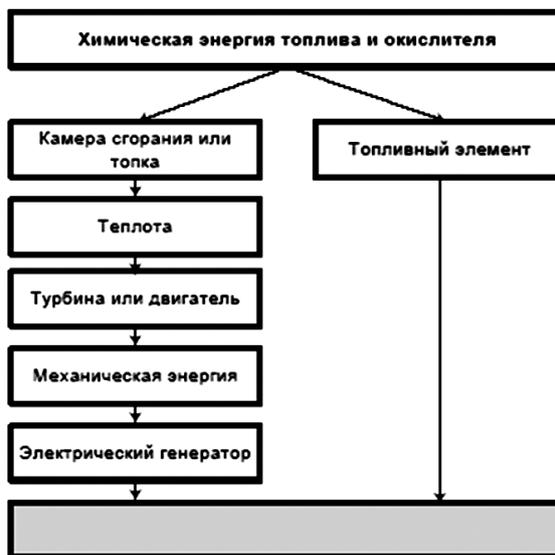


Рис.3. Ступени преобразования химической энергии традиционным и электрохимическим способами.



Рис.4. Области применения топливных элементов.

Автомобили с использованием топливных элементов. Водородные энергетические установки автомобиля (баллон со сжатым водородом + топливный элемент (ТЭ) + электромотор) на первый взгляд в перспективе выглядят крайне привлекательно как по цене, так и по эксплуатационным характеристикам. Однако все же основным стимулом их развития является снижение выбросов в атмосферу парниковых газов.

Таблица 1

Предполагаемые локальные выбросы (эмиссии) для автомобиля на ТЭ и стандарты эмиссий (г/милю)

Органические компоненты	Органические компоненты		СО		NOx	
	Лучший вариант	Вероятный вариант	Лучший вариант	Вероятный вариант	Лучший вариант	Вероятный вариант
Бензиновый двигатель внутреннего сгорания		0,755		7,553		0,704
Водородная энергетическая установка		0,004		0,003		0,001
Метанольная энергетическая установка	0,020	0,023	0,003	0,004	0,001	0,001
Бензиновая энергетическая установка	0,268	0,371	0,004	0,005	0,001	0,001
Стандарты эмиссий						
Tier II	0,125	1,7	0,2	7,553		0,704
ULEV	0,04	1,7	0,2	0,003		0,001
SULEV	0,01	1,0	0,02	0,004	0,001	0,001
EZEV	0,004	0,17	0,02	0,005	0,001	0,001

Источник: Кондратьев Д., Черепенин В., Поселов Б., Овчинников А. Выбор топлива и окислителя для топливных элементов энергоустановки автомобиля/ Альтернативная энергетика и экология. 2005. №4.

Из приведенной выше таблицы видно, насколько низки выбросы ТЭ. Однако необходимо отметить, что ТЭ могут работать и на другом топливе, например метаноле. Если брать водород по оптовым ценам и пренебречь ценами транспортировки и розничной продажи водорода (а это, как было показано выше, огромные расходы), то можно считать: расходы водородного автомобиля, связанные с процессом движения, будут максимально низкими – 2,6 американских цента на милю. Для сравнения: у современных экономичных бензиновых автомобилей этот показатель – на уровне 10 центов на милю. Эта рекламная цифра и декларируемая независимость от источников нефти стимулируют практически все крупные автомобильные компании на создание опытных образцов водородных автомобилей. В 2005 г. было запущено в эксплуатацию около 100 новых транспортных средств (автомобилей, автобусов, мотоциклов и т.д.) на топливных элементах. К концу 2007 г. в мире эксплуатировалось 620–650 единиц таких транспортных средств.

В автомобильных ТЭ преобладают PEM-технологии, что означает малую мощность двигателя. В 2005 г. был изготовлен всего один автомобиль с РАФС топливным элементом – остальные на PEM-технологиях. Разработчики смогли снизить сто-

имость автомобильных водородных топливных элементов с 275 долл./кВт мощности в 2002 году до 110 долл./кВт в 2005 г. Министерство энергетики США планирует снизить стоимость ТЭ до \$30/кВт мощности к 2020 г.

К концу 2005 г. во всем мире функционировало около 115 водородных автомобильных заправочных станций. В 2006 г. было построено еще около 40 станций. Из общего количества заправочных станций, построенных в 2004–2005 гг., всего 8% работают с жидким водородом, остальные – с газообразным. Отсутствие водородной инфраструктуры является одним из основных препятствий развития водородного транспорта. Решением проблемы может стать применение водорода в качестве топлива для двигателя внутреннего сгорания, или смесей топлива с водородом.

Создание широкой водородной инфраструктуры автозаправок при современном уровне технологий – крайне дорогая (порядка 5 млрд. долл.) для охвата 10% автомобилей США задача. Она также в полной мере не решена в техническом отношении и в плане обеспечения безопасности. Действительно, опасность взрывов «тремучей смеси» в случае утечки водорода с кислородом воздуха при массовом использовании сжатого водорода очень высока. Безопасные методы хранения водорода либо слишком дороги, либо нетехнологичны. Тем не менее идут интенсивные разработки в этом направлении, и теоретически можно ожидать появления безопасных способов хранения водорода на борту автомобиля. По мнению автора, автомобили с использованием топливных элементов на водороде займут в рейтинге практической реализуемости почетное третье место.

На первое место можно поставить двигатели внутреннего сгорания (ДВС) на спиртах (этиловом или метиловом), которые уже серийно выпускаются и используются в Бразилии. К примеру, малая поршневая авиация в этой стране летает исключительно на спирте. Спирт как топливо – очень привлекательная перспектива. На втором месте – знаменитые «гибриды» Toyota, которых только в США в 2005 г. было продано более 200 тыс. единиц. Правда, они слишком «бензиновые» и только наполовину электрические, но зато это уже массовая коммерческая продукция с аккумулятором и электромотором.

В последнее время появление быстрозаряжаемых литий-ионных аккумуляторов сделало возможным серийный выпуск городских электромобилей, которые можно заряжать практически в бытовых условиях. Невысокие затраты на создание транспортной сети электромобилей и низкая (по сравнению с бензиновыми) стоимость километра пробега позволяют утверждать, что эта транспортная ниша уже существует. Компания «Ниссан» объявила о серийном выпуске электромобилей уже в ближайшее время.

С другой стороны, уже сегодня спирты широко используются как присадки, повышающие октановое число топлива (около 6% от рынка

автомобильных топлив в США). Спирты легко транспортировать, их использование безопасно. Поэтому вполне вероятно, что метанольные ТЭ и этанол как автомобильное топливо «опередят» водород и «захватят» рынок экологически чистого экономичного автотранспорта. Постоянное совершенствование дизельных двигателей уже сейчас обеспечивает их относительно высокий КПД – более 40%, а технологические усовершенствования – низкий выброс вредных веществ. Поэтому судить о возможности промышленного успеха водородных энергетических установок для автотранспорта пока преждевременно.

Использование водородных топливных элементов в воздушном транспорте. Корпорация Boeing прогнозирует, что топливные элементы постепенно заменят в авиации вспомогательные энергетические установки. Они смогут генерировать электроэнергию, когда самолет находится на земле, и быть источниками бесперебойного питания в воздухе. Топливные элементы будут постепенно устанавливаться на новое поколение Боингов 7E7 начиная с 2008 г.

Использование водородных топливных элементов в железнодорожном транспорте. Железнодорожный исследовательский технологический институт (Япония) планирует запустить поезд на водородных топливных элементах в эксплуатацию к 2010 г. Поезд сможет развивать скорость 120 км/ч. и проезжать 300–400 км без заправки. Прототип был испытан в феврале 2005 г. В США с 2003 г. разрабатывается локомотив массой 109 т с водородным топливным элементом мощностью 1 МВт.

Использование водородных топливных элементов в водном транспорте. В Германии производятся подводные лодки класса U-209 с двумя топливными элементами по 120 кВт каждый производства Siemens AG. U-209 стоят на вооружении Германии, поступили заказы из Греции, Италии, Кореи, Израиля. Под водой лодка работает на водороте и практически не производит шумов. В США поставки SOFC топливных элементов для подводных лодок могут начаться в 2006 г. Компания FuelCell Energy разрабатывает топливные элементы мощностью 625 кВт для военных кораблей. Японская подводная лодка Urashima с топливными элементами PEM производства Mitsubishi Heavy Industries была испытана в августе 2003 г.

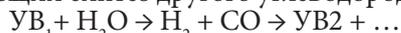
Стационарные энергетические установки. В 2005 г. в мире эксплуатировалось 3800 стационарных энергетических установок на топливных элементах. Основная доля установок эксплуатируется в США, Японии и Западной Европе. Доля других регионов незначительна. В большинстве установок применяются топливные элементы с протонно-обменными мембранами PEM (Proton Exchange Membrane). Это означает, что мощность этих установок незначительна, и они применяются в основном в быту и на малых предприятиях. В настоящее время в качестве основного топлива в энергетических установках используется при-

родный газ, что обусловлено следующими обстоятельствами:

– природный газ – один из наиболее распространенных видов топлива, в большинстве стран, где установлены энергетические установки, есть соответствующая газотранспортная инфраструктура;

– газовые компании, в особенности в Германии и Японии, играют важную роль в разработке и внедрении энергетических установок на топливных элементах.

Конверсия углеводородных топлив. И все же водородная энергетика уже живет и процветает. Имеются в виду технологии конверсии углеводородов – прежде всего гидрокрекинг, а также производство синтетической нефти и моторных топлив (GTL – gas-to-liquid, CTL – coil-to-liquid, газификация углей и т.д.). В основе большинства перечисленных технологий лежит образование синтез-газа (смеси водорода H₂ и угарного газа CO) из воды и углеводородного топлива и последующий синтез другого углеводорода.



Эта технология промышленно используется со времен Второй мировой войны, прежде всего в Германии и ЮАР, лишенных внутренних источников нефти для экономического развития.

Процесс превращения природного газа в средние дистилляты – дизельное топливо, керосин, бензин – основан на технологии Фишера–Тропша (ФТ), разработанной еще в 20-е гг. прошлого века. Всего 5–6 лет назад эта технология считалась весьма дорогостоящей и экзотической, представляющей чисто академический интерес. Сейчас это – одна из самых перспективных энергетических технологий. Превращение произошло благодаря разработкам новых высокоэффективных катализаторов и усовершенствованию технологии ФТ на стадии получения из природного газа промежуточного продукта – синтез-газа, в результате чего цена конечных синтезированных нефтепродуктов стала заметно ниже (около 20 долларов за баррель) и приблизилась к себестоимости природной нефти.

На каждый атом углерода в угле приходится в среднем один атом водорода. А в нефти, тоже в среднем – два с небольшим водородных атома на один углеродный. По весу:

Среднее содержание, %	Газ	Нефть	Бурый уголь	Каменный уголь	Антрацит
Углерода	75	85	70	80	95
Водорода	25	13	5	5	2

Для того чтобы получить синтетическую нефть, надо изменить среднее отношение углерод/водород в исходном углеводородном сырье. А требуемый для этого водород проще всего взять из воды: можно электролизом (но это слишком дорого), поэтому чаще используется паровой риформинг. Наиболее крупнотоннажный процесс такого типа – гидрокрекинг нефти. Именно в этой области производится и потребляется огромное

количество водорода, составляющее заметную весовую долю в потребляемых нефтепродуктах.

Водородная энергия как бы запасается в виде повышения доли водорода в продуктах. Все «неудобные» углеводороды – уголь, сланцы, тяжелая и вязкая нефть и т.д. – могут быть преобразованы в более «удобный» вид и при этом гораздо более энергоемкое топливо, например высокооктановый бензин или аналог дизельного топлива. При этом не требуется решать многочисленных технологических проблем, которые возникают при работе с чистым водородом.

Нельзя не отметить, что есть множество интересных и перспективных направлений развития и применения технологий конверсии углеводородов с использованием синтез-газа (водорода). Это:

– конверсия угля в метан непосредственно в пласте;

– мини-НПЗ с углеводородной конверсией, которые можно ставить на кустах близкорасположенных скважин с целью преобразования метана, жирного газа, попутного газа, конденсата и нефти: а) в более качественную синтетическую нефть или газ, по составу близкий к природному, б) метанол, да еще и вырабатывать при этом электроэнергию и т.п.

Уже началась эксплуатация промышленных скважин в Канаде по добыче, по сути, синтетической нефти из битуминозных песков, где сам процесс конверсии битума в СЖУ (синтетические жидкие углеводороды) происходит внутри пласта. В работах по созданию производства СЖУ из природного газа с применением технологии GTL принимают участие как крупнейшие транснациональные компании (Exxon, Royal Dutch/Shell, BP, Statoil, Texaco, Phillips, Chevron), так и мелкие специализированные компании (Syntroleum Corp., Rentech Inc. и др.). Южноафриканская компания Sasol владеет одной из наиболее популярных технологий GTL, которую применяет на собственном заводе; при этом она не только охотно продает лицензию на эту технологию, но и участвует в трех проектах по ее внедрению (в Катаре, Нигерии и Норвегии) совместно с крупными нефтяными компаниями.

В мире на разных стадиях реализации находятся около двадцати демонстрационных или полномасштабных коммерческих проектов строительства предприятий по производству СЖУ мощностью до 5 млн т в год. Прогнозируется, что в течение ближайших 15–20 лет в мире будет построено 15–30 заводов GTL суммарной мощностью 50–100 млн. т/год, а инвестиции в новую отрасль составят 15–20 млрд. долл. Проблема, которую призвана решить ВЭ, состоит в сокращении потерь энергии при транспортировке, переработке и потреблении нефти. В добыче расходуется 5–10% энергии добытой нефти, при транспортировке – 5–10%, при переработке – 10–20%, при распределении – 1–5% и, таким образом, в конечном потреблении используется только 60–70% энергии добытой нефти. В полезную ме-

ханическую энергию, учитывая КПД современных двигателей, переводится не более 15–30% той энергии, которую можно получить при сжигании добытой на скважине нефти. Практически весь углерод переводится в парниковый газ CO₂. Сторонники «водородной энергетики» полагают, что водородная экономика решит обе эти проблемы: повышение КПД использования энергии и сокращения выброса парниковых газов. США потратили на «Инициативу в области водородного топлива» в 2004–2008 гг. суммарно 1,2 млрд долл. из примерно 100 млрд долл. на мирные (не военные) исследования. Это существенные средства, которые достаточны для стимуляции интереса научной общественности, но явно недостаточны для серьезных технологических преобразований.

Основным преобразователем водорода в энергию являются низко- и высокотемпературные топливные элементы. К настоящему моменту достигнутый КПД промышленных низкотемпературных водородных элементов не превышает 40–50%, что в совокупности с потерями энергии на получение водорода не позволяет говорить о существенном выигрыше в эффективности использования энергии по сравнению с традиционным двигателем внутреннего сгорания или дизелем.

Высокотемпературные окислительные водородные элементы в сочетании с турбинами на выхлопном газе могут иметь КПД до 90%. Но без турбины – это те же 50–60%, плюс необходимость поддерживать рабочую температуру в 900°C и обеспечивать высокую степень очистки водорода и воздуха. Тогда становится совершенно непонятным, зачем использовать ТЭ, если в той же рыночной нише маломощных электростанций промышленно выпускаются микрогазотурбинные установки малой мощности около 100 киловатт (Elliott Energy Systems, Capstone и др.) с КПД 80–85%? При этом микрогазотурбины работают на широком наборе газообразных и жидких топлив, а из примесей исходное топливо надо только очистить от пыли.

По мнению специалистов в данной области и согласно документам Минэнерго США (DOE), современное состояние дел в водородной энергетике – это только научно-исследовательская программа. В планах DOE заявлено принятие решения о переходе к стадии коммерциализации только после 2010 г. В настоящее время интенсивные исследования идут во всех развитых странах, однако промышленно востребованных результатов не так уж много. Ясных коммерческих перспектив не обнаружено. По-видимому, в ближайшие 10 лет ожидать существенных коммерческих результатов, а тем более возникновения водородных экономик где-либо в мире не приходится. Наличие нескольких десятков пробных водородных заправок на страну для богатых экономик не является показателем их массового развития.

Чтобы обеспечить бурно растущий спрос на энергию в Азиатско-Тихоокеанском регионе, ком-

■ Экономика

мерчески доступная новая энергетика потребуется уже через 5–10 лет, и/или нужен эквивалентный прорыв в энергосберегающих технологиях. Водородная энергетика пока не готова к этому.

Снижение выбросов CO₂ как основная цель водородной энергетике также небесспорно. Пока не установлено окончательно, что существующее потепление климата связано исключительно с выбросом парниковых газов. Возможно, главную роль в этом процессе играет средняя мощность излучения Солнца. Многие выкладки в настоящей статье показывают, что полный технологический цикл, включая производство водорода, а не только его использование, не только не снижает суммарный выброс CO₂ и других парниковых газов, а значительно повышает этот выброс по сравнению даже с традиционными технологиями.

Таким образом, значительное количество утверждений политиков, маркетологов от политики и просто промышленных лоббистов о безбрежных перспективах ВЭ, к сожалению автора, не выдерживают даже той поверхностной критики, которая приведена в данной статье. С другой стороны, нельзя отрицать высокие научные и технологические достижения разработчиков водородной энергетике. Достаточно беглого взгляда на содержание, где перечислены только названия некоторых выдающихся разработок,

которые сыграли значительную роль в развитии не только и не столько водородной энергетике, сколько прикладных областей.

В таких областях техники, как авиация, особенно военная, космос, судостроение, некоторые элементы водородной энергетике уже нашли свое место благодаря колоссальной кратковременной энергоотдаче в требуемые моменты времени и другим их уникальным возможностям. Вероятно, эти технологические решения будут использоваться и в дальнейшем. Если, конечно, не произойдет прорыва в разработках других типов аккумуляторов.

Polyakova T. V. Status and Prospects of Hydrogen Energy development.

Summary: *The term «hydrogen energy system» (HES) has acquired huge popularity in the sphere of science, economy and a policy in the last ten years in connection with a problem of nonrenewable energy resources depletion – hydrocarbons. The analysis of numerous publications on this items shows, however, that this term often is understood as a number of various programs. We will try to split, allocate these programs main driving ideas of each of the programs and to evaluate critically their condition at the moment, to consider some technological achievements which can render material effect on the further HES development.*

Ключевые слова

Водород, экономика, энергетика, нефть, газ, эффективность, технологии.

Keywords

Hydrogen, economy, energy, oil, gas, efficiency, technology.

Примечания

1. Jacobson M. Waiter, please hold the hydrogen <http://sfgate.com/cgi-bin/article.cgi?f=/c/a/2004/09/08/EDGRQ8KVR31.DTL>
2. Martin I. Hoffert, et al. Advanced Technology Paths to Global Climate Stability: Energy for a Greenhouse Planet. Science. Vol. 298, 1 November 2002.
3. Romm J. The Hype About Hydrogen: Fact & Fiction in the Race to Save the Climate 2004
4. Hayden H. The Solar Fraud: Why Solar Energy Won't Run the World
5. Simbeck D., Chang E. Hydrogen Supply: Cost Estimate for Hydrogen Pathways - Scoping Analysis- National Renewable Energy Lab. <http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/32525.pdf>
6. Union of Concerned Scientists http://www.ucsusa.org/clean_energy/renewable_energy/page.cfm?pageID=84
7. Simbeck D., Chang E. Hydrogen Supply: Cost Estimate for Hydrogen Pathways - Scoping Analysis- National Renewable Energy Lab. <http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/32525.pdf>
8. Romm J. The Hype About Hydrogen: Fact & Fiction in the Race to Save the Climate 2004
9. Simbeck D., Chang E. Hydrogen Supply: Cost Estimate for Hydrogen Pathways - Scoping Analysis- National Renewable Energy Lab/ <http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/32525.pdf>
10. Fill'er up—with hydrogen. Mechanical Engineering Magazine. <http://www.memagazine.org/backissues/feb02/features/fillerup/fillerup.html>
11. Simbeck D., Chang E. Hydrogen Supply: Cost Estimate for Hydrogen Pathways - Scoping Analysis- National Renewable Energy Lab. <http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/32525.pdf>
12. Amos W. Costs of Storing and Transporting Hydrogen - U.S. Department of Energy Energy. Efficiency and Renewable Energy. <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/25106.pdf>
13. Romm J. The Hype About Hydrogen: Fact & Fiction in the Race to Save the Climate 2004.
14. El kebir O., Szummer A. Comparison of hydrogen embrittlement of stainless steels and nickel-base alloys - International Journal of Hydrogen Energy - Volume: 27, Issue: 7-8 July - August, 2008
15. Fuel Cell Engine Safety. U.S. Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy. <http://www.avt.nrel.gov/pdfs/fcm06r0.pdf>
16. Romm J. The Hype About Hydrogen: Fact & Fiction in the Race to Save the Climate 2004. Amos W. Costs of Storing and Transporting Hydrogen. U.S. Department of Energy Energy. Efficiency and Renewable Energy. <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/25106.pdf>
17. Romm J. The Hype About Hydrogen: Fact & Fiction in the Race to Save the Climate. 2004
18. Romm J. The Hype About Hydrogen: Fact & Fiction in the Race to Save the Climate. 2004
19. Bossel U., Eliasson B. Energy and the Hydrogen Economy. www.methanol.org/pdfFrame.cfm?pdf=HydrogenEconomyReport2003.pdf