

Аналитическая записка

Состояние и перспективы водородной энергетики в России и мире.

Содержание

Введение	2
1. Производство, хранение, транспортировка водорода.....	3
Производство водорода.....	3
Уменьшение объема.....	5
Транспортировка	6
Компании — основные игроки на мировом водородном рынке.....	9
2. Топливные элементы.....	10
Преимущества топливных элементов	11
Автомобили с использованием топливных элементов.....	13
Использование водородных топливных элементов в воздушном транспорте.....	17
Использование водородных топливных элементов в железнодорожном транспорте. .	17
Использование водородных топливных элементов в водном транспорте.	17
Стационарные энергетические установки.	18
3. Конверсия углеводородных топлив	21
4. Атомно-водородная энергетика (продвигает Минатом России и поддерживает компания «Норильский никель»).....	23
5. Повышение эффективности энергетики за счет аккумулирования энергии на электростанциях в периоды снижения потребляемой мощности (компания «Норильский никель»).....	24
6. Альтернативные источники энергии	25
7. Программы по развитию водородной энергетики в мире	26
США	26
Япония.....	28
Европейский союз.....	29
8. Проекты нефтегазовых компаний в области водородной энергетики.	32
BP.....	32
Royal Dutch Shell	33
Chevron.....	33
Statoil	33
9. Состояние работ по водородной энергетике в России.....	33
Заключение.....	35

Введение

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 программы и критически оценить их 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 энергетики – “downstream”**, т.е. транспортировка, переработка и использование энергии, но не **“upstream”** (добыча первичного энергетического сырья). ВЭ лишь **дополняет** нефтяную, атомную или «возобновляемую» энергетику, 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 записки является выяснение, где эти потери оправданы.

Остановимся на наиболее перспективных и широкомасштабных приложениях водородных технологий.

Концепция экологически чистой водородной энергетики, часто называемая «водородной экономикой», включает:

- Производство водорода из воды с использованием невозобновляемых источников энергии (углеводороды, атомная энергия, термоядерная энергия);
- Производство водорода с использованием возобновляемых источников энергии (солнце, ветер, энергия морских приливов, биомасса и т. д.);
- Надежная транспортировка и хранение водорода;
- Широкое использование водорода в промышленности, на транспорте (наземном, воздушном, водном и подводном), в быту;

- Обеспечение надежности материалов и безопасности водородных энергетических систем.

1. Производство, хранение, транспортировка водорода

Продолжающееся непрерывное повышение цен на энергоносители и бензин, в частности, сделало привлекательными самые фантастические возможности замены наиболее распространенного силового агрегата современного автомобиля - двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с баком бензина. Ситуация напоминает начало XX века, когда какие только устройства ни ездили, летали и плавали..., но двигатели внутреннего сгорания тогда победили. Предрекают, что их век заканчивается... А что на смену? Даже обзор готовых образцов займет несколько страниц: гибридные, электрические, двигатели Стрлинга, новые типы дизельных двигателей, газотурбинные – это только те, что уже стоят на серийных автомобилях. На смену баку бензина приходят быстрозаряжаемые 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 бензобаку, 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 выбросов.¹ 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. Так как большая часть электричества для электролиза производится с использованием ископаемого топлива с эффективностью 30%, и КПД электролиза составляет 70%, это означает, что затрачивается четыре единицы энергии для создания одной единицы водородной энергии: 70%*30%, и мы получаем, эффективность использования водородной энергии составляет приблизительно 20%.³

По-видимому, цель получения дополнительного эффекта от применения водородных технологий должна состоять, в частности, 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.

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

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 тонн с гектара, 6) деградация почвы от эрозии и потеря биопродуктивности почв, 7) потери энергии в виде удобрений и ядохимикатов, энергии на сбор урожая, 8) затраты на транспортировку, и ПОЭТОМУ 9) это - не подходящий путь для производства водорода.⁵

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 газа.⁶ 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.⁷

Уменьшение объема

Важнейший параметр аккумулятора или бензобака – энергоемкость, т.е. 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. Из таблицы видно, что водород наименее энергоемкое топливо на Земле. 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

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 Fisher D., Fisher M. The Nitrogen Bomb. www.discover.com April 2001
Smil V. Scientific American Jul 1997 Global Population & the Nitrogen Cycle

литру бензина. Чем выше давление, при котором хранится водород, тем меньший объем он занимает.⁸

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 энергии.⁹ Чтобы адекватно разместить водород, его нужно сжать сжигать или связать химически. Сжатие водорода до давления 10000 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 км.¹⁰ Бак содержит 3 кг сжатого газа, которого хватает на 270 км пути и весит этот

⁸ 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>

⁹ Romm J. The Hype About Hydrogen: Fact & Fiction in the Race to Save the Climate 2004

¹⁰ 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>

бак 400 кг¹¹ (Сравним с топливным баком Honda Accord, который весит 11кг, стоит \$ 100, и содержит 65 литров бензина. Полный вес бака - 73 кг. Этого топлива 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, его стоимость составляет ~ \$ 400 за 1 кг веса бака. При давлении 8000 паскалей, это - \$ 2100 за кг веса бака.¹² И сам бак будет огромен - при давлении 5000 паскалей такой водородный бак будет в 10 раз более объемён чем бензиновый, содержащий то же количество энергии.

Сами топливные элементы, которые являются наиболее эффективными преобразователями химической энергии в электрическую, также очень тяжелы: «металл – гидридная система хранения, которая может содержать 5 кг водорода, включая пластины, контейнер, и теплообменник, весит приблизительно 300 кг, что снижает топливную эффективность транспортного средства», - считает Роза Янг, физик и вице-президент компании Energy Conversion Devices из Трои, штат Мичиган.¹³

Топливные элементы дороги. В 2003 году они стоили от 1 миллиона долларов и более. Сегодня, конечно, с появлением новых катализаторов стоимость быстро снижается, однако получить надежные данные по стоимости водородных топливных элементов очень 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. Дешевый катализатор может быстро засориться 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,

¹¹ Fill'er up—with hydrogen. Mechanical Engineering Magazine. <http://www.memagazine.org/backissues/feb02/features/fillerup/fillerup.html>

¹² 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>

¹³ 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>

которая энергетически более эффективна и обладает более низким уровнем выбросов CO₂, чем проектируемые ТЭ.¹⁴

Водород ведет к ломкости металла.¹⁵ Хрупкий металл может создавать утечки. На трубопроводе или в аккумуляторе водорода 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 «текущий» элемент. Как только его закачали в бак, он старается выйти из него как самый легкий из всех газов, быстро растворяется и проникает в металлы, резину, пластики и даже стекло и 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 мест.¹⁶

Водород имеет самую низкую точку зажигания из всех топлив, 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 килограмм тротилового эквивалента.

Грузовики – перевозчики водорода от завода до сети заправок (стоимость каждого может составить примерно 250 тысяч долларов) могут перевозить топливо, достаточное для заправки 60 автомобилей.¹⁷ Весит такой грузовик 40 тонн и перевозит только 400 кг водорода. При расстоянии поставки в 250 км 20 % энергии поставленного водорода будет израсходована на транспортировку. При расстоянии

¹⁴ Romm J. The Hype About Hydrogen: Fact & Fiction in the Race to Save the Climate 2004.

¹⁵ 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

¹⁶ Fuel Cell Engine Safety. U.S. Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy. <http://www.avt.nrel.gov/pdfs/fcm06r0.pdf>

¹⁷ 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. Efficiency and Renewable Energy. <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/25106.pdf>

в 500 км – это уже 40%. Тот же самый грузовик, перевозящий бензин, может заправить 800 автомобилей.¹⁸

Другая альтернатива - трубопроводы. Средняя стоимость газопровода для прокачки природного газа приблизительно составляет один миллион долларов 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 триллионов. Главные эксплуатационные расходы водородных трубопроводов - мощные компрессоры и обслуживание.¹⁹ Не говоря уже о том, что на прокачку водорода на 1000 км будет затрачено 8 % энергии прокачанного водорода.²⁰

Компании — основные игроки на мировом водородном рынке

Производители водорода:

Praxair (США)

Air Liquide (Франция)

BOC Group (Великобритания)

Iwatani International (производит 40 % водорода в Японии)

Linde (Германия)

Емкости для хранения водорода:

ECD Ovonics (США)

HERA Hydrogen Storage Systems (Канада)

Dynetek (Канада)

Millennium Cell (США)

Оборудование для производства водорода:

ChevronTexaco (США)

H2Gen (США)

Hydro (Норвегия)

Hydrogenics (Канада)

HyRadix (США)

¹⁸Romm J. The Hype About Hydrogen: Fact & Fiction in the Race to Save the Climate. 2004

¹⁹Romm J. The Hype About Hydrogen: Fact & Fiction in the Race to Save the Climate. 2004

²⁰Bossel U., Eliasson B. Energy and the Hydrogen Economy.

www.methanol.org/pdfFrame.cfm?pdf=HydrogenEconomyReport2003.pdf

2. Топливные элементы

Топливный элемент — 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 (катода и анода) 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.

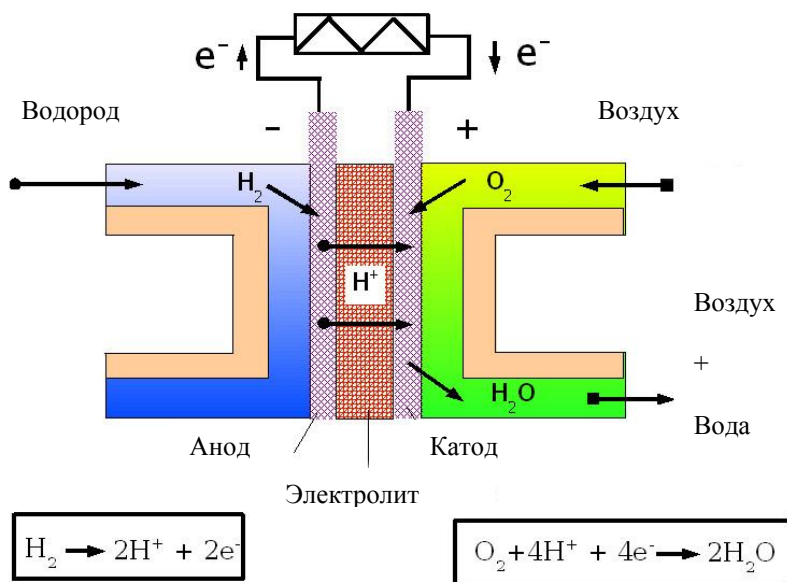


Рис. 1. Принцип действия топливного элемента (превращения химической энергии водорода в электроэнергию)

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).

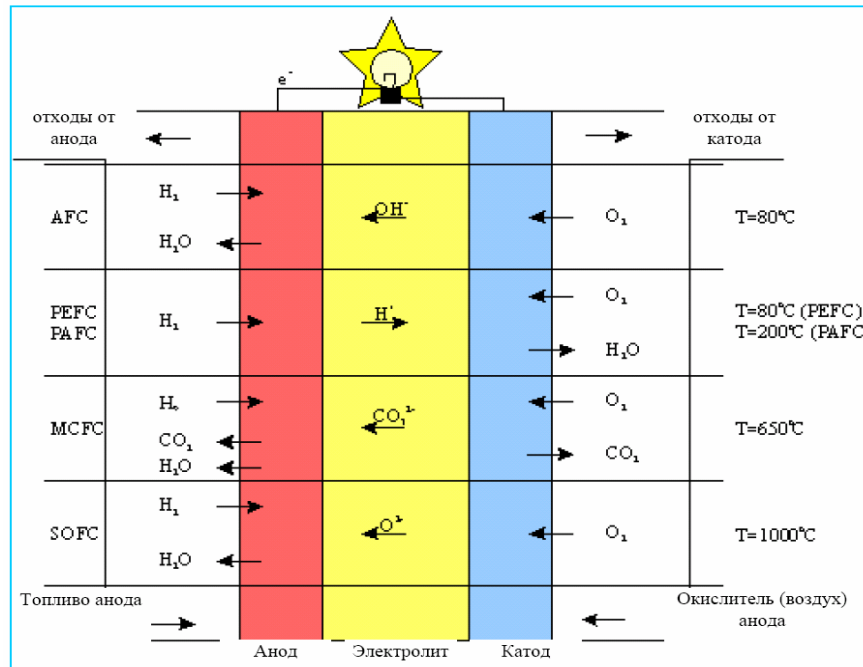


Рис. 2. Электрохимические реакции в различных типах топливных элементов

Преимущества топливных элементов

1. 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%.



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

2. Имеется возможность практически мгновенного возобновления их энергоресурса — для этого достаточно установить новую емкость (картридж) с используемым топливом. Применение не расходуемых в процессе реакции электродов позволяет создавать топливные элементы с очень большим сроком службы.
3. Высокая экологическая чистота химических топливных элементов. 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.

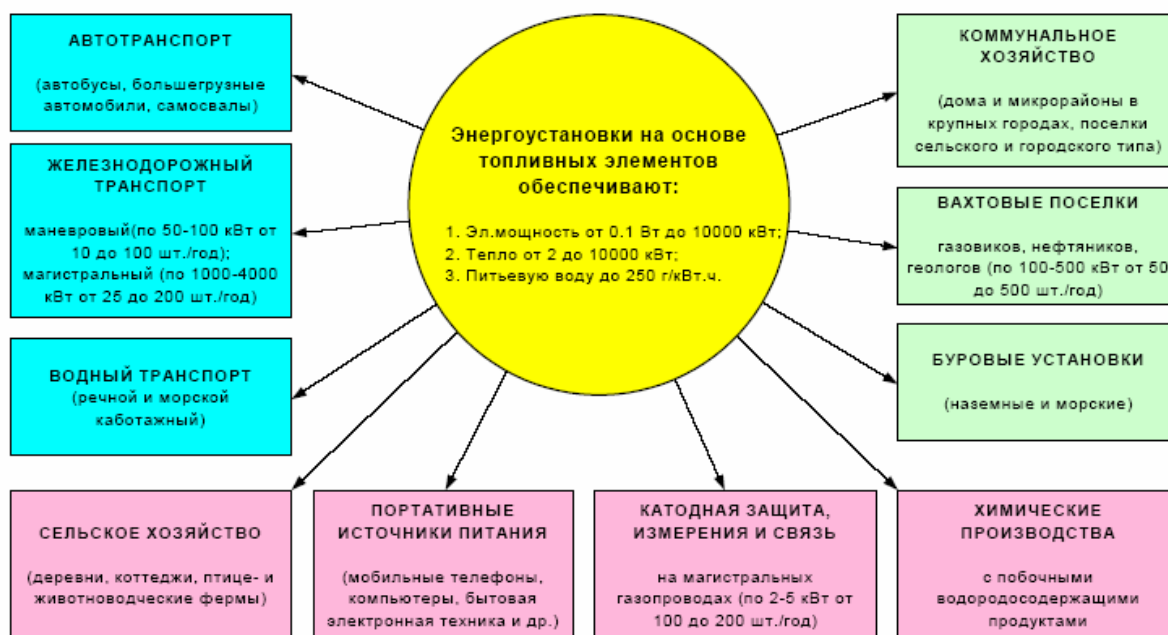


Рис. 4. Области применения топливных элементов

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.

Табл. 1. Предполагаемые локальные выбросы (Эмиссии) для автомобиля на ТЭ и стандарты эмиссий (г/милю)

	Органические компоненты		СО		NO _x	
	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	
ULEV	0,04		1,7		0,2	
SULEV	0,01		1,0		0,02	
EZEV	0,004		0,17		0,02	

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

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, что расходы водородного автомобиля, связанные с процессом движения, будут максимально низкими – 2,6 американских цента на милю (у современных экономичных бензиновых автомобилей – на уровне 10 центов на милю!). Эта рекламная цифра и декларируемая независимость от источников нефти стимулируют практически все крупные компании-автопроизводители на создание опытных образцов водородных автомобилей.

В 2005г. было запущено в эксплуатацию около 100 новых транспортных средств (автомобилей, автобусов, мотоциклов и т. д.) на топливных элементах. К концу 2007 году в мире эксплуатировалось 620—650 единиц такого рода транспортных средств.

В автомобильных ТЭ преобладают PEM технологии, что означает малую мощность двигателя. В 2005 году был изготовлен всего один автомобиль с PAFC топливным элементом, остальные — на PEM технологиях.

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

Табл. 2. Планы автопроизводителей.

Компания	Страна	год	количество автомобилей	планы
DaimlerChrysler	Германия-США	2012-2015	10000	начальное проникновение
Ford	США	2015	-	коммерческая готовность
GM	США	2010-2015	-	коммерческая готовность
GM	США	2025	-	массовый рынок
Honda	Япония	2008	12000 (в США)	начало производства
Honda	Япония	2020	50000 (в США)	производство
Hyundai	Корея	2010	-	дорожные тесты в 2009
Toyota	Япония	2015	-	снижение цены до \$50000
Fiat	Италия	2020-2025	-	полная коммерциализация
SAIC	Китай	2010	1000	коммерческая готовность

В марте 2006 года германская компания HyWays²¹ опубликовала прогнозы внедрения водородного автотранспорта на европейский рынок.

Табл. 3. Прогноз внедрения водородного автотранспорта на европейский рынок (% от общего количества автомобилей)

Сценарий проникновения	2020	2030	2040	2050
Высокое	3,3 %	23,7 %	54,4 %	74,5 %
Низкое	0,7 %	7,6 %	22,6 %	40,0 %

²¹ www.hyways.de

К началу 2007 года во всем мире функционировало более 140 водородных автомобильных заправочных станций. Из общего количества заправочных станций, построенных 2004—2005гг., всего 8 % работают с жидким водородом, остальные с газообразным.²²

Табл. 4. Распределение водородных заправочных станций по регионам мира

Страна	1995-2005	Построено новых в 2005
Северная Америка	44 %	65 %
Япония	15 %	15 %
Германия	14 %	0
Остальная Европа	16 %	15 %
Другие страны	11 %	5 %

Планируется строительство:

- Водородное шоссе (Калифорния) — К 2010 году 200 заправочных станций на главных шоссе штата.
- Hi Way Initiative — водородное шоссе в штате Нью-Йорк (США).
- Водородный коридор (Канада) — 900 км водородного коридора вдоль главных дорог между Монреалем и Виндзором.
- HyNor (Норвегия) — водородное шоссе между городами Осло и Stavanger (580 км) до 2008 года.
- 2H2 — водородное шоссе Иллинойса.
- SINERGY — Сингапурская энергетическая программа.
- The Northern H (Канада, США) — К 2010 году планируется соединить заправочными станциями крупные города вдоль главных торговых путей Манитобы (Канада), Дакоты, Миннесоты, Айовы и Висконсина.
- New York Hydrogen Network: H2-NET (США) — 20 заправочных станций между Нью-Йорком и Буффало (штат Нью-Йорк).
- General Motors заявляла о возможных планах строительства 12 тыс. водородных заправочных станций в городах США и вдоль главных автострад. Стоимость проекта компания оценивает в \$12 млрд.²³

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, например, HCNG. В январе 2006г. Mazda начала

²² <http://www.science-award.siemens.ru/>

²³ Ibid.

продажи биотопливного автомобиля Mazda RX-8 с роторным двигателем, который может потреблять и бензин, и водород.

В 2006 году транспортная компания BVG (Berliner Verkehrsbetriebe, Германия) объявила о закупках в 2009 году 250 автобусов MAN, работающих на водороде, что составит 20 % от автопарка компании. В середине 2008 года началась опытная эксплуатация 14 таких автобусов в Берлине.²⁴

Создание широкой водородной инфраструктуры автозаправочных станций при современном уровне технологий – крайне дорогая (порядка 5 млрд. долларов для охвата 10% автомобилей США) и в полной мере нерешенная в техническом, экономическом и в плане безопасности задача. Действительно, опасность взрывов «гремучей 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 автор поставил бы двигатели внутреннего сгорания (ДВС) на спиртах (этиловом или метиловом), которые уже серийно выпускаются и используются в Бразилии, а 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 году 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 «Нисан» 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

²⁴ <http://www.bvg.de>

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.²⁵

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 после 2008 года.

Использование водородных топливных элементов в железнодорожном транспорте.²⁶

Железнодорожный исследовательский технологический институт (Япония) планирует запустить поезд на водородных топливных элементах в эксплуатацию к 2010г. Поезд сможет развивать скорость 120 км/ч., и проезжать 300—400 км. без заправки. Прототип был испытан в феврале 2005г.

В США с 2003г. разрабатывается локомотив массой 109 т с водородным топливным элементом мощностью 1 МВт.

Использование водородных топливных элементов в водном транспорте.²⁷

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 водороде, и практически не производит шумов.

В США поставки SOFC топливных элементов для подводных лодок могут начаться в 2006г. Компания FuelCell Energy разрабатывает топливные элементы мощностью 625 кВт для военных кораблей.

²⁵ По материалам сайта <http://www.science-award.siemens.ru>.

²⁶ Ibid.

²⁷ Ibid.

Японская подводная лодка Urashima с топливными элементами PEM производства Mitsubishi Heavy Industries была испытана в августе 2003 года.

Стационарные энергетические установки.²⁸

В 2005 г. в мире эксплуатировалось 3800 стационарных энергетических установок на топливных элементах.

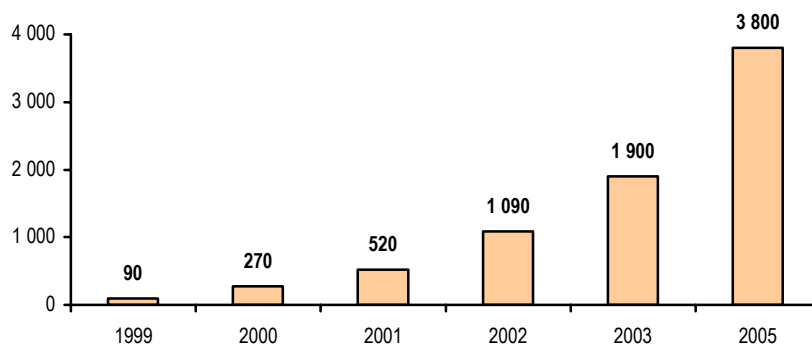


Рис. 5. Стационарные энергетические установки на топливных элементах в мире
Основная доля установок эксплуатируется в США, Японии и Западной Европе.

Доля других регионов незначительна.

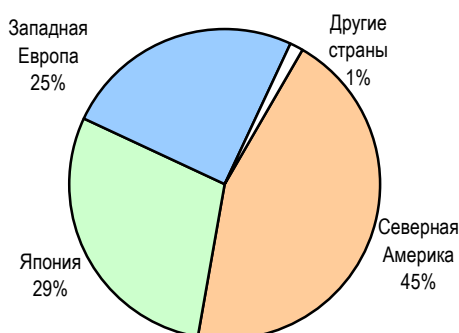


Рис. 6. Количество стационарных энергетических установок на топливных элементах по регионам мира

В большинстве установок применяются топливные элементы с протонно-обменными мембранами PEM (Proton Exchange Membrane).

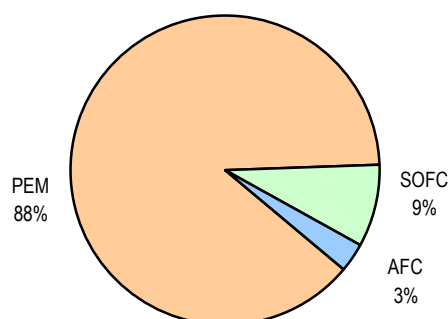


Рис. 7. Количество стационарных энергетических установок по используемым типам топливных элементов

²⁸ Ibid.

Это означает, что мощность этих установок незначительна, и они применяются в основном в быту и на малых предприятиях.

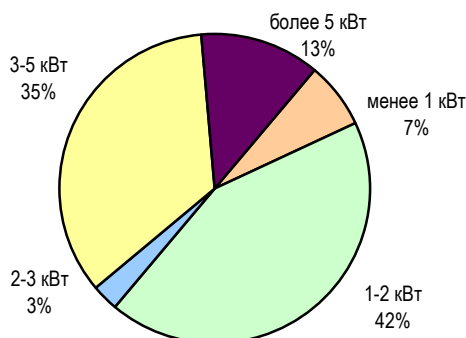


Рис. 8. Количество стационарных энергетических установок по мощностям

Под крупными стационарными установками понимают электростанции мощностью более 10 кВт. К концу 2006 года во всём мире было установлено более 800 стационарных энергетических установок. Их суммарная мощность - около 100 МВ. За 2006 год также построено более 50 установок суммарной мощностью более 18 МВт. Среди технологий производства крупных стационарных установок лидируют МСFC и РАFC. Не смотря на то, что большая часть стационарных топливных элементов в настоящее время работает на природном газе, всё большее количество установок работают с альтернативными видами топлива (сингазом, биогазом). Для повышения эффективности, снижения себестоимости энергии, и для утилизации тепловой энергии применяются установки, совмещающие топливные элементы и газовые турбины. Компания FuelCell Energy разработала гибридную версию топливного элемента и газовой турбины. В этой схеме топливный элемент производит 4/5 энергии, а остальную часть из тепловой энергии — турбина. Испытывается 40 МВт. электростанция, состоящая из 10 топливных элементов и одной турбины мощностью 10 МВт. В США и Японии планируется строительство крупных тепло-электростанций мощностью 40 — 700 МВт. двойного и тройного цикла с общим КПД более 80% и выбросами CO₂ на 30% меньше, чем на традиционных угольных электростанциях.

Основные компании-производители крупных стационарных приложений представлены в таблице:

Табл. 5. Компании - основные производители стационарных топливных элементов мощностью более 10 кВт.²⁹

Компания	Страна	Технология	Мощность установок
Ansaldo Fuel Cells	Италия	MCFC	500 кВт.-5МВт.
FuelCell Energy	США	MCFC	250 кВт.-1МВт.
GenCell	США	MCFC	40 кВт. — 100 кВт.
Ishikawajima-Harima Heavy Industries	Япония	MCFC	300 кВт.-1 МВт.
MTU CFC Solutions	Германия	MCFC	200 кВт.-3 МВт.
Fuji Electric	Япония	PAFC	100 кВт.-1МВт.
Korea Gas	Корея	PAFC	40 кВт.
UTC Fuel Cells	США	PAFC, MCFC, PEM	200 кВт., транспортные приложения
Ballard Power Systems	Канада	PEM	1 кВт.- 250 кВт.
General Motors	США	PEM	75 кВт.- 300 кВт.
Hydrogenics	Канада	PEM	7 кВт. — 65 кВт.
J-Power	Япония	SOFC	разрабатывает тройные системы: топливные элементы, газовые турбины и паровые турбины
Mitsubishi Materials	Япония	SOFC	10 кВт.
Mitsubishi Heavy Industries	Япония	SOFC, PEM	200 кВт. Также разрабатывается 700 МВт. SOFC электростанция тройного цикла
Rolls-Royce	Великобритания	SOFC	80 кВт.
Siemens AG Power Generation	Германия	SOFC	125 кВт.
Ztek	США	SOFC	25 кВт.-1 МВт.

Малыми стационарными установками являются электро- и теплостанции мощностью от 0,75 кВт. до 10 кВт. Технологии PEM (протон-обменная) и SOFC (твёрдо-оксидная) сейчас занимают основное место в производстве домашних стационарных установок. Малая энергетика постепенно становится одной из наиболее оправданных сфер применения топливных элементов. При этом по сравнению с автомобильными водородными двигателями и топливными элементами для портативной электроники малые стационарные установки рекламируются менее масштабно. Домашние энергетические станции имеют возможность производить электроэнергию в течении 8 часов, а тепло и горячую воду — 24 часов. Помимо перечисленных выше преимуществ, присущих топливным элементам в целом, популярность малых стационарных установок можно также объяснить их малыми размерами, т.е. их легко встроить в существующую инфраструктуру. Можно говорить, что существует тенденция роста объема стационарных установок в мире.

Всего в 2006 году было продано 1500 стационарных топливных элементов, при этом общий объем установленных на конец 2006 года таких элементов в мире оценивался в 5000 шт. В 2006 году большая часть малых приложений была установлена в Японии.

Основные компании-производители представлены ниже.

²⁹ По материалам сайта <http://www.cleandex.ru>.

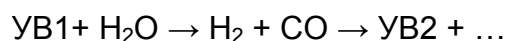
кВт.³⁰ Табл. 6.. Компании - основные производители стационарных топливных элементов мощностью менее 10

Компания	Страна	Технология	Мощность установок
Ballard Power Systems	Канада	PEMFC	1 кВт. Через совместное предприятие Ebara Ballard контролирует около 40 % рынка Японии домашних приложений
Acumentrics	США	SOFC	2 кВт.-10 кВт.
Ceramic Fuel Cells	Австралия — Великобритания	SOFC	1 кВт. Общий КПД более 80 %
Cosmo Oil	Япония	PEMFC	0,7 кВт
European Fuel Cells	Германия	PEMFC	1,5 кВт.
Fuel Cell Technologies	США	SOFC	5 кВт.
Hitachi Zosen	Япония	-	от 10 кВт. до 100 кВт. КПД 86 %
Idatech	США	-	3 кВт.-15 кВт. UPS для промышленных, телекоммуникационных, электронных приложений
Idemitsu Kosan	Япония	-	1 кВт. — 5 кВт.
Kyosera	Япония	SOFC	1 кВт.
Mitsubishi Heavy Industries	Япония	PEMFC	10 кВт.
Nippon oil corporation	Япония	технологии Ebara Ballard	1 кВт.-6кВт.-10кВт. Планирует к 2013 году ежегодно продавать 100 тыс. бытовых систем
Plug Power	США	PEMFC	5 кВт.
Sanyo Electric	Япония	PEMFC	1 кВт. Общий КПД 92% при производстве тепловой и электрической энергии
Shanghai-Shen Li	Китай	PEMFC	3 кВт. — 10 кВт
Sharp Corporation	Япония	PEMFC	10 кВт.
Toyota Motor	Япония	PEMFC	1 кВт. КПД 90%.

3. 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 – coal-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 Ув1 и последующий синтез другого углеводорода Ув2:



³⁰ По материалам сайта <http://www.cleandex.ru>.

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 (Ф-Т), разработанной еще в 20-е годы прошлого века. Всего 10 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 (в том числе и отечественных) и усовершенствованию технологии Ф-Т 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 более 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.

Цель настоящей работы не позволяет углубляться в технические детали, тем более технологии, но нельзя не отметить, что имеется множество интересных и перспективных направлений развития и применения технологий конверсии углеводородов с использованием синтез-газа (водорода). Это - и конверсия угля в метан непосредственно в пласте; и мини-НПЗ с углеводородной конверсией, которые можно ставить на кустах близкорасположенных скважин с целью преобразования метана, жирного газа, попутного газа, конденсата и нефти в более качественную синтетическую нефть или газ, по составу близкий к природному, или метанол, да еще и вырабатывать при этом электроэнергию и т.п. Остановимся только на крупных коммерческих применениях углеводородной конверсии.

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 лицензии 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 5млн 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. долларов.

4. Атомно-водородная энергетика (продвигает Минатом России и поддерживает компания «Норильский никель»)

Использование атомных реакторов для производства водорода в химической промышленности и нефтепереработке – интересная и на первый взгляд, перспективная концепция. Водород может образовываться в воде-теплоносителе за счет радиолиза и являться побочным продуктом ядерного реактора или при электролизе воды электричеством, произведенным за счет ядерной энергии.

Использование атомных реакторов для производства водорода в химической промышленности и нефтепереработке, в принципе, может оказаться рентабельным, если не учитывать стоимость разработки реактора и утилизации радиоактивных отходов. Однако даже минимальной экономической оценки рентабельности, а также и оценки уровней наведенной радиации в изготовленном таким образом водороде и сбросом CO₂ автору найти не удалось.

Поэтому концепцию атомно-водородной энергетики можно отнести к программам без надежного экономического обоснования. Если такое обоснование существует и просто не опубликовано в открытой печати, крайне желательно подвергнуть это обоснование независимой экспертизе.

5. Повышение эффективности энергетики за счет аккумуляирования энергии на электростанциях в периоды снижения потребляемой мощности (компания «Норильский никель»)

Одна из проблем энергетики, основанной на крупных электростанциях (атомных, ГЭС, ТЭЦ), состоит в наличии пиков и падений потребления энергии, невозможности быстрого регулирования станций большой мощности и необходимости запасать энергию во время спадов. Предполагается, что водородная энергетика предоставит возможность аккумуляирования этой избыточной энергии.

Пока такой подход представляется чистой фантастикой, поскольку получение и хранение соответствующих объемов водорода – опасная и дорогостоящая процедура (так, только для сжижения водорода требуется затратить около 1/3 энергии, которую можно получить при его сжигании), технологии хранения водорода далеки от стадии технологического внедрения, а тем более коммерциализации.

Использование водородных топливных элементов (ТЭ) в качестве аккумуляторов энергии ограничено небольшими мощностями (до 0,1-5 МВт), а требуются – порядка 1 гигаватта и более. Экономически ТЭ проигрывают сочетанию многих электромеханических генераторов с быстро развивающимся технологиям аккумуляторов (например, литий-ионных).

В некоторых ситуациях водородные элементы обладает значительными техническими преимуществами по сравнению с аккумуляторами, например, при необходимости высокой отдачи мощности в короткое время, однако в данном конкретном приложении таких преимуществ пока нет.. Судя по огромному количеству научных публикаций, предлагающих все новые и новые материалы и способы для хранения водорода, удачного способа, пригодного для таких крупномасштабных хранилищ, до сих пор не найдено. Достигнутый значительный прогресс в

распределенных сетях электроснабжения на Западе, где количество мини-электростанций значительно и каждая из них использует местный наиболее доступный вид топлива и легко может быть остановлена в случае излишней мощности, а нагрузка в сети оптимизируется компьютерами, сделал эту проблему нерасномерности нагрузки не столь актуальной в развитых странах.

Если сравнить удельную установочную цену на 2006 год, то получится картина не в пользу использования водородных элементов: цена водородных ТЭ равняется примерно 4 тыс. долларов за киловатт установленной мощности, мини-электростанция на газопоршневом двигателе Caterpillar - порядка 1 тыс. долларов за киловатт установленной мощности, бензиновый мотор-генератор – около 100 долларов за киловатт установленной мощности, газовый мотор-генератор – 30 долларов за киловатт установленной мощности. А если использовать дизели Ярославского завода, то обойдется еще дешевле (правда, и надежность будет ниже...).

Понятно, что для бесшумных подводных лодок, «Бурана» или спутников на геостационарной орбите эта цена не играет роли, но для массовой энергетики именно она является одним из определяющих факторов.

6. Альтернативные источники энергии

В энергетике в настоящее время используется 4 вида энергии: химическая от сжигания углеводородных ископаемых топлив в кислороде воздуха, ядерная от расщепления ископаемого изотопа урана-235, солнечная (в т.ч. ветровая, гидро, прибойная, биотоплива) и геотермальная. Под альтернативными источниками подразумевается широкий круг технических предложений, в основном по использованию новых источников углеводородного сырья и способов утилизации солнечной энергии. Так, уже промышленно производится биоэтанол как топливо, добывается нефть из битуминозных песков и ведется экспериментальная добыча газогидратов. Используются тепловые насосы для отопления домов за счет грунтового тепла.

В некоторых технологиях может использоваться водород, как носитель энергии или промежуточное звено физико-химических процессов. Например, может рассматриваться производство водорода бактериями и т.п. В этой области имеется множество идей, публикаций и предложений. Полноценный анализ этой области выходит за рамки данной статьи.

Если текущие высокие цены на нефть удержатся продолжительное время (а пока не видно ни одной причины, почему они могут снизиться в длительной

перспективе), уже сегодня производство биоэтанола и солнечная энергетика в южных широтах вполне конкурентоспособны в сравнении с углеводородной энергетикой. На ветровых установках промышленно производится энергия с использованием солнечных батарей и тепловых насосов (как геотермальных, так и равнинных). Многие из этого уже экономически оправдано.

В солнечной энергетике (и других источниках возобновляемой энергии – ветровой, приливной, геотермальной) требуется не столько снижение себестоимости производства энергии, сколько высокоэффективные аккумуляторы энергии, которые обещает дать водородная энергетика. Но в этой области способы производства и хранения водорода пока проигрывают по ценовым и другим показателям, например, ионно-литиевым аккумуляторам.

7. Программы по развитию водородной энергетике в мире

Водородная энергетика сформировалась как одно из направлений развития научно-технического прогресса более 30 лет назад. Работы по водородной энергетике во многих странах относятся к приоритетным направлениям социально-экономического развития и находят все поддержку как со стороны правительств, так и частного бизнеса. Ведется активный поиск путей перевода большинства энергоемких отраслей промышленности, включая транспорт, на водородные ТЭ.

США

Работы по водородной энергетике курируются министерствами энергетики и транспорта. Для согласования усилий двух министерств создана межведомственная рабочая группа под руководством Управления по научно-технологической политике при президенте США.

Министерство энергетики ведет активную работу по разъяснению политики правительства частному сектору и различным общественным организациям, совместно с которыми в ноябре 2002 года была представлена долгосрочная программа перехода к водородной экономике (National Hydrogen Energy Technology Roadmap).

В 2003 году президент США Дж. Буш провозгласил «Инициативу в области водородного топлива» (President's Hydrogen Fuel Initiative), в соответствии с которой в 2004-2008 гг. суммарно было выделено \$1,2 млрд. на работы в области водородной энергетике.

Табл. 7. Бюджетные ассигнования на водородные исследования.

Направления программы	Расходы на программу, \$ млн.			
	2004	2005	2006	2007
Фундаментальные исследования	0	29	33	50
Производство и доставка водорода	19	32	49	79
Хранение водорода	14	22	26	35
Топливные элементы	54	56	33	57
Разработка технологий	16	26	33	40
Научные разработки на производстве	0	0	0	2
Разработка стандартов	6	6	6	15
Образование	2	0	0,5	2
Системный анализ	1	3	5	10
Прямые фонды Конгресса	44	47	47	0
Итого	156	221	233	290

Источник: Hydrogen Posture Plan, 2006, U.S. Department of Energy (DOE).

В соответствии с интегрированным планом проведения НИОКР и демонстраций в области водородной энергетики (Hydrogen Posture Plan) предполагается четырехэтапный переход к водородной энергетике к 2030–2040 гг.



Рис. 9. Этапы перехода к водородной энергетике в США.

1. Первый этап – отработка технологий – предусматривает проведение исследований и отработку технологий с учетом требований потребителей.

В соответствии с планом Министерства энергетики, федеральное правительство будет занимать ключевое положение в процессе освоения новых технологий в краткосрочной перспективе, пока они будут находиться в стадии разработки и демонстрации на относительно узких рынках.

2. Второй этап – первичный выход на рынок – связан с началом коммерциализации переносных и стационарных водородных энергетических систем,

транспортных средств, работающих на водородном топливе, и началом инвестирования в формирование инфраструктуры.

В среднесрочной перспективе правительство возьмет на себя функции по ранней адаптации новых технологий и выработке политики, которая будет способствовать развитию возможностей промышленности по обеспечению поставок на рынок значительных объемов водородного топлива.

3. На третьем этапе – инвестиции в создание инфраструктуры – водородные энергетические и транспортные системы станут коммерчески доступными.

Роль промышленности в освоении новых водородных технологий на более третьем и четвертом этапах начнет постепенно становиться доминирующей.

4. В ходе четвертого этапа – построение развитой инфраструктуры и рынка – водородные энергетические и транспортные системы становятся коммерчески доступными во всех регионах страны, сформирована национальная инфраструктура водородной энергетики.

Япония

Правительство Японии поддерживает работы в области водородной энергетики с начала 1980-х годов. В 1993-2002 гг. в стране осуществлялась национальная программа в области водородной энергетики (World Energy Network – WE-NET), в рамках которой был выполнен ряд краткосрочных и долгосрочных проектов в области отработки технологии производства, хранения, транспортировки и использования водорода, а также разработаны три типа заправочных станций.

В 1999 году для координации усилий правительства, промышленности, национальных исследовательских институтов и академических кругов в Японии была учреждена Группа советников по стратегии освоения и коммерциализации водородных топливных элементов (Fuel Cell Strategy Advisory Panel – FCSAP). Группа установила целевые ориентиры развития водородной энергетики в Японии.

Табл. 8. Целевые ориентиры развития водородной энергетики Японии.³¹

Год	Транспортные средства на основе топливных элементов, ед.	Генерируемая мощность стационарных установок на топливных элементах, МВт	Время работы топливных элементов
2005-2010	50 тыс.	2 100	Для стационарных установок – более 40 тыс. час.
2010-2020	5 млн.	10 000	Для транспорта – более 5 тыс. час.

Расходы правительства Японии на проведение НИОКР в области водородной энергетики составили в 2002 г. \$184 млн., в 2003 г. – \$268 млн., в 2005г. - \$300 млн.³²

³¹ Кузык Б.Н. Россия и мир в XXI веке / - М.:Институт экономических стратегий, издание второе, 2006. С. 602.

В 2002 г. в Японии началось осуществление проекта по демонстрации и испытанию транспортных средств и стационарных приложений на основе топливных элементов (Japan Hydrogen and Fuel Cell Demonstration Project). Построен специальный парк с демонстрационным залом, гаражом и заправочной станцией.

В 2003 году в Токио и Иокогаме открылось пять заправочных станций, использующих различные способы получения водорода. В 2004 г. открыты еще три аналогичные станции. Среди участников проекта – крупнейшие японские и иностранные автомобильные производители Toyota, Honda, Nissan, General Motors и Daimler Chrysler. В 2003 г. к проекту присоединились Mitsubishi и Suzuki.

С 2005 года Япония становится мировым лидером по числу установленных малых стационарных приложений мощностью от 0,75-10 кВт, используемых для производства электрической и тепловой энергии в бытовых целях (подогрев воды, отопление).

Европейский союз

Значительный интерес к развитию водородной энергетики проявляется в последние годы в странах ЕС.

Финансирование работ в области водородной энергетики осуществляется Евросоюзом с 1988 года, когда на проведение исследований 1988-1992 гг. было выделено 8 млн. евро. Руководством Евросоюза поставлена задача обеспечения к 2050 году построения интегрированной водородной экономики, основанной на использовании возобновляемых источников энергии.

В 2004 году началась реализация программы «Европейская технологическая платформа в области водородной энергетики и топливных ячеек» (European Hydrogen and Fuel Cells Technology Platform, HFP).

Цели программы HFP:

- ускоренное развитие и развертывание конкурентоспособных европейских энергетических систем и технологий на основе водородных топливных элементов для применения на транспорте, а также в качестве стационарных и переносных источников энергии;
- эффективная координация и баланс интересов общеевропейских, национальных, региональных и местных программ и инициатив, активное участие государственных ведомств, исследовательских организаций, промышленных предприятий, финансовых структур, граждан.

Задачи программы HFP:

³² Кузык Б.Н. Россия и мир в XXI веке / - М.:Институт экономических стратегий, издание второе, 2006. С. 601.

- организация социально-экономических и технологических исследований по водородной энергетике в Европе;
- стимулирование государственных и частных инвестиций на проведение НИОКР, изучение рыночного потенциала водородной энергетике;
- содействие формированию энергетической инфраструктуры и услуг, укрепление будущей кооперации как в Европе, так и в глобальных масштабах.

На исследования в рамках программы HFP в период 2002-2006 годов Еврокомиссия и частные инвесторы на паритетной основе направили около 184 млн. евро, в том числе:

- 124 млн. евро – 10 проектов развития водородных технологий;
- 60 млн. евро – 6 проектов разработки водородных топливных элементов.

Ожидается, что в ближайшие годы Евросоюз выделит еще 150 млн. евро. С учетом инвестиций промышленных предприятий суммарный объем финансирования может составить 300 млн. евро.

Табл. 9. Прогноз развития водородных технологий и топливных элементов в странах ЕС к 2020 году.

Показатель	Топливные элементы			
	для ручных электроприборов	переносные генераторы	стационарные (для выработки тепла и энергии)	для дорожного транспорта
Кол-во продаваемых в ЕС в ср. за год водородных топливных элементов	ок. 250 млн.	ок. 100 тыс.	ок. 100-200 тыс.	0,4-1,8 млн.
Суммарные продажи к 2020 г.	данных нет	окт. 600 тыс.	400-800 тыс.	данных нет
Ожидаемое состояние рынка к 2020 г.	существует	существует	находится в стадии роста	массовый выход на рынок
Средняя мощность системы топливных элементов	15 Вт	10 кВт	350 кВт	
Ценовой ориентир для системы топливных элементов	1-2 Евро/Вт	0,5 Евро/Вт	1-1,5 Евро/Вт	менее 0,1 Евро/Вт

Табл. 10
Этапы реализации программы «Европейская технологическая платформа в области водородной энергетики и топливных ячеек»

	2000 Экономика, базирующаяся на ископаемом топливе	2010	2020	2030	2040	2050 Экономика, базирующаяся на использовании водорода
	Исследования, испытания <ul style="list-style-type: none"> Государственные проекты и инициативы частных компаний Фундаментальные и прикладные исследования Демонстрационные транспортные средства и электрогенераторы на ТЭ Производство, транспортировка и использование водорода 			Государственное финансирование и инвестиции частных компаний <ul style="list-style-type: none"> Крупномасштабная коммерциализация Получение, транспортировка и хранение водорода Практическое применение ТЭ 		
Получение и транспортировка водорода	Производство водорода посредством преобразования природного газа и электролиза	Локальные кластеры водородных АЗС, транспортировка водорода, локальное производство водорода на АЗС (преобразование и электролиз)	Водород производится из ископаемого топлива с секвестрацией углерода Кластеры локальных водородных сетей	Инфраструктура водородных сетей Взаимосвязь локальных распределительных водородных сетей; увеличение производства водорода из возобновляемых источников, вкл. газификацию биомассы	Увеличение безуглеродного производства водорода; возобновляемые источники, ископаемое топливо с секвестрацией, новое ядерное топливо	Непосредственное получение водорода из возобновляемых источников; безуглеродное водородное общество
Разработка и внедрение водородных систем и топливных элементов	Стационарные высокотемпературные системы ТЭ (ТЭ на расплаве карбоната/твердоокисные ТЭ) (<500 кВт); разработка двигателей внутреннего сгорания на водороде; демонстрационные парки автобусов на ТЭ Коммерческие ниши для стационарных систем низкотемпературных ТЭ (<50 кВт)	Серийное производство транспортных средств на ТЭ для автомобилей (прямое преобразование водорода) и другого транспорта (суда); топливные элементы для вспомогательных энергосистем (вкл. преобразователь) Стационарные низкотемпературные системы ТЭ (<300 кВт)	Системы дешевых высокотемпературных ТЭ; коммерческие ТЭ в микроприложениях; конкурентоспособные пассажирские автомобили на ТЭ; коммерческие гибридные и атмосферные твердоокисные ТЭ (<10 МВт) Первые водородные парки (первое поколение водородных машин)	Значительный рост генерации энергии с использованием ТЭ Второе поколение бортовых хранилищ водорода для длительных перевозок	Топливные элементы – доминирующая технология на транспорте, в распределенных генераторах мощности и микроприложениях Водород как первичное топливо для транспортных средств на ТЭ	Использование водорода в авиации

8. Проекты нефтегазовых компаний в области водородной энергетики.³³

BP

BP разработана технология производства водородной энергии, в которой в качестве исходного сырья для производства водорода и углекислого газа используются уголь, нефть или природный газ. Водород используется для генерации электроэнергии, углекислый газ закачивается обратно в пласты для поддержания давления.

Первая водородная электростанция планируется к строительству в Шотландии. Ее мощность составит 475 МВт, что позволит обеспечить электроэнергией более 700 тыс. домов.

В феврале 2006 г. BP объявила о начале аналогичного проекта на основе кокса. Одна из целей проекта – продемонстрировать широкие возможности применения данной технологии.

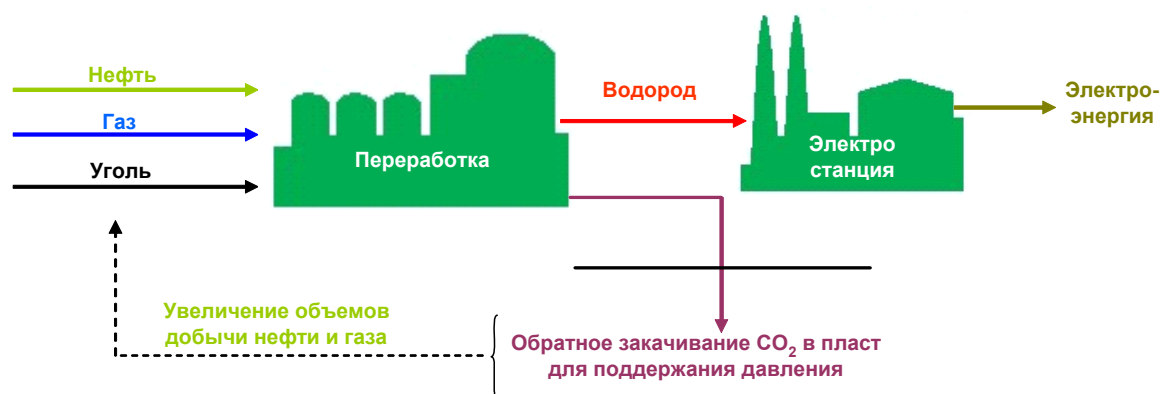


Рис. 10. Проект BP по водородной энергетике

BP участвует в европейском проекте CUTE (Clean Urban Transport for Europe – экологически чистый городской транспорт для Европы), в рамках которого в Амстердаме, Лондоне, Мадриде, Стокгольме, Барселоне, Гамбурге и Штутгарте началась эксплуатация автобусов на водороде.

В настоящее время в Амстердаме действует три автобуса на водороде, который производится на территории автобусного парка из дистиллированной воды посредством гидролиза (разложения на водород и кислород). Для производства 1 кг водорода требуется 11 м³ воды. Заправка автобуса водородом занимает 3-5 минут. Максимальный объем заправки – 42 кг, что обеспечивает пробег 200-220 км.

³³ По материалам сайтов соответствующих компаний.

Из-за веса оборудования, установленного на крыше автобуса (примерно 2,5 т), число пассажиров сокращено со 100 до 60.

Главный недостаток водородных автомобилей – стоимость производства, так как они собираются вручную. Стоимость водородного автомобиля составляет \$1-1,5 млн., автобуса – \$3 млн. В этой связи все водородные проекты могут быть реализованы только при условии предоставления государством налоговых льгот.

Royal Dutch Shell

Дочерняя компания Shell Hydrogen ведет разработку технологий использования водорода и их продвижения на рынок. Совместно с шанхайским университетом Tongji планируется строительство в Шанхае водородной автозаправочной станции. Аналогичное соглашение подписано с японской газовой компанией Tokyo Gas.

RD Shell участвует так же как и BP участвует в европейском проекте CUTE.

Chevron

Работы в области альтернативной энергетики, в т.ч. водородной, ведет дочерняя компания Chevron Energy Solutions. При штаб-квартире компании в Калифорнии действует исследовательская лаборатория по топливным элементам, где действует опытная установка.

В 2005-2006 гг. Chevron ввела в строй 6 водородных АЗС в США. Производство водорода на АЗС осуществляется из природного газа в объеме до 150 кг водорода в сутки – этого объема достаточно для заправки трех автобусов и 10 автомобилей.

Statoil

На испытательном полигоне Statoil Hydrogen Planet в Норвегии проводятся испытания транспортных средств, работающих на водороде.

Компания реализует проект HyNor, предусматривающий сооружение т.н. «водородной дороги» длиной около 500 км между Осло и Ставангером, на которой будут расположены пять водородных АЗС. Первая АЗС была открыта в августе 2006 года. Строительство всей сети планируется завершить в 2009 году.

9. Состояние работ по водородной энергетике в России

Россия имеет уникальные достижения в области разработки ТЭ. Однако в настоящее время имеющиеся возможности не используются в достаточной мере.

Основные причины, препятствующие работам в России по ТЭ и водородной энергетике:

- отсутствие национальной программы по разработке и производству ТЭ и энергетических установок на их основе;
- отсутствие целевого государственного финансирования фундаментальных и прикладных исследований и разработок в области ТЭ. (Ранее они финансировались в рамках ракетно-космических программ);
- неразвитость и неготовность промышленной базы для производства ТЭ и энергетических установок на их базе;
- неготовность частного бизнеса по-настоящему субсидировать фундаментальные и прикладные исследования;
- отсутствие четкой и ясной государственной политики и реальной поддержки работ по экологически чистым ресурсо- и энергосберегающим технологиям.

Значительно отставая в области традиционных технологий, Россия на уровне системного понимания проблемы топливных элементов несколько не уступает Западу. Традиционные технологии, несмотря на огромные вложения, до сих пор не позволили Западу и Японии создать топливные элементы коммерческого уровня. Российские ученые предлагают обгонять Запад, используя российские разработки в области нанотехнологий, направленного синтеза материалов, тонкопленочных, лучевых технологий.

В 2003 году ОАО ГМК "Норильский никель" и Российская Академия наук договорились о совместных работах по развертыванию и финансированию наиболее важных фундаментальных, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по основным направлениям.

Табл. 11. Основные российские научно-исследовательские организации, участвующие в работах по водородной энергетике и топливным элементам

1.	Институт катализа им.Г.К.Борескова Сибирского отделения РАН	Твердо-оксидные ТЭ, катализаторы, топливные процессы - устройства риформинга углеводородных топлив	г.Новосибирск
2.	Институт высокотемпературной электрохимии УО РАН	Высокотемпературные твердо-оксидные топливные элементы и устройства на их основе	г.Екатеринбург
3.	Институт нефтехимического синтеза имени А.В.Топчиева РАН	Производство и очистка водорода	г.Москва
4.	Институт металлофизики и функциональных материалов имени Г.В.Курдюмова РАН	Технология хранения водорода на базе металлгидридных систем и наноструктур (фуллеренов)	г.Москва

5.	Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН	Технология получения многослойных пористых кремниевых мембран для ТЭ и кремниевых каталитических подложек для риформинга углеводородного топлива и получения водорода	г.Черноголовка, Московской обл.
6.	Институт элементоорганических соединений имени А.Н.Несмеянова РАН	Исследование и разработка опытно-промышленных образцов высокотемпературных ТЭ на основе конденсатных полимеров	г.Москва
7.	Институт машиноведения Уральского отделения РАН	Интегрированные системы получения, аккумулирования, хранения и снабжения водородом	г.Екатеринбург
8.	ФГУП Уральский электрохимический комбинат	Электрохимические генераторы на базе щелочных и протон-обменных ТЭ	г.Новоуральск, Свердловской обл.
9.	Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский НИИ экспериментальной физики (ФГУП РФЯЦ — ВНИИЭФ)	Энергетические установки на основе ТЭ с протон-обменными мембранами	г.Саров, Нижегородской обл.
10.	Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский НИИ технической физики имени Е.И.Забабахина (РФЯЦ – ВНИИТФ)	Энергетические установки на основе твердо-оксидных ТЭ	г.Снежинск, Челябинской обл
11.	Российский научный центр «Курчатовский институт»	Производство, аккумулирование, хранение и снабжение водородом. Твердо-полимерные ТЭ	г.Москва
12.	Государственный научный центр РФ Физико-энергетический институт имени А.И.Лейпунского	Твердо-оксидные ТЭ и энергетические устройства на их основе	г.Обнинск
13.	ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им.С.П.Королева»	Энергетические устройства на базе ТЭ для автотранспорта и бытовых нужд	г.Королев, Московской обл.
14.	ОАО «Специальное конструкторское бюро котлостроения»	Энергетические устройства на базе ТЭ	г.Санкт-Петербург

Заключение

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 механическую 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 долларов из примерно 100 млрд долларов 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 оксидные 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 микротурбины 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 после 2010 года. 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, коммерчески доступная новая энергетика потребует уже через 5-10 лет, и/или нужен эквивалентный прорыв в энергосберегающих технологиях. Водородная энергетика пока к этому не готова.

Снижение выбросов CO₂, как основная цель водородной энергетики, 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, многочисленные утверждения политиков, маркетологов от политики и просто промышленных лоббистов о безбрежных перспективах ВЭ, к сожалению, не выдерживают даже той поверхностной критики, которая приведена в данной статье.

С другой стороны, нельзя отрицать высокие научные и технологические достижения Российских разработчиков водородной энергетики. Достаточно беглого взгляда на содержание Табл. 11, где перечислены только названия некоторых выдающихся разработок, которые сыграли значительную роль в развитии не только и не столько водородной энергетики, сколько прикладных областей. В рамках данной статьи просто нет места для детального рассмотрения этих результатов на достойном техническом уровне.

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