

26.22  
365

Энергия -  
Вода -  
Эволюция

Москва · 2008

СА-342940

ЭНЕРГЕТИКА  
В ГЛОБАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ  
ПРИРОДА — ОБЩЕСТВО — ЧЕЛОВЕК



ИНСТИТУТ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ  
СТРАТЕГИИ



ИНСТИТУТ  
ГЛОБАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ  
ЭКОЛОГИИ И  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

ЭНЕРГИЯ —  
ВОДА —  
ЭВОЛЮЦИЯ

(под редакцией профессора В.В. Бушуева)

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ КУЛЬТУРЫ

"ОРЕНБУРГСКАЯ ОБЛАСТНАЯ  
УНИВЕРСАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА  
им. Н.К. Крупской"

ИАЦ «Энергия»  
Москва — 2008

ca-342940

15

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	4
Глава 1. Энергетическая основа развития .....	12
Глава 2. Происхождение воды и ее роль в геопланетарной эволюции Земли .....	35
Глава 3. Важнейшие физико-химические и структурно-энергетические свойства воды .....	44
Глава 4. Круговорот воды на планете .....	64
Глава 5. Человек и вода .....	72
Глава 6. Водопотребление и климат .....	76
Глава 7. Электромеханическая основа климатических изменений и циклонической деятельности на Земле .....	93
Глава 8. Топливные элементы и водородная энергетика .....	110
Глава 9. Гидроэнергетика и ее роль в перспективном энергобалансе мира и России .....	123
Заключение .....	138

## ГЛАВА 8.

### ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Человек в процессе своей жизнедеятельности многое интуитивно или осознанно заимствует у природы. В первом случае говорят, что тот или иной автор изобрел что-то новое; во втором — повторил в рукотворном виде то, что обнаружил в естественной природной среде. Но и в том и другом случае, как правило, совершается новый качественный скачок в создании энергопреобразователей, что сопровождается изменением и массы и структуры используемого вещества. Но все эти процессы происходят в человеко-машинных (эргатических) системах подобно социоприродным явлениям в нашем общепланетарном доме — Экосе. Поэтому эволюция системы означает не просто повторение того, что уже существовало в природе, а инновационный процесс, связанный с совершенствованием структуры энерго-, массообмена.

Заложенные в новых технологиях принципы энергопреобразования, заимствованные у природы, с помощью человека-творца позволяют существенно повысить КПД этого преобразователя. Это позволяет получать тот же результат с меньшими затратами природных ресурсов, либо — при тех же исходных затратах получать больший результат как в количественном, так и в качественном выражении.

Большой — в том смысле, что этот результат обладает большим потенциалом, т.е. способностью производить больше новой полезной работы. И осуществляется это, в основном, за счет непрерывного совершенствования структуры ЭП, повышения структурной энергии ( $\Phi$ ) системы.

Общий принцип эволюции, как было показано ранее, соответствует условию  $\Phi > 0$ . Другими словами — отдать больше, чем взять. Причем отдать как тому, у кого взяли — т.е. природе, так и грядущим поколениям — социуму, которому предстоит развиваться не за счет экстенсивного, а за счет интенсивного преобразования своего Дома — Экоса.

В этом доме должно быть не только светло и тепло, но и чисто и уютно — удобно для жизни. Последнее обстоятельство озна-

чает не противостояние человека и природы, а их гармоничное со-развитие.

Поэтому будущее связано как с энергообеспечением, так и жизнеобеспечением человечества. А жизнеобеспечение — это и пища, и ВОДА, и коммуникативность людей, и жизненный комфорт и уют.

Вода и энергия, как главные условия существования и развития человеческого сообщества в гармонии с природой, должны не просто разумно (эффективно) потребляться из природных ресурсов, но и должны стать единой целевой задачей индустриального и постиндустриального развития.

Поэтому энергия будущего — это не производство киловатт-часов или других единиц для оценки полезной работы, это одновременно и решение водно-энергетических проблем, т.е. минимальный расход и максимальное воспроизводство водных и энергетических ресурсов в их качественном виде.

Говоря о такой стратегической задаче эволюции социума, следует отдать предпочтение не тепловой и атомной энергетике, которые производят энергию, потребляя при этом большое количество невозобновляемых водных ресурсов, а энергетике, основанной на возобновляемых водных ресурсах, в т.ч. гидроэнергетике, химической и водородной энергетике.

Следует понимать, что эти виды энергии, в частности, водородная энергетика, не являются каким-либо принципиально новым источником энергии, альтернативным обычной «топливной энергетике». Их будущее связано не с якобы предстоящим истощением запасов нефти и газа. Ведь для получения водорода нужно затратить энергию, количественно даже большую, чем можно получить после его сжигания (окисления) в смеси с кислородом. Но этот вид трансформированной энергии обладает потенциально новым эффектом — эффектом накопления, возможной транспортировки и экологически чистого «сжигания» в местах его потребления — как правило, в больших мегаполисах или зонах рекреации. Другой немаловажный эффект этого вида энергии заключается в том, что при сжигании водорода вновь получается вода, являющаяся в местах использования этих энергоисточников не меньшим дефицитом.

Так, применение разработанных НПО «Энергия» химических источников тока (топливных элементов), на отдаленных нефтепромыслах в болотах Западной Сибири оказалось эффективным не только с точки зрения получения необходимой на месте энергии, но, что оказалось еще более важным, с точки зрения дополнительного образования пресной воды, дефицитной в данном регионе.

На наш взгляд, именно это водно-энергетическое назначение и роднит топливные элементы и водородную энергетику, в основе которых лежит один и тот же эффект химического окисления водорода.

Химические источники тока, вырабатывающие электрический ток за счет окислительно-восстановительной реакции, протекающей на электродах, разделяются на гальванические элементы однократного действия, аккумуляторы — многократно восстанавливающие свой потенциал за счет подзарядки, и **топливные элементы** с непрерывной подачей реагентов на электроды.

История создания топливных элементов началась в 1839 г., когда английский ученый У. Гров, пропуская электрический ток через два платиновых электрода, опущенные в раствор серной кислоты, получил на одном электроде водород, а на другом — кислород. В свою очередь, эти реагенты вновь вступали в реакцию «холодного» горения — окисления водорода с выделением энергии.

Подобные процессы имеют место и в биохимии. Биологический водородно-кислородный топливный элемент «вмонтирован» в каждую живую клетку. Источником водорода в организме является пища, которая в процессе пищеварения раскладывается до мономеров, дающих в конечном итоге биологический «топливный» ресурс. Кислород из воздуха через легкие попадает в кровь и разносится по всему телу. Процесс соединения водорода с кислородом составляет основу биоэнергетики организма. Химическая энергия окисления водорода с высоким КПД преобразуется в тепло, механическую энергию (движения мышц), электрические импульсы, распространяющиеся по нервным волокнам — «проводам».

Человек, может быть, и неосознанно в очередной раз повторил созданное природой устройство получения энергии, когда

первичное энергетическое воздействие (электролиз раствора) посредством сконструированного человеком устройства, обладающего структурным потенциалом, приводит к выработке электролизером (ТЭ) «нового» электрического тока. И природа и человек рациональны в своих действиях — они создают энергопреобразователи, в которых именно за счет структурной организации «машины» происходит трансформация первичной энергии в конечный продукт — электрическую энергию с высоким КПД.

Энергетический КПД ТЭ значительно выше, чем у традиционных энергоустановок, основанных на процессах горения топлива, и может достигать 90%. Связано это с тем, что благодаря химической реакции прямого окисления водорода в ТЭ удастся избежать малоэффективной (в энергетическом отношении) реакции сжигания углерода. Если при горении происходит хаотический обмен электронами между атомами углеродосодержащего топлива (уголь, нефть и газ) и кислорода воздуха, то в процессе химической реакции в ТЭ происходит направленное движение электронов между электродами, на которых концентрируются атомы водорода и кислорода (цит. по кн. Лаврус В.С. «Источники энергии» — К.: НИТ, 1997).

Процессы получения электричества с помощью ТЭ принципиально отличаются от процессов, использующих процессы горения.

Химические реакции в ТЭ идут на специальных активированных катализаторах пористых электродах (аноде и катоде) по схеме:

1. Водород поступает на анод ТЭ, где его атомы разлагаются на электроны и протоны.
2. Электроны поступают в электрическую цепь, создавая ток.
3. Протоны проходят через полимерную электролитическую мембрану.
4. Кислород (из окружающего воздуха) поступает на катод и соединяется с протонами и электронами водорода, образуя воду.
5. Побочными продуктами реакции являются тепло и водяной пар.

Напряжение, возникающее на отдельных ТЭ, не превышает 1,1 вольт. Для получения необходимой величины напряжения отдельные элементы соединяются последовательно в батареи, а для получения необходимой мощности батареи соединяются параллельно. Эти батареи вместе с элементами газораспределения и саморегулирования образуют структурную группу, обладающую достаточным энергетическим потенциалом. Эти устройства и получили общее название топливных элементов, входящих в общую группу электрохимических источников тока. Существует значительное число разновидностей ЭХТ и ТЭ, отличающихся, главным образом, способом получения водорода.

## СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА

Водород и основанная на его использовании водородная энергетика не являются принципиально новым энергетическим ресурсом и поэтому не создают альтернативы традиционной топливной энергетике. Для промышленного получения водорода необходимы предварительные затраты энергии, которые окупаются затем посредством более эффективного использования этого промежуточного энергоносителя. В то же время разнообразие способов получения водорода позволяет диверсифицировать энергетические ресурсы, как топливные, так и нетопливные, для развития водородной энергетики.

Среди этих способов можно выделить:

- паровую конверсию метана и природного газа;
- газификацию угля;
- электролиз воды;
- пиролиз;
- частичное окисление;
- биотехнологии.

Многие из этих технологий, а также способов применения водорода, достаточно подробно описаны в литературе (см., например, материалы из интернетовской Википедии — свободной энциклопедии).

Поэтому остановимся на этом вопросе с акцентом на те технологии, которые так или иначе связаны с водно-энергетическими трансформациями.



В настоящее время мировое производство и потребление водорода составляет около 50 млн т в год и быстро растет (10% в год). Большая часть (60%) промышленного производства водорода основана на паровой конверсии метана (природного газа). Водяной пар при температуре 750...900 °С, смешиваясь с природным газом под давлением в присутствии катализатора, обеспечивает отделение водорода от углеродной основы в метане. На следующей стадии оставшийся моноксид углерода и остывший до 200...250 °С водяной пар в результате химической «реакции сдвига» образует «дополнительный» водород и диоксид углерода. Основные трудности — это высокие затраты первичной энергии на получение высокотемпературного водяного пара. И одно из главных направлений технологического совершенствования этого процесса — использование новых материалов и схем, позволяющих снизить эти затраты при соответствующей структурной организации процесса.

**Газификация угля** (без доступа воздуха) позволяет получать подогретый до 800 °С газ, из которого аналогично можно получить и водородно-углеродную смесь с последующей их сепарацией.

Уже сегодня себестоимость производства 1 кг водорода из угля и метана составляет 2...2,5 дол.

**Водород из биомассы** получают термохимическим либо биохимическим способом.

В первом случае биомассу нагревают без доступа кислорода до 500...600 °С (для отходов древесины), что намного ниже температуры процесса газификации угля. В результате процесса получают  $H_2$ , CO и  $CH_4$ .

В биохимическом процессе водород вырабатывают различные бактерии. Водородобразующие микроорганизмы могут обеспечить выход 200...300 мл водорода на 1 г сухой массы.

**Биофотоллиз** — разложение воды на водород и кислород с участием микробиологических систем в виде водорослей. В 90-х гг. XX века было показано, что обычный фотосинтез при определенных условиях (в частности, при дефиците серы) приводит к тому, что водоросли преобразуют солнечный свет не в кислород, а переключаются на производство водорода.

Разработанный в 2006 г. в университете города Карлсруэ био-реактор подтвердил не только техническую, но и экономическую приемлемость биофотолиза.

При этом ферма водородосодержащих водорослей была бы в 10 раз меньше по размерам, чем площадь для выращивания сои для этанола в качестве моторного топлива.

Но основным на весьма длительную перспективу является способ получения водорода путем электролиза воды.

Химическая реакция  $H_2O + \Delta\mathcal{E} = 2H + O$  разложения воды под воздействием энергии ( $\Delta\mathcal{E}$ ) — это реакция обратная окислению водорода в среде кислорода. При определенных условиях все химические реакции обратимы, в т.ч. и эта.

*Электрохимический способ получения водорода из воды* обладает рядом несомненных положительных качеств:

- общедоступность и неисчерпаемость исходного сырья — воды (в мировом океане содержится более  $1 \cdot 10^{13}$  т водорода и  $2 \cdot 10^{13}$  т дейтерия);
- высокая чистота получаемого водорода (до 99,99% — без вредных углеродосодержащих примесей);
- принципиальная простота технологического процесса, не требующая каких-либо катализаторов, ферментов и т.п.;
- получение кислорода, который может быть использован в дальнейшем не только в ТЭ для окисления — «холодного» горения водорода, но и как ускоритель многих энерготехнологических процессов, очиститель и оздоровитель водоемов и промышленных стоков;
- получение в процессе электролиза «тяжелой воды» как замедлителя нейтронов в атомных реакторах и в качестве сырья для получения дейтерия для термоядерной энергетики;
- экологическая чистота и безопасность самого процесса электролиза в сочетании с возможным сопряженным процессом (обратной реакцией соединения кислорода с водородом), в результате которого вновь образуется чистая (опресненная) вода и выделяется энергия.

При этом следует иметь в виду, что физические затраты энергии на получение водорода всегда будут выше, чем чисто энергетическими трансформациями.

тический эффект от его последующего использования. Но с учетом ценности различных видов первичной энергии и конечного водородного топлива, применяемого хотя и не повсеместно, а в основном в экологических целях, этот эффект может быть весьма значителен. На наш взгляд, водородная энергетика значима еще и потому, что она дает не только энергетический выход, но и воспроизводство запасов пресной воды на Земле.

Поэтому основные усилия специалистов по водородной энергетике направлены сегодня на получение новых более энергоэкономичных технологий электролиза воды, а также на разработку способов эффективного энергетического использования получаемого водорода.

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Основные преимущества водорода по сравнению с углеводородным топливом сводятся к следующему.

→ Диверсификация возможных источников водорода. Суммарная масса водорода (в мировом океане, запасах природных углеводородов, в вулканических газах, биомассе) составляет 1% общей массы нашей планеты, а технический ресурс этого вида топлива составляет десятки миллиардов тонн, превышая запасы традиционных углеводородов.

→ Возможность аккумулирования энергии и транспортировки топлива к местам его массового потребления. Трубопроводный транспорт газообразного водорода дешевле воздушной электропередачи такого же количества энергии.

→ Высокая теплотворная способность водорода — почти в 3 раза выше по сравнению с бензином.

→ Излучение пламени в 10 раз меньше по сравнению с пламенем углеводородов.

→ Возможность прямого преобразования энергии «холодной» химической реакции слияния водорода и кислорода непосредственно в электрическую энергию в т.н. топливных элементах.

→ Экологичность. При использовании водорода взамен моторного топлива не происходит выбрасывания в атмосферу вредных токсичных веществ.

→ Возможность наряду с получением энергии образования опресненной воды, что может стать в будущем более важной задачей.

→ Универсальность данного вида топлива. Он может заменить моторное топливо на всех видах транспортных средств, пригоден для воздушно-реактивных и ракетных двигателей, применяется как в «большой» энергетике, так и в установках автономного питания наиболее ответственных потребителей, в т.ч. для мобильных телефонов и ноутбуков.

В то же время нельзя гипертрофировать возможности водородной энергетики, представлять ее как альтернативную углеводородной топливной энергетике. Во-первых, водород является не первичным, а производным энергоносителем, на получение которого расходуется значительное количество обычных углеводородов (газа и угля). А при электролизе требуются затраты электроэнергии несравнимо большие, чем величина энергии, получаемая в водородных генерирующих установках.

Высокая удельная стоимость водородных ТЭ обусловлена необходимостью применения дорогостоящих мембранных пластин, сложной структурой самих устройств, требующей высокотехнологичного подхода к их созданию и эксплуатации. Удельная стоимость 1 кВт энергоустановок составляет до 5 тыс. дол. США. Поэтому водородная энергетика — это специфичный вид энергетики, имеющий не повсеместное значение, а наиболее рациональные зоны для своего применения.

## ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

Сегодня наиболее востребованной сферой применения водородной энергетики является транспорт, в основном по экологическим соображениям. В больших городах именно автомобильный транспорт является главным загрязнителем атмосферы. Его

вклад в выбросы вредных веществ оценивается величиной 71%, а в изменение климата — 68%. Это в мегаполисах существенно превышает вредные выбросы от стационарных энергетических установок и других источников загрязнения окружающей среды.

Поэтому во всем мире начинается движение за экологически чистый транспорт, с двигательными установками, работающими на водороде. Преимущества водородного транспорта очевидны: в отличие от бензиновых двигателей внутреннего сгорания он не наносит никакого вреда окружающей среде — в качестве выхлопа выделяется обычный водяной пар.

А по сравнению с аккумуляторными электромобилями водородные намного проще, компактны и дешевле.

Именно водородный транспорт представляется наиболее эффективным средством передвижения в будущем. Так, по данным представителей компании *Shell Hydrogen*, к 2050 г. 10% всех транспортных средств будут работать на водороде, а доля бензиновых и дизельных двигателей с 2025 г. по 2050 г. сократится в 2 раза.

Международное объединение *Clean Energy Partnership* (CER) таких автомобильных гигантов как BMW, Daimler Chrysler, Ford, GM/Opel создали в Берлине демонстрационный проект, включающий две водородные заправочные станции и 16 водородных автомобилей. При этом автомобили Opel работают на топливных элементах, а BMW — использует водородные двигатели внутреннего сгорания.

В десяти европейских столицах уже используют более 30 автобусов на водородном топливе. В 2007 г. только в Лондоне вышли на городские маршруты 10 водородных автобусов.

Привлекательными показали себя образцы автомобилей, работающих на чистом водороде и его смесях с бензином. Даже при смешанном питании двигателей (с 25% водорода) выбросы оксида углерода снижаются в 10 раз, выбросы несгоревших углеродов — в 3 раза и окислов азота — в 2 раза. Поэтому МЭА планирует увеличить к 2050 г. долю водорода, используемого в качестве добавки к бензинам, до 6% от общего объема моторного топлива.

Автомобили на чисто водородных топливных элементах потребляют почти вдвое меньше энергии, т.к. их КПД в 2 раза выше, чем у машин с двигателями внутреннего сгорания. Поэтому влиятельная нью-йоркская исследовательская компания *Allied Business Intelligence* (ABI) в своем докладе «Автомобильные топливные элементы — будущее пришло» утверждает, что уже к 2010 г. количество транспортных средств, оснащенных ТЭ, будет составлять миллион единиц. Только одна компания «Дженерал Моторс» предполагает продать к 2020 г. 1 миллион таких машин. В соответствии с Национальной водородной энергетической программой администрации США весь американский транспорт должен быть переведен на водород уже к 2020 г. (цит. по материалам Малащенко С.П.). А по данным МЭА, к 2050 г. в мире будет 700 млн автомобилей, едущих на водороде.

На первый взгляд, достаточно экзотическими, но многообещающими являются опыты инж. Дж. Конзиуса, которому удалось создать аппарат, позволяющий сжигать соленую воду. Воздействием на воду радиоволн удается ослабить связи между компонентами и высвободить водород. Этот процесс неидентичен электролизу воды и может протекать при гораздо меньших энергетических воздействиях, а за счет более организованной формы радиоволн. А далее при наличии искры водород воспламеняется и горит ровным пламенем, температура которого может превышать  $1500^{\circ}\text{C}$ .

Вопрос в том, насколько эффективен процесс превращения слабо структурированной энергии в высокоорганизованный поток радиоволн.

Россия активно поддерживает развитие водородной энергетики. Уже в начале 80-х годов XX века в Москве проходила опытная эксплуатация автомобилей «Волга», «Москвич» и ЗИЛ-130 на бензоводородном топливе (с содержанием водорода до 5%). В это же время был построен первый в мире самолет-лаборатория Ту-155 с газотурбинными авиационными водородными двигателями, ракетные комплексы системы «Энергия — Буран».

Участвуя в международном партнерстве по водородной энергетике, Россия выступает лидером по двум проектам — в обла-

ти создания портативных топливных элементов и современных систем хранения водорода (Б.Ф. Реутов — жур. «Энергия», № 11, 2006).

Кроме того, во многих институтах РАН в формате частно-государственного партнерства с ОАО «Газпром», ГК «Норильский никель», Минатомом России ведутся физические исследования по созданию новых материалов и конструкций твердооксидных, твердополимерных топливных элементов.

## ВОДОРОД КАК ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЬ

В то же время следует еще раз подчеркнуть, что водородная энергетика — это не панацея от всех энергетических кризисов. Достаточно сказать, что высокий КПД топливных элементов, порядка 90%, почти в 2 раза снизится, если учесть КПД предварительного получения водорода с помощью электролиза воды, а при использовании их в качестве источников энергии для электролиза тепловых электростанций общие выбросы вредных веществ в атмосферу не сокращаются.

Поэтому необходимы поиски новых способов эффективного электролиза воды, например, с помощью приливных ГЭС достаточно большой мощности с использованием получаемой энергии на месте для получения водорода с его последующим сжижением и транспортировкой к центрам массового потребления этого вида топлива.

Подобный проект рассматривался Институтами ГидроОГК и нами применительно к Тугурской ПЭС в Охотском море, где величина приливной достигает 5 м. При проектной мощности 8 ГВт годовая выработка электроэнергии составляет 20 млрд кВт·ч. Но поскольку в этом регионе нет потребителей для такой мощной ПЭС, то было бы, на наш взгляд, целесообразным использовать эту дешевую электроэнергию на месте для электролиза воды, получения и сжижения водорода и его транспортировки в энергодефицитные районы АТР и западного побережья США. А с точки зрения охраны здешних рыбных богатств (в т.ч. крабовых запо-

ведников) этот вариант экологически гораздо более эффективен, чем шельфовая добыча и экспорт сжиженного природного газа из Камчатско-Сахалинского региона.

Подобная схема использования энергии приливов как и волновой энергии и других видов гидроэнергии могла бы быть использована для масштабного процесса опреснения морской воды для прибрежных районов Китая, Саудовской Аравии и Африки. Это с точки зрения экологии гораздо более эффективный вариант по сравнению с энергоемкими опреснительными установками, работающими от АЭС и крупных ТЭС. Поэтому комплексное рассмотрение водно-энергетических проблем с промежуточным получением и использованием водорода является перспективным направлением общей гидроэнергетики на планете.