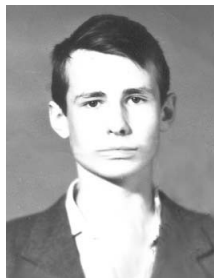


## РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ

### РАБОТЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА, МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ ННЦ ХФТИ

УДК 662.769.2

#### СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ



Д.В. Виноградов

*Научно-производственный комплекс ВИЭРТ ННЦ ХФТИ;  
г. Харьков, Украина; E-mail: vinogradov@kipt.kharkov.ua*

Проведен анализ современного состояния водородной энергетики. Показана перспективность использования водорода в качестве вторичного энергоносителя и моторного топлива. Особое внимание уделено прямому получению электроэнергии с использованием реакции восстановления в топливных элементах (ячейках) различного типа. Перечислены основные проблемы водородной энергетики и отмечены усилия, принимаемые мировым сообществом для решения этих проблем.

Одной из основных черт 21-го века является обострение энергетических проблем. Связано это, в первую очередь с неумолимым сокращением запасов углеводородного топлива (нефти и газа), являющегося на сегодняшний день основным энергоносителем. Кроме того, использование этого топлива, а также углей приводит к катастрофическому загрязнению окружающей среды. Современное состояние энергетики [1] выглядит следующим образом (таблица).

##### Современное состояние энергетики

Вид ресурса	Доля в мировой энергетике	Запасы сырья, Дж
Нефть	39%	$10^{22}$
Газ	23%	$10^{22}$
Уголь	22%	$1,8 \cdot 10^{23}$
Ядерная	7%	$10^{30}$
Возобновляемые	8%	-

Потребление энергии составляет  $10^{20}$  Дж в год, а к 2020 г. ожидается 50% рост потребления.

На сегодняшний день транспорт использует около половины мирового объема потребления нефтепродуктов (в США до 65%) [2]. Исчерпание ресурсов минерального топлива, а также токсичность выхлопов ДВС на нефтепродуктах стимулирует поиск новых, возобновляемых и экологически чистых энергоносителей для транспорта и энергетики в целом. Водород является одним из наиболее вероятных заменителей минерального топлива в будущем. К достоинствам водорода относятся.

1. Широкая распространенность элемента-воды в океане хватит для любого реально необходимого количества водорода. Кроме

того, Украина имеет доступ к самому большому в мире анаэробному резервуару. 92% Черного моря занимают вода с сероводородом и различными водородосодержащими соединениями ( $H_2O$ ,  $D_2O$ ,  $H_2S$ ,  $D_2S$ ). Исследователи [3] полагают, что в случае получения коммерческой серы и водорода экологически чистый метод глубоководной аэрации может оказаться рентабельным.

2. Отсутствие загрязнения окружающей среды при получении энергии (кроме того, многочисленные исследования показали, что благодаря высокой физико-химической активности водорода достаточно его 5...10% добавки к углеводородному топливу, например бензину, чтобы снизить токсичность выхлопных газов на 65...75%, а расход топлива снизить на 30...40%). При сгорании водорода в кислороде токсичные выхлопы отсутствуют, а при сгорании в воздухе намного ниже, чем у ДВС на бензине [4]. Использование водорода позволит устранить один из основных недостатков автомобильных двигателей: резкое снижение КПД с 30 до 10% на частичных нагрузках в условиях городской эксплуатации. Водород даже при небольших добавках 1...6% к бензину уже позволяет поднять топливную экономичность на частичных нагрузках на 30...40%. Это достигается благодаря тому, что предельная величина воспламенения для водорода более широкая, чем для бензина. Пределы воспламенения в процентах по объему для водорода находятся в интервале 4,7...74,2, а для бензина – 0,59...6,0.
3. Широкие масштабы промышленного потребления как химического реагента.

4. Как топливо он имеет высокое содержание энергии на единицу массы 120,7 МДж/кг, выше любого органического топлива[2]. При соединении водорода с кислородом в электрохимическом генераторе происходит прямое преобразование химической энергии в электрическую с высоким коэффициентом полезного действия.
5. Перспективность использования автономных источников энергии, основанных на топливных элементах (ТЭ), в которых водород применяется в качестве восстановителя.

В настоящее время наиболее рентабельным способом производства водорода является паровая конверсия метана. Согласно данным Министерства энергетики США в 1995 г. стоимость водорода для условий большого завода составляла 7 дол. за 1 ГДж, что эквивалентно стоимости 0,24 дол. за 1 л бензина при стоимости природного газа 2,3 дол. за 1 ГДж (80 дол./1000 м<sup>3</sup>). Производство водорода путем электролиза воды на основе современной технологии оценивается по затратам от 10 до 20 долларов за 1 ГДж в зависимости от стоимости электроэнергии и капитальных вложений в электролизеры [2].

На сегодняшний день рынок водорода в мире составляет 50 млн. т., в том числе 12 млн. т. в США. К 2010 г. рынок водорода в мире по оценкам возрастет до 100 млн. т., из которых на США придется 50 млн. т. Освоено использование водорода в ракетной технике. Примером такой системы являются ракеты РКК "Энергия", в которых водород используется как топливо в жидкостных реактивных двигателях. В России и США также накоплен опыт использования водорода в ядерных ракетных двигателях. При использовании водорода и его нагреве в реакторе до 3270 °С удельный импульс ядерного ракетного двигателя более чем в 2 раза выше, чем у лучших жидкостных ракетных двигателей [2].

Кроме того, с помощью водорода можно решить одну из проблем ядерной энергетики - необходимость маневра мощностью в «провальные» для выработки электроэнергии ночные часы. Стабильный режим производства электроэнергии является наиболее экономичным для АЭС, но энергопотребление зависит от времени суток: максимум около 12.00 и 20.00 и резкое снижение в ночное время. Изменение режима производства электроэнергии приводит к экономическим потерям и повышению аварийности - все значительные аварии на АЭС (Чернобыль, Three-Mile Island и т. д.) были связаны с маневром мощностью. Например, энергетические потери за счет диспетчерского регулирования на Ленинградской АЭС составляют примерно 400 млн. кВт·ч в год. Использование избыточных мощностей ЛАЭС позволит вырабатывать до 7,2...7,5 тыс.т чистого водорода. При этом стоимость электролитического водорода составит 25...26 руб/кг или 0,7...0,8 руб/кВт·ч по сравнению с существующей стоимостью бензина 11...13 руб/кг. (Цена на водород дана без учета инфраструктуры – электролизеры, компрессоры, хранилища и т.д.) [4].

Традиционным решением проблемы регулирования мощности является создание ГАЭС (гидроаккумулирующих станций), что требует огромных капитальных затрат и отчуждения больших земельных территорий. Эта задача может быть решена следующим образом: выработка на АЭС водорода из воды в ночное время, когда потребление энергии снижено, и сжигание водорода на ТЭЦ в часы пиковых нагрузок. Полученный водород можно использовать и в других целях - как химический реагент, топливо для транспорта и т.д. Огромные перспективы для решения проблемы получения дешевого водорода связаны с созданием высокотемпературных ядерных реакторов. Разработанная в нашей стране в начале 70-х годов XX века концепция широкого использования производимого из воды с помощью ядерных реакторов водорода как энергоносителя в промышленности, энергетике, на транспорте и в быту получила название атомно-водородной энергетики [5].

Как отмечено выше, водород может быть использован для прямого преобразования химической энергии в электрическую. Такое преобразование происходит в электрохимическом генераторе (топливном элементе) при соединении водорода с кислородом на одном из электродов [6,7]. Именно прогресс в разработке топливных элементов (ТЭ) вселяет уверенность в перспективах использования водорода как топлива.

Основные факторы, вызвавшие интерес к ТЭ, это:

1 – ухудшение экологической обстановки в крупных городах во всем мире в результате резкого увеличения парка автомобилей (удельные выбросы вредных компонентов из энергетических устройств (ЭУ) с ТЭ на 1,5...2,5 порядка ниже выбросов из традиционных ЭУ, кроме того они практически бесшумны);

2 – необходимость увеличения длительности непрерывной работы ряда малогабаритных электронных устройств (сотовых телефонов, портативных персональных компьютеров и т.д.) и замены в них обычных батарей на более энергоёмкие источники электропитания;

3 – высокий КПД (от 40 до 70 %), который относительно мало зависит от установленной мощности и нагрузки, тогда как КПД тепловых машин (ДВС, дизель и т.д.) не превышает 40% [6].

Указанные обстоятельства привели к столь бурному росту количества исследований в этой области, что можно сейчас определенно говорить о наступлении нового, второго бума в области топливных элементов (первый был после использования ТЭ в качестве источников электрической энергии для аппаратуры американского спутника "Джемини").

В качестве окислителя для работы топливных элементов в большинстве случаев используют кислород воздуха или при его отсутствии (например, в космических или подводных аппаратах) – чистый кислород. В качестве восстановителя в большинстве случаев используют либо чистый (обычно электролитический) водород,

либо технический водород, полученный путем паровой или окислительной конверсии природного газа, нефтепродуктов и (или) других жидких органических соединений [7].

Среди вариантов водородно-кислородных топливных элементов, получивших широкое развитие после 1960г., основными являются:

1. Щелочные топливные элементы (ЩТЭ): электролит – 40...70 вес.% раствор КОН, рабочая температура от 60 до 240 °С. Такие элементы использовались на американских космических кораблях проекта “Аполлон”, они используются и сейчас на американских космических челноках.
2. Среднетемпературные фосфорнокислые топливные элементы (ФКТЭ): электролит – 85...95 об.% раствор фосфорной кислоты, рабочая температура 180...200 °С. Эти элементы использовались для создания многочисленных автономных энергоустановок мощностью 250 кВт, а также некоторых электростанций мощностью до 4 МВт в США, Японии и в других странах.
3. Высокотемпературные карбонатно-расплавные топливные элементы (КРТЭ): электролит-расплав смеси карбонатов натрия, калия и лития, рабочая температура около 650 °С. На основе таких элементов в США и Японии созданы опытные стационарные установки мощностью до 0,5 МВт.
4. Высокотемпературные твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ): электролит-диоксид циркония, допированный оксидами иттрия и других металлов, рабочая температура в интервале 800...1000 °С. На основе таких элементов в США и Японии созданы опытные установки мощностью до 100 кВт.
5. Мембранные топливные элементы (МембТЭ): электролит-полимерная ионообменная мембрана, рабочая температура в интервале 60...100 °С. Такие элементы были впервые использованы в батарее для американского космического аппарата “Джемини”. МембТЭ в последнее время получили широкое развитие под названиями топливных элементов с твердым полимерным электролитом или топливных элементов с протонообменным мембранным электролитом [7].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бурное развитие водородных технологий идет по многим направлениям: водородные автомобили, ТЭ, гидридные тепловые насосы (ГТН) и др. Наиболее

быстрыми темпами развивается водородный автомобиль, использующий ТЭ, или гибридный автомобиль. В этой связи характерно решение президента США Дж. Буша о включении водородной энергетики в число национальных приоритетов. Конгресс США принял решение о финансировании в размере 1,3 млрд дол. работ по топливным элементам для автомобилей [2]. В США начинаются работы по созданию опытного высокотемпературного реактора (VHTR-H<sub>2</sub>) стоимостью 1 млрд дол. для атомного производства водорода. С этой целью формируется международный консорциум с участием ОКБМ и РНЦ “Курчатовский институт” [2]. Интересную инициативу демонстрирует Исландия, заявив, что она намерена стать первой в мире страной, решившей отказаться от использования ископаемых энергоносителей и перейти на водородную энергетику как на суше, так и на море [2]. В ноябре 2003 г. 15 стран подписали соглашение “Международное партнерство по водородной экономике”. Его участниками стали Австралия, Великобритания, Бразилия, Германия, ЕС, Индия, Исландия, Италия, Канада, Китай, Норвегия, Республика Корея, Россия, США, Франция, Япония [2].

### ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Бомко, А.М. Егоров, И.М. Карнаухова, В.И. Лапшин Электроядерная энергетика на торий-трансурановом топливном цикле // Вопросы атомной науки и техники. 2002, №3, с. 11-16.
2. Н.Н. Пономарев-Степной. Атомно-водородная энергетика // *Атомная энергия*. 2004, т.96, в.6, с.412-425.
3. В.Г. Кашня. Экологически чистые методы освоения водородосодержащих компонентов Черногo моря // *Второй Международный симпозиум «Безопасность и экономика водородного транспорта»*. IFSSEHT. 2003, с.26-27
4. А.Л. Дмитриев. Экономические и технические проблемы развития водородного транспорта // *Второй Международный симпозиум «Безопасность и экономика водородного транспорта»*. IFSSEHT. 2003, 51 с.
5. В.А. Легасов, Н.Н. Пономарев-Степной, А.Н. Проценко и др. Атомно-водородная энергетика (прогноз развития) // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Атомно-водородная энергетика»*. 1976, в.1, с. 5-34.
6. Н.В. Коровин. Водородные топливные элементы. Состояние и проблемы // *Водородное материаловедение и химия углеродных материалов*. 2003, с.928-929.
7. В.С. Багоцкий, Н.В. Осетрова, А.М. Скундин. Топливные элементы. Современное состояние и основные научно-технические проблемы // *Fuel Cell Technology Update*. February, 2002.

## СУЧАСНИЙ СТАН ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Д.В. Виноградов

Проведено аналіз сучасного стану робіт з водневої енергетики. Показана перспективність застосування водню у якості вторинного енергоносія та моторного палива. Особливої уваги приділено прямому отриманню електроенергії з застосуванням реакції відновлення у топливних елементах. Перераховані основні проблеми водневої енергетики, відмічені зусилля, які підприємляє мирова спільнота для їх вирішення.

## **MODERN STATE OF HYDROGEN ENERGETIC**

*D.V. Vinogradov*

Analysis of the modern state of affairs on hydrogen energy was done. Perspectivity of using the hydrogen as secondary power system and motor fuel is shown. Special attention is given to direct reception of electric powers with use the reactions of the regeneration in fuel cells of the different type. Main problems of hydrogen energy was shown and efforts, undertaken by world community for decision of these problems are noted.