

УДК 662.94

## НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ ЭНЕРГЕТИКИ

Ю.Г. НАЗМЕЕВ, О.П. ШИНКЕВИЧ, Н.А. НИКОЛАЕВ

Казанский государственный энергетический университет

*В статье приведен обзор материалов, указывающих на пагубное влияние энергетики на экологию как в России, так и во всем мире и взгляды на эту проблему ведущих ученых мира. Показано, что весь цивилизованный мир ставит задачу перехода в ближайшее время от прямого сжигания углеводородного топлива, с целью получения всех форм энергии (тепловой, электрической, движения в пространстве), на использование с этой целью электрохимических процессов в промышленных топливных элементах. К 2020 году предполагается переход от ископаемых топлив на водород с максимальным использованием возобновляемых источников энергии.*

По данным организации «Гринпис» структура мирового энергопотребления в начале 90-х годов имела следующий вид: нефть – 33%, уголь – 27%, природный газ – 18%, возобновляемые источники энергии – 17%, атомная энергия – 5% [1].

Российский журнал «Фактор» в №5 за 2001 год со ссылкой на World Energy Council представляет следующие данные на 2000 год: ископаемые виды топлив составляют 90% мирового потребления энергоресурсов, в том числе нефть – 40,1%, уголь – 27%, природный газ – 22,9%.

Таким образом, около 90% энергии мир получает, сжигая ископаемое топливо, и только ~ 10-15% - от нетрадиционных источников энергии (атомная энергия, ветровая и приливная энергии, геотермальные воды).

Получается, что основным источником энергии в мире до настоящего времени является горение углеводородных топлив в топках котлов, камерах сгорания газотурбинных установок, цилиндрах двигателей внутреннего сгорания.

Здесь изначальным процессом является горение как способ высвобождения тепловой энергии. Способ высвобождения тепловой энергии в процессе горения топлива вплоть до настоящего времени ничуть не изменился. Как оказалось [2], механизм экзотермических реакций в процессе горения энергетически несовершенен.

Тепловая энергия в виде излучения и движения молекул продуктов горения выделяется, в основном, при переходе электронов в процессе окислительно-восстановительных реакций. Но эти реакции при свободном горении топлива протекают не непосредственно между молекулами исходных веществ, а через промежуточные стадии, в которых образуются промежуточные активные продукты [3, 4]. Большей частью активными промежуточными продуктами являются свободные радикалы или атомы. На образование их тратится определенная часть энергии переноса электронов.

Кроме означенного выше недостатка при традиционном горении обязательно выделение  $\text{NO}_x$ , а при использовании углеводородного топлива (продуктов перегонки нефти, угля, торфа и т.п.) выделяются с продуктами горения еще  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  и т.д.

© Ю.Г. Назмеев, Н.А. Николаев, О.П. Шинкевич  
Проблемы энергетики, 2004, № 3-4

Наилучшая стратегия – изначальное внедрение «чистых» технологий. Это всегда дешевле, чем реконструкция существующих производств и установка оборудования для очистки.

В 1999 году в Кембридже (Англия) состоялась II Конференция круглого стола по новым источникам энергии. Организатор – компания Montreux Energy Ltd, Лондон. В конференции участвовали представители 9-ти крупнейших энергетических и автомобилестроительных компаний мира, в том числе из стран Англия, США, Италия, ФРГ, Канада. Основная тематика обсуждений – инвестирование в экологически чистые технологии, используемые на транспорте: последствия для промышленности, окружающей природной среды, потребителей.

В результате обсуждений пришли к выводу: водород и электроэнергия – неразлучная пара, которой суждено изменить облик XXI столетия; топливные элементы – новая технология, она будет развиваться, чтобы сыграть в водородном хозяйстве свою роль в качестве системы преобразования энергии.

Транспортные средства, оборудованные топливными элементами, к 2018 г. могут стать основным видом продукции автомобилестроительных предприятий. Экологически чистые углеводородные топлива – наиболее вероятные кандидаты на роль топлив переходного периода (здесь имеются в виду метан, метанол), в результате конверсии которых и последующего извлечения CO<sub>2</sub> осуществляется производство водорода.

В Москве в декабре 2000 года состоялось Всероссийское совещание “Водород и топливные элементы” (Перспективы развития топливных элементов и других водородных технологий на транспорте и в энергетике России). Академик В.Д. Русанов отметил, что в перспективе прямое сжигание природных топлив должно быть ограничено, а энергетика и транспорт – переведены на энергоносители без содержания углерода или с сильным ограничением последнего. В ближайшей перспективе водородное топливо целесообразно получать за счет декарбонизации природных топлив: конверсии метана в водород с одновременной утилизацией CO<sub>2</sub>.

Обсуждался вопрос получения водорода из воды путем электролиза последней. Электроэнергия должна поставляться возобновляемыми источниками энергии (солнечная энергия, гидроэнергетика, энергия ветра, энергия приливов, геотермика). Ключевые элементы новой техники – прежде всего топливные элементы с твердополимерным электролитом для автотранспорта, высокотемпературные топливные элементы для энергетики и водородно-кислородных парогенераторов для установок больших мощностей.

В остальных докладах было показано, что НИИ и заводы разрабатывают эти установки и они находятся, в основном, на стадии экспериментов или полупромышленных разработок.

В Германии в апреле 2002 года проходила крупнейшая в мире специализированная выставка “Энергетика”, проходившая в рамках Ганноверской ярмарки. Выставка была посвящена вопросам управления энергоресурсами, энергетических технологий и возобновляемых источников энергии. Число ее участников увеличилось более чем в два раза по сравнению с 2000 годом.

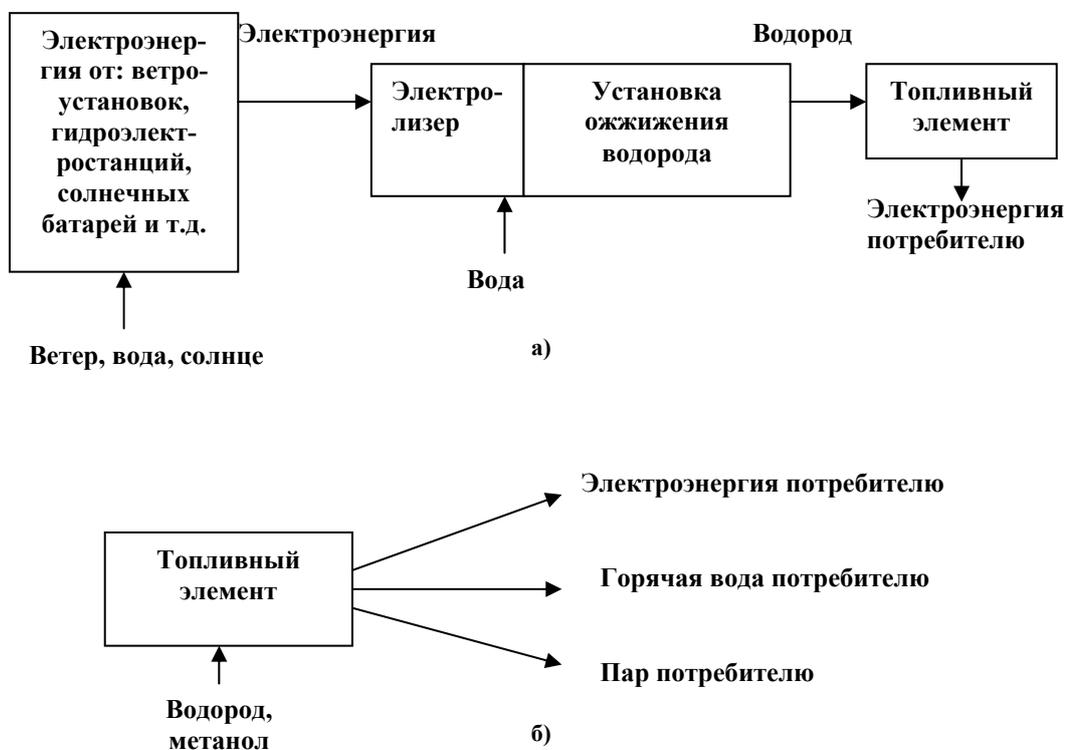
Ключевой темой на выставке была тема производства энергии с использованием водорода и топливных элементов. Отмечено, что в настоящее время, когда метанол стал доступен как средство для хранения водорода в жидком виде, использование водорода для индивидуальных транспортных перевозок уже не за горами. Более 1000 компаний и организаций в мире участвуют в процессе

коммерциализации технологии, основанной на использовании водорода. Несколько экспериментальных водородных энергетических установок уже запущены и успешно работают.

В марте 2003 года в Парламенте Европейского Союза был проведен семинар по проблемам энергетического использования водорода. В рамках этого семинара была представлена концепция объединения «Беллона» о наиболее реалистичных путях к «водородному обществу».

Отмечено, что, пока еще использование возобновляемых источников энергии освоено недостаточно, необходимо организовать эффективное и экологически чистое производство водорода из ископаемого сырья. Уже сегодня в качестве удачного решения для переходной стадии развития энергетики «Беллона» рассматривает захоронение диоксида углерода.

В выступлениях по Интернету содержится масса предложений по производству, хранению и использованию водорода как в энергетике, так и в транспорте. Обзор выступлений по этому поводу, решений научных и производственных сообществ за рубежом и в России позволяет нарисовать несколько схем преобразования энергии в предлагаемых энергетических и транспортных установках (рис. 1).



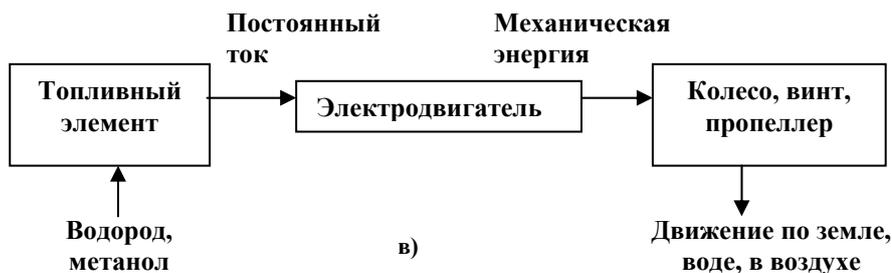


Рис. 1. Схемы преобразования энергии

На рисунке показаны три варианта схем преобразования энергии без выбросов вредных веществ в атмосферу (или почти без выбросов при использовании в качестве топлива метанола).

Обобщая вышеприведенное, можно сделать вывод: чтобы энергетика была экологически «чистой», необходимо обязательное выполнение трех условий:

1) экологически обоснованного получения водорода на начальном этапе из ископаемого углеводородного топлива, а затем - путем электрохимического разложения воды;

2) обеспечения хранения и транспортировки водорода с соблюдением необходимых мер безопасности;

3) создания промышленных установок, например топливных элементов, которые позволяли бы получать электроэнергию и теплоту с коэффициентом полезного действия не менее 85-95%.

Получение водорода в идеальном случае приведено в виде схемы преобразования энергии на рисунке 1, а.

Получение жидкого водорода как побочного продукта при производстве технического углерода (сажи) из природного газа давно освоено на заводе под Москвой, благодаря научным разработкам Института катализа СО АН СССР.

Наиболее перспективным способом преобразования энергии химических реакций окисления топлив с целью получения электрической и тепловой энергии являются процессы, происходящие в топливных элементах.

Как работает топливный элемент (ТЭ)?

Как и в обычных электрических батареях [5, 6], работа топливных элементов основывается на простой реакции окисления-восстановления, но реакция происходит в топливе, а не на электродах. ТЭ производит электроэнергию, пока в него поступает топливо. Анод в ТЭ, как правило, опущен в топливо, а катод собирает и обеспечивает доступ к окислителю. Прохождение реакции не влияет на электроды, так как между ними находится ионопроводящая мембрана (электролит).

Во время работы ТЭ нагреваются. Некоторые части ТЭ могут нагреваться до 50-100 °С. Большие ТЭ, работающие на электростанциях, в некоторых случаях могут нагреваться до 1000 °С. Эта теплота, как правило, используется для выработки пара или горячей воды.

Эффективность существующих ТЭ составляет 50% для низкотемпературных и до 95 % для высокотемпературных, если теплота полезно используется.

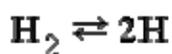
При использовании в ТЭ в качестве топлива чистого водорода или водородосодержащих жидкостей типа метанола вредных выделений практически не будет.

Топливный элемент - электрохимический генератор - устройство, обеспечивающее прямое преобразование химической энергии в электрическую. Хотя то же самое происходит в электрических аккумуляторах, ТЭ имеют два важных отличия: 1) они функционируют до тех пор, пока топливо и окислитель поступают из внешнего источника; 2) химический состав электролита в процессе работы не изменяется, т.е. ТЭ не нуждается в перезарядке.

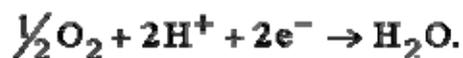
*Принцип действия.* Топливный элемент состоит из двух электродов, разделенных электролитом, и систем подвода топлива на один электрод и окислителя - на другой, а также системы для удаления продуктов реакции.

В большинстве случаев для ускорения химической реакции используются катализаторы. Внешней электрической цепью ТЭ соединен с нагрузкой, которая потребляет электроэнергию. Водород подается через полый анод и поступает в электролит через очень мелкие поры в материале электрода.

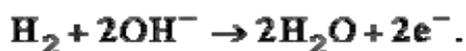
При этом происходит разложение молекул водорода на атомы, которые в результате хемосорбции, отдавая каждый по одному электрону, превращаются в положительно заряженные ионы. Этот процесс может быть описан следующими уравнениями:



Ионы водорода диффундируют через электролит к положительной стороне элемента. Подаваемый на катод кислород переходит в электролит и также реагирует на поверхности электрода с участием катализатора. При соединении его с ионами водорода и электронами, которые поступают из внешней цепи, образуется вода:

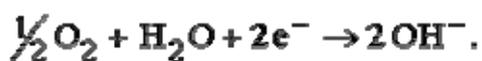


В топливных элементах со щелочным электролитом (обычно это концентрированные гидроксиды натрия или калия) протекают сходные химические реакции. Водород проходит через анод и реагирует в присутствии катализатора с имеющимися в электролите ионами гидроксила ( $\text{OH}^-$ ) с образованием воды и электрона:



На катоде кислород вступает в реакцию с водой, содержащейся в электролите, и электронами из внешней цепи. В последовательных стадиях

реакций образуются ионы гидроксидов (а также пергидроксила  $O_2H$ ). Результирующую реакцию на катоде можно записать в виде



Поток электронов и ионов поддерживает баланс заряда и вещества в электролите. Образующаяся в результате реакции вода частично разбавляет электролит. В любом топливном элементе часть энергии химической реакции превращается в тепло. Поток электронов во внешней цепи представляет собой постоянный ток, который используется для совершения работы.

На рис. 2 схематично показан принцип работы топливного элемента на метаноле. Большинство реакций в топливных элементах обеспечивают ЭДС около 1 В. Размыкание цепи и, как следствие, прекращение движения ионов, останавливает работу топливного элемента. Процесс, происходящий в водородно-кислородном топливном элементе, по своей природе является обратным хорошо известному процессу электролиза, в котором происходит диссоциация воды при прохождении через электролит электрического тока.

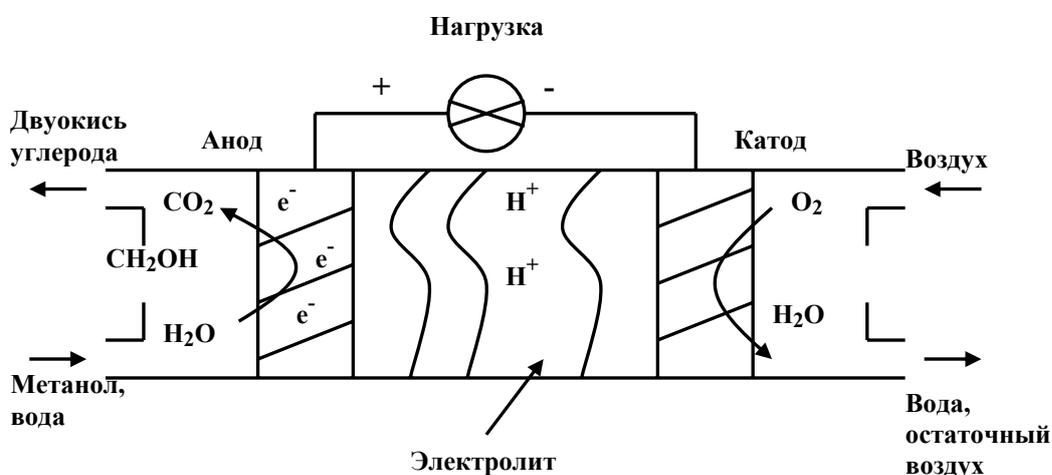


Рис. 2. Принципы работы ТЭ на метаноле

Теоретически размеры ТЭ могут быть сколь угодно большими. Однако на практике несколько элементов объединяются в небольшие модули или батареи, которые соединяются либо последовательно, либо параллельно.

ТЭ относятся к химическим источникам тока. Они осуществляют прямое превращение энергии топлива в электричество, минуя малоэффективные, идущие с большими потерями, процессы горения. Эти электрохимические устройства в результате высокоэффективного «холодного» горения топлива непосредственно вырабатывают электроэнергию.

Существуют две сферы применения ТЭ: автономная и большая энергетика. Для автономного использования основными являются удельные характеристики и удобство эксплуатации. Стоимость вырабатываемой энергии не является основным показателем.

Для большой энергетики решающим фактором является экономичность. Кроме того, установки должны быть долговечными, не содержать дорогих

материалов и использовать природное топливо при минимальных затратах на подготовку.

В большой энергетике очень перспективно применение ТЭ для крупномасштабного накопления энергии, например, получения водорода. Возобновляемые источники энергии (солнце и ветер) отличаются рассредоточенностью. Их серьезное использование, без которого в будущем не обойтись, немислимо без емких аккумуляторов, запаасающих энергию в той или иной форме.

Проблема накопления актуальна уже сегодня: суточные и недельные колебания нагрузки энергосистем заметно снижают их эффективность и требуют так называемых маневренных мощностей. Один из вариантов электрохимического накопителя энергии – топливный элемент в сочетании с электролизерами и газгольдерами.

*Первое поколение ТЭ.* Наибольшего технологического совершенства достигли среднетемпературные ТЭ первого поколения, работающие при температуре 200...230 °С на жидком топливе, природном газе либо на техническом водороде. Электролитом в них служит фосфорная кислота, которая заполняет пористую углеродную матрицу. Электроды выполнены из углерода, а катализатором является платина.

Одна таких электростанций введена в строй в штате Калифорния в 1991 году. Она состоит из восемнадцати батарей массой по 18 т каждая и размещается в корпусе диаметром чуть более 2 м и высотой около 5 м. Продумана процедура замены батареи с помощью рамной конструкции, движущейся по рельсам.

Две электростанции на ТЭ США поставили в Японию. Первая из них была пущена еще в начале 1983 года. Эксплуатационные показатели станции соответствовали расчетным. Она работала с нагрузкой от 25 до 80 % от номинальной. КПД достигал 30...37 % – это близко к современным крупным ТЭС. Время ее пуска из холодного состояния – от 4 ч до 10 мин., а продолжительность изменения мощности от нулевой до полной составляет всего 15 с.

Сейчас в разных районах США испытываются небольшие теплофикационные установки мощностью по 40 кВт с коэффициентом использования топлива около 80%. Они могут нагревать воду до 130 °С и размещаются в прачечных, спортивных комплексах, на пунктах связи и т.д. Около сотни установок уже проработали в общей сложности сотни тысяч часов. Экологическая чистота электростанций на ТЭ позволяет размещать их непосредственно в городах.

Первая топливная электростанция в Нью-Йорке, мощностью 4,5 МВт, заняла территорию в 1,3 га. Теперь для новых станций, с мощностью в два с половиной раза большей, нужна площадка размером 30х60 м. Строятся несколько демонстрационных электростанций мощностью по 11 МВт. Поражают сроки строительства (7 месяцев) и площадь (30х60 м), занимаемая электростанцией. Расчетный срок службы новых электростанций – 30 лет.

*Второе и третье поколение ТЭ.* Лучшими характеристиками обладают уже проектирующиеся модульные установки мощностью 5 МВт со среднетемпературными топливными элементами второго поколения. Они работают при температурах 650...700 °С. Их аноды делают из спеченных частиц никеля и хрома, катоды – из спеченного и окисленного алюминия, а электролитом служит расплав смеси карбонатов лития и калия. Повышенная температура помогает решить две крупные электрохимические проблемы:

снизить «отравляемость» катализатора окисью углерода; повысить эффективность процесса восстановления окислителя на катоде.

Еще эффективнее будут высокотемпературные топливные элементы третьего поколения с электролитом из твердых оксидов (в основном двуокиси циркония). Их рабочая температура – до 1000 °С. КПД энергоустановок с такими ТЭ близок к 50 %. Здесь в качестве топлива пригодны и продукты газификации твердого угля со значительным содержанием окиси углерода.

Не менее важно, что сбросовое тепло высокотемпературных установок можно использовать для производства пара, приводящего в движение турбины электрогенераторов.

Специалисты в области энергетики отмечают [7], что в большинстве развитых стран быстро растет интерес к рассредоточенным источникам энергии сравнительно малой мощности. Главное преимущество этих автономных энергоустановок – умеренные капиталовложения при строительстве, быстрый ввод в эксплуатацию, сравнительно простое обслуживание и хорошие экологические характеристики.

В последнее время большое распространение получил топливный элемент PEM с мембранами протонного обмена (с полимерным электролитом). Рабочая температура в этом процессе – также 80-95 °С, но в качестве электролита используется твердая ионно-обменная мембрана с перфторсульфокислотой.

По общему признанию, наиболее привлекательным в коммерческом плане является топливный элемент с фосфорной кислотой PAFC, у которого КПД по выработке только электроэнергии достигает 40 %, а при использовании выделенного тепла – 85 %. Рабочая температура у этого топливного элемента 175-200 °С, электролит – жидкая фосфорная кислота, пропитывающая карбид кремния, связанный тефлоном.

Пакет элемента снабжен двумя графитовыми пористыми электродами и ортофосфорной кислотой в качестве электролита. Электроды покрыты платиновым катализатором. В реформере природный газ при взаимодействии с паром переходит в водород и СО, который доокисляется до СО<sub>2</sub> в конверторе.

Далее молекулы водорода под влиянием катализатора диссоциируют на аноде на ионы H. Электроны, освобожденные в этой реакции, направляются через нагрузку к катоду. На катоде они реагируют с ионами водорода, диффундирующими через электролит, и с ионами кислорода, которые образуются в результате каталитической реакции окисления кислорода воздуха на катоде, образуя, в конечном итоге, воду.

К перспективным видам относятся также топливные элементы с расплавленным карбонатом типа MCFC. Рабочая температура 540 – 650 °С, электролит – расплавленные карбонаты калия и натрия в оболочке – матрице из литий-алюминиевого оксида LiAlO<sub>2</sub>.

И, наконец, наиболее перспективный топливный элемент – SOFC. Это твердооксидный топливный элемент, использующий любое газообразное топливо и наиболее пригодный для сравнительно крупных установок. Его КПД по электроэнергии составляет 50 – 55 %, а при использовании в установках комбинированного цикла – 65 %. Рабочая температура 980 – 1000 °С, электролит – твердый цирконий, стабилизированный иттрием.

В 2001 году была разработана новая энергоустановка на твердооксидных элементах, работающая при атмосферном давлении. Это установка мощностью 250 кВт с комбинированной выработкой электроэнергии и теплоты. Батарея (электрохимический генератор) этой энергоустановки включала в себя 2304

твердооксидных трубчатых элемента. Кроме того, в состав установки входили инвертор, регенератор, подогреватель топлива (природного газа), камера сгорания для подогрева воздуха, теплообменник для подогрева воды за счет теплоты уходящего газа и другое вспомогательное оборудование. При этом габаритные размеры установки были вполне умеренными: 2,6×3,0×10,8 м.

Американская компания FuelCell Energy поставила промышленную установку типа MCFC (с расплавленным карбонатом) для больницы Bad Neustadt (Германия). Установка типа Direct FuelCell имеет номинальную электрическую мощность 300 кВт и, кроме того, обеспечивает теплоснабжение больницы (т.к. рабочая температура газа в топливном элементе – 600 °С). Планируется изготовление установок общей мощностью 1,5 и 3 МВт, состоящих из нескольких модулей таких же топливных элементов. Эта же компания поставила энергоустановку мощностью 1МВт для предприятия по водоочистке County's South Wastewater Treatment Facility. Интересно отметить, что топливом для этой установки служит получаемый на предприятии биогаз в количестве 100 тыс. м<sup>3</sup>/сутки.

Другая американская компания - International Fuel Cells - также добилась значительных успехов в разработке энергоустановок с топливными элементами. Для крупного почтового предприятия на Аляске эта компания поставила 5 модулей ТЭ по 200 кВт каждый. В данном случае были использованы топливные элементы с фосфорной кислотой типа PC25.

Установка выдавала тепло в количестве 227 Мкал/ч (264 кВт) при температуре 60 °С. Размеры одного модуля составляли 3х3х5,5 м, масса - 771 кг. Расчетный коэффициент готовности, по сведениям поставщика, - 99,999%, что эквивалентно одному выходу установки из строя на 1 минуту в течение трех лет. После пуска установки в марте 2000 г. были подтверждены ее эксплуатационные характеристики. Установка работала надежно как в автономном режиме, так и параллельно с сетью.

Определенных успехов в разработке крупных топливных элементов добились японские специалисты. Исследовательские работы были начаты в Японии еще в 1972 г., но значительные успехи были достигнуты только в середине 90-х годов. Опытные модули топливных элементов имели мощность от 50 до 1000 кВт, причем 2/3 из них работали на природном газе. Некоторые характеристики этих установок приведены в таблице.

Характеристики ONSI Toshiba					
Мощность, кВт	50	100	200	500	1000
КПД по отпуску электроэнергии, %	40	38	40	40	39
Ширина, м	1,8	2,4	3,0	2,8	3,2
Длина, м	3,1	3,5	7,3	6,7	12,2
Высота, м	2,4	3,2	3,5	3,4	3,2
Масса, т	6,5	10,0	27,0	27,0	50,0
Эффективная площадь, м <sup>2</sup> /кВт	0,11	0,08	0,11	0,09	0,08

В 1994 г. в Японии была сооружена установка с топливными элементами мощностью 1 МВт. При общем КПД (с выработкой пара и горячей воды), равном 71 %, установка имела КПД по отпуску электроэнергии не менее 36%.

С 1995 г., по сообщениям прессы, в Токио эксплуатируется энергоустановка на топливных элементах с фосфорной кислотой мощностью 11 МВт, а общая мощность выпущенных топливных элементов к 2000 г. достигла 40 МВт.

© Проблемы энергетики, 2004, № 3-4

## Summary

*The article reviews the destructive influences of power engineering to the ecology in Russia and all over the world and the attitude of the leading world scholars to this problem. The article shows that all civilized world is planning in future to generate all forms of energy (heat, electricity, transportation) not from direct burning of carbon but through electrochemical processes in industrial fuel elements/*

*By 2020 the transfere from forsile fuels to hydrogen with a maximum utilization of renewable sources of energy is supposed.*

## Литература

1. Глобальное потепление: Доклад Гринпис / Под ред. Дж. Леггетта. Пер. с англ. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 272 с.
2. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. Учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений. - М.: Энергия, 1976.
3. Семенов Н.Н. Цепные реакции. - М.: Госхимиздат, 1934.
4. Хиншельвуд К.Н. Кинетика газовых реакций. - М.: ГТТИ, 1933.
5. Багоцкий В.С., Скундин А.М. Химические источники тока. - М.: 1981.
6. Кромптон Е. Источники тока. - М.: 1985, 1986.
7. Котлер В. Автономные энергоустановки на топливных элементах // Акватерм. – 2003. - №3 (13).

Поступила 22.03.2004