

СТАТЬИ

УДК 621.039.534.57

АТОМНО-ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Пономарев-Степной Н.Н. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)

Энергетические ресурсы, их распределение и потребление являются мощными факторами, влияющими на благосостояние человеческого общества и международные отношения. Одним из важных направлений технического прогресса энергетики, которое будет способствовать устойчивому развитию мирового сообщества, является использование водорода, производимого из воды с применением чистых источников первичной энергии, таких, как атомная энергия. Усовершенствованные ядерные установки дадут энергию для производства водорода и опреснения воды, водород обеспечит потребителя энергией в наиболее удобной форме. Освоение этой технологии уменьшит использование углеродного топлива для энергетических целей, снизит воздействие его сжигания на окружающую среду и сохранит для не-энергетического применения.

Такое высокотехнологичное направление развития энергетики, получившее название *водородная энергетика* или *водородная экономика*, внесет должный вклад в глобальную энергетическую безопасность, а также в укрепление здоровья, улучшение благосостояния и условий жизни для всех людей. Снизится влияние геополитических факторов, могут быть преодолены последствия региональной неравномерности обеспеченности ресурсами органического топлива и уменьшится потребление энергоносителей, влияющих на изменение климата на планете.

КОНЦЕПЦИЯ АТОМНО-ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Водород — это высокоэффективное и экологически чистое топливо. В наши дни крупномасштабное использование водорода освоено в промышленных химических процессах и ракетной технике. Производство водорода в мире превысило 50 млн т и быстро растет. При дальнейшем развитии этот энергоноситель мог бы служить источником энергии для локального производства электричества и тепла, бытового энергоснабжения, аккумулирования энергии, для транспорта, в том числе заправки автомашин. Будучи произведен из воды с помощью возобновляемых или ядерных ресурсов и технологий, водород становится возобновляемым топливом. Изучение путей обеспечения развивающегося человеческого общества экологически чистой энергией показывает, что кардинальное решение этой глобальной проблемы необходимо связывать с разработкой и осуществлением концепции, предусматривающей крупномасштабное производство на базе ядерной энергетики не только электроэнергии и тепла, но и водорода с последующим его использованием для разнообразных нужд человека [1].

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* [2].

Ядерная энергетика обладает неограниченными ресурсами топлива. При производстве электричества, тепла и водорода она оказывает наименьшее воздействие на окружающую среду. К этим преимуществам добавляются такие особенности водорода, как:

- неограниченные запасы сырья (воды) для получения;
- удобство использования и транспортировки в качестве энергоносителя;
- отсутствие загрязнения окружающей среды при использовании для получения энергии;
- широкие масштабы промышленного потребления как химического реагента;
- возможность аккумулировать энергию при использовании в качестве энергоносителя.

Водород — наиболее распространенный элемент во вселенной. Он химически активен, редко присутствует как несвязанный элемент, обычно существует в комбинации с другими, например, с кислородом в воде, углеродом в метане и других органических соединениях. Как топливо он имеет высокое содержание энергии на единицу массы 120,7 ГДж/т — выше любого органического топлива. При соединении водорода с кислородом в электрохимическом генераторе происходит прямое преобразование химической энергии в электрическую с высоким коэффициентом полезного действия.

При сжигании водорода в чистом кислороде единственными продуктами являются высокопотенциальное тепло и вода. При горении водорода в воздухе образуется существенно меньшее количество загрязнителей воздуха, чем при сжигании минерального топлива.

Итак, можно определить концепцию атомно-водородной энергетики как *вода на входе + чистая атомная энергия → водород → водород + кислород = чистая энергия + вода на выходе*.

Атомно-водородная энергетика нацелена на расширение использования атомной энергии в энергоемких отраслях химической, металлургической, строительной, топливной промышленности, а также на транспорте [3]. В это понятие можно также включить производство пресной воды и энергоснабжение распределенных потребителей. Такая энергетика сохранит нефть и газ для неэнергетического производства и обезопасит атмосферу от вредных выбросов продуктов сгорания. Важно, что развитие атомно-водородной концепции будет способствовать снижению риска распространения ядерных материалов благодаря возможности поставок энергоносителей в виде водорода и его производных вместо ядерных реакторов и ядерных материалов.

Становление атомно-водородной энергетики потребует развития специальных инновационных технологий по таким направлениям, как высокотемпературные реакторы, агрегаты для эффективного производства водорода из воды, водородные топливные элементы, хемотермические преобразователи, хранение и транспорти-

ровка водорода. При освоении атомно-водородной энергетики должны быть решены проблемы безопасности на всех звеньях обращения с водородом: при его производстве, хранении, транспортировке, использовании.

ПРОИЗВОДСТВО ВОДОРОДА

Для производства водорода необходимо разорвать его химические связи в углеводородах или воде и выделить из реакционной смеси.

Конверсия углеводородного сырья

Паровая конверсия метана. В настоящее время крупнотоннажное производство водорода и водородсодержащих продуктов осуществляется в мире в основном путем паровой конверсии природного газа метана. Для отделения водорода от углеродной основы в метане требуются пар и тепловая энергия при 750—850 °С, что и происходит в химических паровых реформерах на каталитических поверхностях. Первый шаг реакции расщепляет метан и водяной пар на водород и монооксид углерода (синтез-газ). Вслед за этим «реакция сдвига» превращает монооксид углерода и воду в диоксид углерода и водород. Эта реакция происходит при 200—250 °С. Для эндотермического процесса сжигается около половины исходного газа. В целях экономии природного газа и снижения загрязнения окружающей среды продуктами его сгорания в нашей стране, США и Японии проводились и продолжают разрабатываться технологии паровой конверсии метана с подводом тепла от высокотемпературного гелиевого реактора [4]. Модель такого комплекса состоит из ядерной части, вырабатывающей синтез-газ, и технологической, где поступающий газ используется для выработки конечной продукции.

Плазменная конверсия углеводородов. В РНЦ «Курчатовский институт» выполнены исследования плазменной конверсии природного углеводородного топлива (метана, керосина) в синтез-газ [5]. Эта технология может быть применена на заправочных станциях или борту водородных автомобилей при использовании обычного жидкого топлива. Разработаны также плазмохимические методы получения водорода с помощью ВЧ- и СВЧ-технологии с использованием в качестве сырья химических соединений, в которых водород находится в слабосвязанном состоянии, например, сероводорода.

Расщепление воды

По-видимому, в ближайшем будущем методы получения водорода с использованием углеродного сырья будут основными. Однако сырьевые и экологические ограничения паровой конверсии метана стимулируют разработку процессов производства водорода из воды. Среди них наибольший интерес в контексте атомно-водородной энергетики представляют электролиз, термохимические и термоэлектрохимические циклы.

Термохимические и термоэлектрохимические циклы [6, 7]. Как известно, для прямого термического разложения воды на водород и кислород требуется высокая температура (более 2500 °С). Однако воду можно термически разложить и при более низкой температуре, используя последовательность химических реакций, которые выполняют следующие функции: связывание воды, отщепление водорода

и кислорода, регенерация реагентов. Термохимический процесс получения водорода с к.п.д. до 50% использует последовательность химических реакций, например, серно-кисотно-иодный процесс и требует подвода тепла при температуре около 1000 °С. Источником тепла при термохимическом разложении воды служит высокотемпературный реактор. На отдельных стадиях подобных процессов наряду с термическим воздействием для отщепления водорода могут использоваться электролиз и плазма.

Изучено много комбинаций химических реакций, в которых вода расщепляется на водород и кислород в замкнутом цикле с поглощением тепла и электричества. Такой цикл может быть создан на основе паровой конверсии метана. При паровой конверсии метана около половины водорода производится из воды. Довести в этом цикле долю водорода, получаемого расщеплением воды, до 100% можно путем электрохимического или плазменного восстановления метана из метанола с возвращением его в голову процесса. Выбор оптимального процесса разложения воды определяется несколькими критериями, важнейшими из которых являются эффективность цикла, термодинамические и кинетические характеристики отдельных реакций, доступность и стоимость реагентов, совместимость реагентов и конструкционных материалов, безопасность процесса, экологические соображения и, в конечном счете, экономические показатели.

Электролитическое разложение воды (электролиз). Электролитический водород является наиболее доступным, но дорогим продуктом. Для разложения чистой воды при комнатных условиях требуется напряжение 1,24 В. Требуемое напряжение зависит от температуры и давления, свойств электролита и других элементов электролизера. В промышленных и опытно-промышленных установках к.п.д. электролизера составляет 70—80%, в том числе для электролиза под давлением. Паровой электролиз — это разновидность обычного электролиза. Часть энергии, необходимой для разложения воды, поступает за счет высокотемпературного тепла при нагреве пара до 900 °С, делая процесс более эффективным. Стыковка ВТГР с высокотемпературными электролизерами позволит иметь суммарный к.п.д. производства водорода до 50%.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ГЕЛИЕВЫЕ РЕАКТОРЫ — ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ ДЛЯ АТОМНО-ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Высокотемпературные реакторы, способные нагревать гелиевый теплоноситель до 1000 °С, могут быть использованы для производства электроэнергии с высоким к.п.д. в прямом газотурбинном цикле и снабжения высокотемпературным теплом и электричеством промышленного получения водорода, химических соединений продуктов, а также установок металлургической промышленности и опреснения воды [8—10].

Гелий и керамическое топливо — основа технологии ВТГР. Преимуществами гелия перед другими теплоносителями, применяемыми в ядерной энергетике, являются его химическая и нейтронная инертность, а также неизменность фазового состояния. Благодаря инертности гелия становится возможным использовать графит в качестве материала конструкции твэлов и ТВС, материала замедлителя и от-

ражателя. Микросферы топлива из оксидов или карбидов делящихся материалов локализованы в индивидуальных многослойных контейнерах из пиролитического углерода и карбида кремния. Такая конструкция предотвращает выход продуктов деления и обеспечивает выгорание, превышающее общепринятое в действующих реакторах в десятки раз. Дробление массы топливного сердечника на множество микрочастиц повышает надежность и безопасность. Сочетание в активной зоне реактора гелия, графита и керамики создает наиболее благоприятные условия для получения высокой температуры, эффективности использования топлива, ядерной и радиационной безопасности.

Эффективность топливного цикла. В тепловых ВТГР могут быть применены как замкнутые, так и открытые топливные циклы с использованием урана, плутония и тория. Для будущей крупномасштабной ядерной энергетики, когда потребуется расширенное воспроизводство ядерного топлива, уникальные возможности воспроизводства предоставляют быстрые гелиевые реакторы-размножители [11, 12]. Сочетание высокотемпературных реакторов с гелиевым теплоносителем как на тепловых (ВТГР), так и на быстрых нейтронах (БГР) удачно решает задачи ядерной энергетики будущего как по ресурсу топлива, так и расширению областей использования атомной энергии.

Повышенная безопасность. Благодаря значительной теплоемкости активной зоны, большому запасу до температуры разрушения и отрицательной обратной связи по температуре и мощности ВТГР устойчивы при авариях реактивностного типа. В модульном исполнении (типа ГТ-МГР) они выдерживают аварии с потерей теплоносителя, так как кольцевая конфигурация активной зоны обеспечивает пассивный отвод остаточного тепла в окружающую среду за счет теплопроводности без превышения допустимой температуры. Таким образом, реакторы данного типа за счет самозащищенности и пассивных средств исключают плавление активной зоны при авариях с потерей теплоносителя и авариях реактивностного типа.

Гарантии нераспространения делящихся материалов. Особенности конструкции топлива, защищенного многослойными керамическими покрытиями, и использование в качестве топлива урана низкого обогащения (не более 20%) способствуют защите от распространения делящихся материалов свежего топлива. Риск распространения делящихся материалов из отработанного топлива сводится к нулю благодаря глубокому выгоранию исходного материала, накоплению вредных изотопов и технологическим трудностям переработки.

Опыт разработки ВТГР. В 60-х годах в мире созданы первые экспериментальные ВТГР: «Драгон» (Великобритания), «Пич-Боттом» (США) и AVR (ФРГ). В 70-е годы были построены и введены в эксплуатацию демонстрационные АЭС с FSV (США) и THTR-300 (ФРГ) электрической мощностью 330 и 300 МВт соответственно. На стыке столетий введены в эксплуатацию опытные энергетические ВТГР в Японии и Китае.

В нашей стране разработано несколько проектов ядерных блоков с высокотемпературными гелиевыми реакторами — это опытно-промышленные установки ВГР-50 и ВГ-400 МВт, установка модульного типа ВГМ-200, блок с газовой турбиной МВГР-ГТ, установка малой мощности ВТГР-10. Для обоснования этих проектов создана мощная экспериментальная и технологическая база, проведен обширный комплекс исследований нейтронной физики, теплогидравлики, термомехани-

ки, массопереноса, технологии гелиевого теплоносителя и топлива, поведения топлива, в том числе под облучением, графита, конструкционных материалов, элементов конструкции и опытных образцов оборудования. Этот задел используется в настоящее время при разработке проектов энергетических блоков с гелиевым реактором как электрического, так и неэлектрического применения [13].

Модульный гелиевый реактор (ГТ-МГР). Он является одним из наиболее продвинутых, разрабатывается совместными усилиями российских институтов (ОКБМ, РНЦ «Курчатовский институт», ВНИИНМ, НПО «Луч», ВНИПИЭТ) и американской компании «Дженерал атомик» при активном сотрудничестве с министерствами по атомной энергии нашей страны и США [14]. Энергетическая установка ГТ-МГР состоит из связанных воедино двух блоков: модульного высокотемпературного реактора (МГР) и газотурбинного преобразователя энергии прямого цикла (ГТ). В настоящее время разработан эскизный проект ГТ-МГР для утилизации оружейного плутония при эффективном производстве электроэнергии с использованием прямого газотурбинного цикла (к.п.д. ~50%). Проект прошел экспертизу и одобрен управляющими инстанциями. Работы по проекту продолжаются на стадии технического проектирования с экспериментально-стендовой отработкой и демонстрацией ключевой технологии: топливо и система преобразования энергии. Долгосрочная задача — завершение технического проекта и сооружение на площадке Сибирского химического комбината демонстрационного модуля и 4-модульной АЭС для утилизации плутония с выработкой необходимой для региона тепловой и электрической энергии.

ГТ-МГР обеспечат не только эффективную утилизацию плутония, но и будут использованы при разработке эффективных и безопасных реакторов нового поколения, в том числе для производства водорода. В настоящее время ведется оценка этого проекта для производства водорода с использованием термохимических циклов или высокотемпературного электролиза с намерением соорудить МГР-Н₂ в Айдахской национальной лаборатории в рамках американской программы NE-2010 [15]. Работы по ГТ-МГР соответствуют развитию российско-американского сотрудничества по инновационным ядерным технологиям для будущей ядерной энергетики и изучению мер по ускорению утилизации оружейного плутония.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДОРОДА

Исключительные свойства обеспечивают водороду широкую перспективу применения в различных областях энергетики, на транспорте и в промышленности. Водород — хороший энергоноситель для использования в двигателях, автономных генераторах электричества и тепла, его удобно применять для теплоснабжения распределенных потребителей, транспортировки и аккумуляции энергии. Водород необходим в большом количестве для нефтепереработки, в химической, металлургической, строительной, топливной и пищевой промышленности.

Транспорт, промышленность и коммунально-бытовой сектор в развитых странах используют водород в течение многих лет. Освоено применение водорода в ракетной технике. На сегодня 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.

Водород в промышленности

Основными промышленными потребителями синтез-газа являются нефтепереработка, производство аммиака и метанола, прямое восстановление железа.

Нефтепереработка. Большая часть энергии, потребляемой нефтеперегонными заводами, расходуется на получение водорода из низкокалорийных углеводородов и природного газа. Водород используется для производства светлых нефтепродуктов, снижения токсичности, удаления серы и других загрязняющих примесей. По мере истощения запасов легкой нефти с высоким водород-углеродным коэффициентом и увеличения добычи имеющейся в большом количестве тяжелой нефти возрастает спрос на водород. Если в этом процессе использовать водород, производимый с помощью ядерных реакторов, то не только увеличивается выход бензина на тонну исходной нефти, но и уменьшается выброс парниковых газов, образующихся при традиционном производстве водорода.

Производство аммиака. Суммарная мощность производства аммиака в России в настоящее время составляет около 15 млн т — это около 9% мировых мощностей и третье место в мире после Китая и США. Производство аммиака в нынешних условиях использует водород, получаемый традиционным методом паровой конверсии метана. Если отказаться от сжигания природного газа за счет тепла, вырабатываемого ВТГР, то согласно оценкам комплекс с ГТ-МГР в составе четырех блоков ($600 \text{ МВт} \times 4$ = паровая конверсия метана + производство NH_3) может производить около 3 млн т аммиака в год. Суммарное производство водорода и электричества такого энерготехнологического комплекса составит $600 \text{ МВт} \times 4$ = паровая конверсия метана + газотурбинный цикл = 0,555 млн т водорода + $5,6 \cdot 10^6 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$ электрической энергии.

Водород как энергоноситель

Достоинством водорода как топлива является способность производить не только высокопотенциальное тепло при его сжигании в кислороде, но и электрическую энергию при соединении с кислородом в топливном элементе — электрохимическом генераторе. Водород как топливо эффективно используется в ракетных двигателях. Водородно-кислородные ракетные двигатели обеспечивают наиболее высокие значения удельной тяги. Космическая техника стимулировала использование технологии прямого преобразования химической энергии водорода в электричество в электрохимическом генераторе. Широкое использование такой технологии ожидается на автотранспорте. Электрохимические генераторы найдут также применение в коммунально-бытовом секторе и специальной энергетике, например, для подводных аппаратов.

Топливные элементы (электрохимические генераторы). Американская и отечественная космические программы в течение нескольких десятилетий используют электрохимические генераторы с щелочными топливными элементами. В конце 80-х годов на Уральском электрохимическом комбинате был разработан электрохимический генератор на водородно-кислородных топливных элементах с матричным щелочным электролитом для космических аппаратов РКК «Энергия». Суммарный ресурс электрохимических генераторов «Фотон» мощностью в номинальном режиме 10 и 25 кВт в пиковом режиме составил 80 тыс. ч. Эта разработка

аналогична производимому компанией «Международный топливный элемент» (ИЕС, США) щелочному электрохимическому генератору для системы космических аппаратов «Шатл» мощностью 12 кВт.

В качестве источника электроэнергии для транспорта нового поколения (автомобили и автобусы) разрабатываются твердополимерные топливные элементы. Этому направлению придается большое значение в западных странах и особенно в США и Японии. Твердополимерные топливные элементы найдут широкое применение и для других систем энергоснабжения.

Во ВНИИТФ разработан энергетический блок мощностью 1 кВт, использующий высокотемпературный твердооксидный топливный элемент на основе оксида циркония с добавкой щелочно-земельных и редкоземельных металлов с рабочей температурой более 800 °С. Основное преимущество такого элемента — возможность использовать синтез-газ благодаря анионной проводимости электролита. Топливный элемент состоит из трубчатых модулей. Мощность каждого модуля при 950 °С составляет 13 Вт при удельной мощности 550 мВт/см² и напряжении 0,55 В. В ФЭИ разработаны высокотемпературные твердооксидные топливные элементы на основе плоских модулей с максимальной удельной мощностью 700 мВт/см² при 950 °С [16].

Автотранспорт на водороде. Транспорт расходует около половины мировой добычи нефти. В США 65% потребляемой нефти используют транспортные средства. Мировое потребление нефтепродуктов на транспорте составляет 637 млн т бензина и 327 млн т дизельного топлива. Эти цифры показывают актуальность внедрения водорода в транспортную технику.

Работы по применению водорода направлены как на улучшение углеводородного топлива для сжигания в двигателях внутреннего сгорания, так и на использование электрохимических генераторов. Автомобильная промышленность разработала и проводит комплексные испытания автомобилей на водороде. Известно, что первый автомобиль с двигателем внутреннего сгорания был приспособлен лейтенантом ПВО Шелещем для работы на водороде в 1942 г. в блокадном Ленинграде [17]. В США, Германии, Японии, Канаде созданы и эксплуатируются опытные водородные автозаправочные станции. В недалекой перспективе в результате ужесточения стандартов на выбросы в окружающую среду, повышения стоимости бензина и снижения стоимости топливных элементов ожидается изменение конъюнктуры в пользу автомобилей с твердополимерными топливными элементами. Поступление на рынок водородных автомобилей планируется на ближайшее десятилетие.

При использовании водорода на автомобильном транспорте существенной проблемой является заправка водородом и его хранение на борту автомобиля. В качестве одного из решений этой проблемы может быть конверсия обычного топлива в водород на борту. В РНЦ «Курчатовский институт» разработан плазменный процесс конверсии тяжелых углеводородов, например, керосина в синтез-газ в целях создания бортового конвертора, который приспособлен для транспортных средств, использующих водородные топливные элементы.

Ракеты и авиация на водороде. Наибольший опыт использования водорода как энергоносителя накоплен в ракетно-космической технике. Примером такой

системы являются ракеты РКК «Энергия», в которых водород используется как топливо в жидкостных реактивных двигателях. В нашей стране и США также накоплен опыт использования водорода в ядерных ракетных двигателях [18, 19]. Принципиальным преимуществом ядерного ракетного двигателя по сравнению с жидкостным является возможность использования однокомпонентного рабочего тела с минимальной молекулярной массой, т.е. водорода, что обеспечивает наиболее высокую удельную тягу двигателя. Так, 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. В нашей стране были разработаны ядерные ракетные двигатели, при испытаниях которых температура водорода достигала 3370 °С.

Хотя авиация потребляет менее 3% добываемого органического топлива, независимость от внешних поставок нефтепродуктов стимулирует разработку самолетов, использующих водородное топливо. В 80-е годы была создана летающая лаборатория на базе самолета Ту-154В с двумя двигателями НК-88, работавшими на водороде. В настоящее время работы по водороду в авиации продолжают. Проводятся также поисковые работы по сверхзвуковым авиационно-космическим системам, использующим прямоточные двигатели на водороде.

Водород в энергетике. При масштабном освоении технологии производства, транспортировки и хранения водород может быть использован для решения проблем крупномасштабной ядерной энергетики. Среди них следует выделить аккумулялирование энергии в энергосистемах с неравномерным графиком нагрузок, энергообеспечение локальных потребителей и дальнейшее теплоснабжение.

В настоящее время переменный график нагрузок энергосистем и особенно ночной провал электрической нагрузки — одна из важнейших проблем энергетики. Эта проблема является острой для ядерной энергетики. Характерная для АЭС высокая капитальная составляющая стоимости производимой энергии, а также стремление к повышению эксплуатационной надежности основного оборудования и, главным образом, топлива делают желательными их функционирование в базовом режиме нагрузки. Для реакторов-размножителей функционирование в базовом режиме повышает темп воспроизводства топлива. Эта задача может быть решена с применением водородной технологии по следующей схеме: производство и накопление водорода во время ночного провала и его использование при пиковых нагрузках. Для покрытия пиковых нагрузок может быть использован парогенератор H_2/O_2 , дополнительно питающий турбину. В Германии, России, Японии и других странах проведены экспериментальные исследования процессов горения водорода в кислороде и на воздухе, теплопередачи при пленочном и испарительном охлаждении стенок в условиях высоких тепловых потоков, а также концептуальных схем высокотемпературных парогенераторов. Институт высоких температур РАН и Центр им. М.В. Келдыша разработали и испытали демонстрационный образец такого парогенератора мощностью 25 МВт.

Электрохимические генераторы могут стать эффективным источником тепла и электричества для автономных потребителей. Один из типичных проектов таких устройств — HomeGen разрабатывается компанией «Дженерал электрик» (США).

Мощность установки достигает 35 кВт (твердополимерные топливные элементы, к.п.д. около 30%). В настоящее время HomeGen и несколько аналогичных разработок проходят контрольные испытания. Основные усилия разработчиков направлены на снижение стоимости за счет использования новых более эффективных керамических материалов и совершенствования технологии изготовления электрохимических генераторов.

Энергоноситель (чистый водород или синтез-газ), производимый на атомном энерготехнологическом комплексе, может использоваться для дальнего теплоснабжения коммунально-бытового и коммерческого сектора. В этом случае реализуется хемотермическая передача энергии [20]. Ядерная технологическая часть комплекса при паровой конверсии метана аккумулирует энергию, получаемую от высокотемпературного реактора, затем синтез-газ транспортируется к централизованному потребителю тепла, где в метанаторе проводится обратная реакция с выделением тепла. Это тепло от централизованного источника передается распределенному потребителю в виде горячей воды или пара. Метан возвращается в голову процесса.

ОБРАЩЕНИЕ С ВОДОРОДОМ

Широкое использование водорода в энергетике, промышленности, на транспорте, в коммунальном хозяйстве потребует разработки новых подходов при обращении с ним. К возникающим проблемам относятся транспортировка, обеспечение запасов, централизованное и индивидуальное хранение, распределение по потребителям — все это при условии гарантий безопасности с учетом горючести и взрывоопасности водорода и его смесей. Решение этих проблем требует не только организационно-технических подходов, но и поиска и разработки новых материалов и технологий.

В качестве примера следует вспомнить создание в нашей стране научно-технической и промышленной базы для масштабных работ с жидким водородом при разработке ракеты-носителя «Энергия». Для этих целей был построен криогенно-машиностроительный комплекс производительностью до 10 тыс. т жидкого водорода в год, создан парк железнодорожных цистерн с экранно-вакуумной изоляцией для перевозки жидкого водорода.

Хранение водорода

При крупномасштабном использовании водорода требуются безопасные и эффективные системы его централизованного хранения. Водород может храниться в жидком виде при охлаждении до -253°C . Для охлаждения до этой температуры требуется затратить около одной трети содержащейся в нем энергии (11 кВт·ч/кг), для создания криогенных устройств необходимы специальные материалы и технология. Водород может также быть запасен в виде газа. Для сжатия водорода требуется меньше энергии, чем для ожижения. Водород в газовой фазе может быть запасен в подземных полостях, месторождениях природного газа. Так, при испытаниях российских ядерных ракетных двигателей для хранения водорода использовались подземные емкости с давлением хранимого водорода 9 МПа.

Использование водорода индивидуальными потребителями ставит проблему локального хранения. Особенно это важно при использовании водорода в автомо-

биях, где наряду с требованиями безопасности должны быть обеспечены высокие показатели по удельной емкости на единицу массы и объема. Создание металлических или композитных (металл + углеродное волокно) резервуаров, пригодных для эффективного хранения водорода на транспорте, требует применения новой технологии. Одним из последних примеров в этом направлении являются разработка и испытание Центром им. М.В. Келдыша совместно с институтами ракетной промышленности композитных автомобильных баллонов размером до 40 см для хранения водорода при давлении до 70 МПа.

В качестве эффективного способа хранения водорода рассматриваются гидриды. Значительный опыт в этом направлении накоплен при разработке высокотемпературных замедлителей из гидридов металлов для космических реакторов. Некоторые металлические сплавы типа магний—никель, магний—медь и железотитановые сплавы поглощают водород в относительно большом количестве и освобождают его при нагреве. При нормальной температуре равновесное давление водорода в таком аккумуляторе равно нулю, чем обеспечивается безопасность обращения с этими системами. Гидриды, однако, способны запастись лишь относительно небольшое количество водорода на единицу веса. Цель исследований — разработать материал, который будет запастись существенное количество водорода в единице объема, легко выделять для использования и гарантировать безопасность. Освоенные в крупнотоннажной химии водородоемкие химические соединения (аммиак, метанол, диметилвый эфир и др.) также рассматриваются как эффективные носители водорода.

Водородная безопасность

Обеспечение безопасности при использовании водорода сводится к предотвращению аварийных ситуаций, которые связаны с потерей герметичности систем, производящих и использующих водород, а также изучению процессов протекания аварий и разработке методов управления авариями для снижения последствий. Активные исследования водородной безопасности выполняются для ядерной энергетики в связи с опасностью возникновения пароциркониевой реакции при тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР. Теоретические и экспериментальные исследования этих процессов, а также мер по их предотвращению служат хорошей базой для безопасности будущей водородной энергетики.

Экспериментальные работы в области водородной безопасности проводятся РНЦ «Курчатовский институт» на установках малого, среднего и крупного масштаба [21]. Установки малого масштаба (о. Коневец, Ладужское озеро): «Драйвер» — детонационная труба рабочим объемом 2,1 м³, «Торпедо» — детонационная труба рабочим объемом 17,4 м³, «Канал» — взрывная камера длиной 5,28 м, квадратным поперечным сечением 80×80 мм, установка среднего масштаба — «Копер» рабочим объемом 48 м³, установка крупного масштаба — экспериментальный стенд РУТ2200, представляющий собой прочное железобетонное сооружение сложной геометрии с общим объемом помещения 480 м³. На этих установках выполнены исследования по определению пределов воспламенения, концентрационных и температурных зависимостей режимов распространения пламени в различных масштабах, критических параметров ускорения пламени и перехода в детонацию для водородно-паровоздушных смесей. Компьютерное моделирование этих процессов осуществляется с помощью специально разработанных кодов. Код

Limits предназначен для определения пределов воспламенения и режимов горения водородно-паровоздушных смесей в зависимости от состава смеси и начальных условий. Методика выбора режима горения основывается на полуэмпирическом анализе экспериментальных данных, полученных как в РИЦ «Курчатовский институт», так и в других институтах. Система кодов CREBCOM разработана для моделирования механических нагрузок, возникающих при различных режимах горения, включая медленное горение, быструю дефлаграцию и детонацию газовых смесей в замкнутых и частично открытых объемах сложной геометрии.

ЭКОНОМИКА

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 нм³). Производство водорода путем электролиза воды на основе современной технологии оценивается по затратам от 10 до 20 дол. за 1 ГДж в зависимости от стоимости электроэнергии и капитальных вложений в электролизеры.

Выбор технологии производства водорода зависит от стоимости природных углеводородов, и по мере увеличения их стоимости будет расти доля альтернативных энергоисточников и, в первую очередь, ядерной технологии.

В настоящее время в США (фирмы «Дженерал атомик», Ок-Риджская национальная лаборатория и др.) и Японии (JAERI, университеты) активизировалась разработка термохимических процессов производства водорода из воды с использованием энергии ВТГР. Основным стимулом этих работ является сопоставление общего к.п.д. производства водорода при использовании современного промышленного электролизера и электроэнергии АЭС с традиционными легководными реакторами и термохимического разложения воды в сочетании с ВТГР. Общий к.п.д. для варианта электролиз + легководные реакторы составляет не выше 25%, в то время как для варианта термохимия + ВТГР к.п.д. может достигать 45—48%. Преимущество термохимических процессов обусловлено наряду с указанным переходом от экстенсивных систем разложения воды на поверхности электродов к интенсивным объемным процессам в химических реакторах. Одним из существенных ограничений крупномасштабного электролизного производства водорода является необходимость применения в качестве катализаторов драгоценных металлов (платины, родия, палладия) в количестве, пропорциональном мощности электролизера. Например, для производства 5 млн т/год водорода необходимо создать электролизеры суммарной электрической мощностью более 30 ГВт, для изготовления которых потребовалось бы все нынешнее мировое производство платины. При использовании паровой конверсии метана в сочетании с ВТГР требуемая тепловая мощность ВТГР составляет в расчете на 5 млн т водорода около 6,5 ГВт. В перспективе, когда стоимость природного газа будет повышаться, доля водорода, производимого из воды, может быть доведена до 100% за счет замыкания цикла восстановлением метана из промежуточного продукта метанола с использованием электроэнергии.

В далекой перспективе, возможно, к концу столетия развитие водородной экономики может потребовать до половины мощностей ядерной энергетики, что по одному из прогнозов составляет более 2000 ГВт [22]. Темпы и структура развития ядерной энергетики должны отслеживать эти требования. В структуре ядерной энергетики обязательно должно развиваться направление высокотемпературных реакторов, необходимых для участия в производстве водорода, отсюда, учитывая топливные потребности ядерной энергетики такого масштаба, необходимым условием является внедрение реакторов-размножителей и замкнутого топливного цикла с расширенным воспроизводством ядерного топлива.

РАЗВИТИЕ РАБОТ ПО ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ [23]

Направления разработки новой водородной технологии в разных регионах и странах различаются. Это связано и с неравномерной обеспеченностью природными энергоресурсами, и с особенностями технологического развития. Например, в разработках водородной технологии в США, Германии и нашей стране используется опыт ракетной техники, атомной и химической промышленности, специальной металлургии, криогенной и оборонной промышленности, в Японии — опыт электронной, электротехнической, металлургической промышленности и зарубежный опыт криогенной и авиационно-космической техники. Вместе с тем обостряющиеся геополитические и экологические проблемы, связанные с региональной неравномерностью добычи и потребления нефти, в ближайшей перспективе определяют в качестве основного направления развития производство и применение водорода в качестве экологически чистого энергоносителя для автотранспорта и энергетики. Это формирует наряду со специфичными для каждой страны направлениями НИОКР и общие для основных ведущих стран направления исследований и разработок. Среди них прежде всего необходимо отметить:

производство, транспортировка, хранение и распределение жидкого и сжатого водорода;

крупномасштабное производство водорода с использованием энергии высокотемпературных реакторов;

водородный автотранспорт с топливными элементами;

водородные системы автономного энергообеспечения на основе топливных элементов;

использование водорода в большой энергетике;

аккумулирование и очистка водорода;

водородная инфраструктура и безопасность.

Крупные национальные программы НИОКР в области водородной энергетики и технологии реализуются в США, Канаде, Германии, Японии, Китае, странах ЕС и др. Государственная поддержка этих программ сегодня исчисляется сотнями млн дол. в год. Выполняются международные программы и проекты. В странах ЕС действует программа НИОКР по созданию водородных автобусов и реализуются другие проекты, связанные с созданием инфраструктуры обеспечения водородом. Япония с участием иностранных партнеров реализует крупный проект «Мировая

энергетическая сеть с использованием водорода» (WE-NET). Между ведущими фирмами различных стран заключены многочисленные соглашения о совместных разработках новых водородных технологий. Организовано Берлинское партнерство чистой энергии (СЕР), членами которого являются компании БМВ, «Деймлер-Крайслер», «Форд», «Линде», «Опель» и др. На правительственном уровне многие страны приняли важные решения об ускоренном развитии водородной энергетики и технологии. 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. В США начинаются работы по созданию опытного высокотемпературного реактора (VHTR-H₂) стоимостью 1 млрд дол. для атомного производства водорода. С этой целью формируется международный консорциум с участием ОКБМ и РНЦ «Курчатовский институт».

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.

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.

В нашей стране имеется задел по основным направлениям водородной энергетики. Среди перечисленных направлений следует отметить опыт работ с водородом в ракетной технике, авиации, химической, нефтеперерабатывающей и атомной промышленности, технологический задел по атомно-водородной энергетике, в том числе по высокотемпературным гелиевым реакторам. Программа действий по водородной энергетике должна включать как собственно российские работы по ключевым технологиям, так и сотрудничество с зарубежными партнерами. Реализация программы создаст базовые технологические основы коммерческого перехода к атомно-водородной энергетике непосредственно в России, что повысит энергетическую устойчивость экономики страны и обеспечит поставки соответствующих энерготехнологических комплексов на экспорт. Запоздывание нашей страны в этом направлении работ — прогнозируемая технологическая зависимость от внешнего мира.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации № 1215.2003.8 для поддержки ведущих научных школ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров А.П., Пономарев-Степной Н.Н. Атомная энергетика и технический прогресс. — В сб.: Атомной энергетике 20 лет. М.: Атомиздат, 1974, с. 205—213.
2. Легасов В.А., Пономарев-Степной Н.Н., Проценко А.Н. и др. Атомно-водородная энергетика (прогноз развития). — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомно-водородная энергетика, 1976, вып. 1, с. 5—34.
3. Александров А.П., Легасов В.А., Сидоренко В.А. и др. Структура атомной энергетики с учетом производства энергии помимо электричества. — Атомная энергия, 1977, т. 43, вып. 6, с. 427—432.

4. Пономарев-Степной Н.Н., Проценко А.Н., Гребенник В.Н. и др. Высокотемпературные реакторы с гелиевым теплоносителем (Возможности, перспективы применения, технические проблемы). — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомно-водородная энергетика, 1976, вып. 1, с. 83—114.
5. Бабарицкий А.И., Баранов И.Е., Бибииков М.Б. и др. Плазмокаталитическая переработка углеводородного сырья и моторных топлив. Разработка бортового автомобильного плазменного конвертора жидкого топлива в синтез-газ: Препринт ИАЭ-6302/13, 2003. 41 с.
6. Легасов В.А., Котельников Г.А., Попов В.К. Методы получения водорода путем разложения воды. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомно-водородная энергетика, 1976, вып. 1, с. 35—60.
7. Белоусов И.Г. Термодинамика химических циклов. — Там же, с. 61—82.
8. Доллежалъ Н.А., Заичко Н.Д., Батуров Б.Б. и др. Использование ядерных реакторов для высокотемпературных энерготехнологических промышленных процессов. — Атомная энергия, 1977, т. 43, вып. 6, с. 432—440.
9. Ponomarev-Stepnoy N.N., Protsenko A.N., Stolyarevsky A.Ya., Chernilin Yu.F. Aspects of strategy of HTGR introduction into hydrogen energy. — Intern. J. Hydrogen Energy, 1983, v. 8, № 11/12, p. 881—889.
10. Кирышин А.И., Кодочигов Н.Г., Кузавков Н.Г. и др. Роль и место газоохлаждаемых реакторов в структуре ядерного энергообеспечения. — Атомная энергия, 1999, т. 87, вып. 2, с. 87—91.
11. Александров А.П., Пономарев-Степной Н.Н., Глушков Е.С. и др. Быстрые и тепловые гелиевые реакторы для производства электроэнергии и высокотемпературного тепла. — In: Proc. of an IAEA-NEA Symp. «Gas-Cooled Reactors with Emphasis on Advanced Systems», 1975, Jülich, Oct. 13—17, v. 1.
12. Пономарев-Степной Н.Н., Глушков Е.С., Гребенник В.Н. и др. Разработка быстрых гелиевых реакторов в России. — Атомная энергия, 2003, т. 94, вып. 4, с. 262—270.
13. Пономарев-Степной Н.Н. Высокотемпературные гелиевые реакторы в крупномасштабной ядерной энергетике. Докл. на конф. «Александровские чтения». Москва, РНЦ «Курчатовский институт», 13 февраля 2002 г.
14. Kiryushin A.I., Kodochigov N.G., Kouzavkov N.G. e.a. Project of the GT-MHR high-temperature helium reactor with gas turbine. — Nuclear Engng and Design, 1997, v. 173, p. 119—129.
15. Кодочигов Н.Г., Кирышин А.И., Пономарев-Степной Н.Н. и др. Газотурбинный модульный гелиевый реактор. — В сб.: Межд. конф. МАГАТЭ по инновационным технологиям для ядерных топливных циклов и ядерной энергетике. Вена, Австрия, 23—26 июня 2003.
16. First solid oxide fuel cell in Russia demonstrated by Federal Nuclear Center. — Russian Science News, 19 January 2004, Provider: Fuel Cell Today.
17. Гусев А.Л., Дядюченко Ю.П. Применение водорода в автомобильных двигателях внутреннего сгорания в блокадном Ленинграде. Тезисы докл. 2-го Межд. симп. «Безопасность и экономика водородного транспорта» IFSSSENT-2003, г. Саров, Россия.
18. Ponomarev-Stepnoy N., Talyzin V., Usov V. Russian space nuclear power and nuclear thermal propulsion system. — Nuclear News, Publication of the ANS, December 2000, p. 33—46.
19. Ponomarev-Stepnoy N.N., Usov V.A. Russian space nuclear reactor power systems. — J. Revue Scientifique et Technique de la Defense, 2001, № 53, p. 27—37.
20. Корякин Ю.И., Пономарев-Степной Н.Н., Проценко А.Н. и др. Возможности и перспективы использования высокотемпературных ядерных реакторов для промышленного и коммунального теплоснабжения. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомно-водородная энергетика и технология, 1980, вып. 1 (6), с. 8—13.
21. Гельфанд Б.Е., Дорофеев С.Б., Безмельницын А.В., Чайванов Б.Б. Взрывные характеристики водородосодержащих смесей. — Организация научных исследований и разработок, ИРИС-91/5, Москва, 1991.
22. Пономарев-Степной Н.Н., Кузнецов В.В., Гагаринский А.Ю. и др. Будущее ядерной энергии: энергетика, экология, безопасность. — Атомная энергия, 2002, т. 93, вып. 5, с. 327—342.
23. Пономарев-Степной Н.Н., Столяревский А.Я. Атомно-водородная энергетика. Водород и атом — путь к чистой энергетике. — Тезисы докл. 2-го Межд. симп. «Безопасность и экономика водородного транспорта» IFSSSENT-2003, г. Саров, Россия.