

УДК 661.961:621.039.576

Производство альтернативного топлива на основе ядерных энергоисточников

А. Я. Столяревский

АНАТОЛИЙ ЯКОВЛЕВИЧ СТОЛЯРЕВСКИЙ — кандидат технических наук, директор Центра комплексно-го развития технологий и энерготехнологических систем (Центр КОРТЕС). Область научных интересов: ядерные энергоустановки, системы конверсии энергии.

123098 Москва, ул. Максимова, д. 4, тел. (499)197-53-19, факс (499)196-73-21, E-mail cortes@pike.net.ru

Уникальная способность высокотемпературных газоохлаждаемых ядерных реакторов (ВТГР) вырабатывать тепло с температурой до 950—1000 °С открывает возможности для высокоэффективного производства электроэнергии и водорода из воды, создания основ чистой водородной энергетики и замещения органического топлива в энергоемких отраслях промышленности [1, 2]. Переход на крупномасштабные технологии производства водорода из воды потребует значительных затрат на доработку самих технологий, чтобы сделать их конкурентоспособными, а также развития рынка водородного топлива и обеспечивающей этот рынок инфраструктуры.

В ближайшей перспективе основным производственным процессом получения водорода в промышленных масштабах останется конверсия природного газа. По мере роста затрат на добычу и доставку газа с удаленных промыслов все большее значение начинают приобретать технологии, сокращающие расход газа, сжигаемого как топливо, не только в энергетике, но и в других отраслях.

С этой точки зрения в перспективе появятся экономические стимулы для создания комбинированных технологий, в которых значительная часть энергетических процессов будет переводиться с углеводородного топлива на новые, более эффективные и безопасные для окружающей среды энергоисточники и, в первую очередь, для крупнотоннажных производств и большой энергетики – на высокотемпературные ядерные реакторы следующего поколения [3].

Ведущей разработкой высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов для различного применения стал проект модульного реакторного блока ГТ-МГР, созданный совместными усилиями компаний России, США, Японии [4].

На базе этого проекта по заказу Концерна «Росэнергоатом» выполнена концептуальная проектная проработка возможности привязки к реактору МГР производства водорода. В проекте с ядерной энергоустановкой МГР-Т в сочетании с процессом производства водорода паровой адиабатической конверсией метана примерно

вдвое сокращается расход природного газа и около половины водорода производится из воды [5].

Принципиальные особенности технологии АКМ в привязке к ВТГР обеспечивают бескислородное производство водорода при относительно невысоких капитальных затратах. На базе ядерно-водородного комплекса из 4-х модульных ВТГР МГР-Т единичной мощности 600 МВт (тепл) может быть создано производство примерно 0,5 млн т водорода с одновременной выработкой около 5 ТВт·ч электроэнергии в год.

Энерготехнологическое применение высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов требует разработки реакторной системы с системой преобразования энергии в прямом газотурбинном цикле и системы транспорта высокотемпературного тепла в блок производства водорода.

Россия, имеющая опыт реализации важнейших для страны и ее безопасности проектов, должна в международной кооперации занять достойное место по развитию водородной энергетики, что потребует организации совместных скоординированных усилий институтов, КБ и промышленных предприятий по реализации наиболее эффективных технологических решений. Это приведет к становлению нового динамичного бизнес-сектора, основанного на высоких технологиях преобразования и хранения энергии с помощью водородного энергоносителя. Такой подход полностью соответствует намеченной стратегии изменения энергетического базиса и повышения глобальной энергетической безопасности [6, 7].

Оценки технико-экономических характеристик коммерческих энергокомплексов с использованием высокотемпературных реакторов показывают экономическую эффективность этой линии развития (табл. 1).

Работы по использованию высокотемпературных реакторов для водородной энергетики разворачиваются в технологически развитых странах. США выделили 1,2 млрд долларов на разработку демонстрационного блока и определили потребность в 200 атомных станций для производства водорода из воды. Южная Корея запланировала 1 млрд дол. для создания демонстрационного блока для производства водорода из воды и плани-

Характеристики комплексов производства водорода на базе МГР-Т

Характеристики	МГР-Т с АКМ	МГР-Т с ВТЭ	МГР-Т с ТХЦ
Мощность тепловая, МВт _{тепл}	600 × 4 = 2400	600 × 4 = 2400	600 × 4 = 2400
Мощность электрическая, МВт	205,5 × 4 = 822	205,5 × 4 = 822	181,5 × 4 = 726
Производство H ₂ , тыс. т/год	400	216	59
Электроэнергия, кВт.ч/год	5302	—	5168
Тепловая энергия, Гкал/год	6688	2750	—
Себестоимость производства:			
водород, долл. США/т	1000	1330	2170
электроэнергия, долл. США/МВт.ч	16	—	17

рует к 2030 г. использовать водород, полученный на базе ВТГР, как автомобильное топливо, в количестве 20% от потребностей всего транспорта страны [7].

Аналогичные технологии и проекты развиваются интенсивно в Японии, Франции, ЮАР, Китае в рамках государственного финансирования.

В 60-х годах прошлого века в Советском Союзе Минсредмаш инициировал программу по атомно-водородной энергетике, при реализации которой был разработан ряд проектов ядерных реакторов: АБТУ-15, АБТУц-50, ВГ-400, ВГ-400ГТ, ВГМ, ВГМ-П. Данные проекты высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов в основном были нацелены на выработку тепла с температурой до 950 °С для существующих и перспективных технологических процессов по производству синтетического топлива из угля, водорода, аммиака и удобрений, переработке нефтепродуктов, интенсификации добычи нефти и централизованного дальнего теплоснабжения и т.д. Разработка проектов ВТГР сопровождалась созданием мощной экспериментальной и технологической базы для комплексных испытаний и отработки оборудования. Были созданы десятки различных исследовательских стендов [8].

В настоящее время разрабатывается проект высокотемпературного модульного гелиевого реактора с газовой турбиной ГТ-МГР в международной кооперации с фирмами США, Японии, Франции. В проекте ГТ-МГР активно используется задел, созданный в 1970-х годах в рамках программы по атомно-водородной энергетике. Работы финансируются на паритетной основе Росатомом и DOE/NASA (США).

В связи с работами по использованию высокотемпературных реакторов для водородной энергетики зарубежные партнеры заинтересованы в сотрудничестве с российскими предприятиями, поскольку такое сотрудничество снижает технический и финансовые риски разработок. Развитие отечественных высокотемпературных и водородных технологий позволит России сохранить лидирующие позиции в мире в области атомной энергетики [7].

Производство водорода

По данным на конец прошлого века, в странах с развитой экономикой 77% водорода получали из природного газа и нефтепродуктов, 18% — из угля, 4% из воды и 1% из прочего сырья.

Последние двадцать лет новейшие разработки в области получения водорода были направлены, главным образом, на поиск более эффективных технологий производства водорода из воды.

Паровая конверсия метана. В настоящее время крупнотоннажное производство водорода и водородсодержащих продуктов осуществляется в основном паровой конверсией природного газа — метана (ПКМ), и эта технология получения водорода в ближайшем будущем останется основной. Вместе с тем рост цен на углеводороды, сырьевые и экологические ограничения процесса ПКМ стимулируют разработку и применение промышленных процессов с использованием воды в качестве исходного сырья, что потребует подвода тепла при более высоких температурах по сравнению с освоенными ранее.

Если попытаться получать водород в необходимых количествах только из природного газа, то уже к 2025 году для производства 200 млн т водорода потребовалось бы сжигать 1200 млрд м³ природного газа, то есть примерно половину его сегодняшнего мирового потребления, что вызвало бы неприемлемую нагрузку в напряженном балансе газа.

Выход, по нашему мнению, заключается в применении новых ядерных источников — высокотемпературных реакторов для водородной энергетики, что при освоении технологий ПКМ позволит на 500 млрд м³ сократить расход газа (соизмеримо с производительностью концерна «Газпром»). В дальнейшем переход на разложение воды позволит полностью отказаться от углеводородов для получения водорода.

При проектировании реакторов типа ВТГР увеличение температуры теплоносителя на выходе из активной зоны с 850 °С (проект ГТ-МГР) до 1000 °С сильно осложняет выбор материала металлических конструкций

транспорта тепла, но в то же время не создает принципиальных проблем для графита и керамической облицовки реактора.

Высокотемпературный электролиз (ВТЭ) — это разновидность обычного электролиза. Часть энергии, необходимой для расщепления воды, расходуется на нагрев пара, что делает процесс более эффективным. Эффективность метода ВТЭ зависит от цены электроэнергии и температуры потребляемого тепла. Электролизу подвергается пар под давлением 3 МПа и 800 °С. Удельное потребление электроэнергии — 2,5 кВт·ч/м³. При этом массовое соотношение потребляемого пара и производимого водорода составляет 9:1.

При производстве водорода с применением ВТЭ могут использоваться установки, в которых высокотемпературное тепло от реактора непосредственно передается в первом контуре через теплообменник (ВТО) к пару, перегревая его до 800 °С. ВТО в данной схеме выполняет функции высокотемпературного пароперегревателя. Часть тепла с более низкой температурой преобразуется затем в электрическую энергию в электрогенерирующем блоке преобразования энергии (БПЭ), расположенном после ВТО. В зависимости от технико-экономических показателей БПЭ может быть как с газотурбинным, так и с паротурбинным циклом. Для перегрева пара до 800 °С гелий на выходе из реактора должен иметь температуру не ниже 900 °С. При использовании БПЭ с газотурбинным циклом необходимо усовершенствовать турбины для работы при температурах гелия на входе более 850 °С.

Предварительные технико-экономические оценки по производству водорода в перспективных процессах с выработкой тепловой и электрической энергии от МГР-Т показывают, что метод паровой конверсии метана конкурентоспособен с обычными технологиями при сегодняшних мировых ценах на природный газ и без учета потенциальной составляющей налогов на выбросы CO₂. При более высоких ценах на природный газ (рост более чем в 3 раза) конкурентоспособными и наиболее экономичными могут стать высокотемпературный электролиз и термохимические процессы типа серно-йодного. Оценки выполнялись при умеренных температурах используемого тепла в процессах не более 950 °С. Увеличение температуры гелия до 1000 °С позволяет повысить эффективность процессов производства водорода, однако при этом увеличивается стоимость реакторной установки. Из разработанных перспективных методов получения водорода с помощью ядерных реакторов только термохимические (включая ПКМ) и высокотемпературные электрохимические технологии обеспечивают эффективность на уровне не ниже 50% (при ПКМ существенно выше). Реализация таких технологий возможна при создании адекватного по температурным возможностям ядерного реактора с температурой нагрева теплоносителя выше 850 °С. Из предлагаемых по программе INPRO или G-4 инновационных проектов только реакторы с гелиевым теплоносителем (тепловые

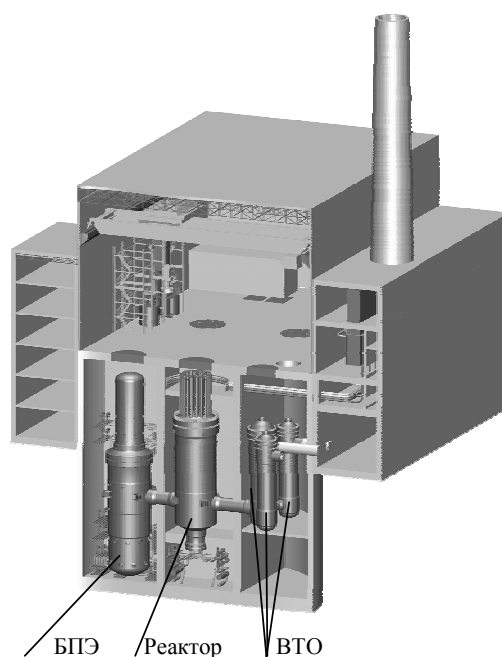


Рис. 1. Компоновка РУ МГР-Т для варианта с паровой конверсией метана

и быстрые) способны обеспечить столь высокую температуру подводимого тепла к агрегату получения водорода из воды. В настоящее время работы по энерготехнологическому комплексу с реактором МГР-Т для производства водорода направлены на решение узловых проблем стыковки ядерной энергоустановки типа ВТГР мощностью 600 МВт_{тепл} с прямым газотурбинным циклом с термохимическим производством водорода путем ПКМ или ВТЭ. На рис. 1 показан общий вид проектируемого реакторного модуля атомной энерготехнологической станции (АЭТС) на базе реактора МГР-Т с применением термоконверсионного агрегата для процесса конверсии метана (ТКА) с гелиевым нагревом.

Мировая потребность в водороде

Структура потребления водорода в странах с развитой экономикой примерно идентична. Крупнейшими потребителями (до 90% общего объема производства) остаются химическая и нефтеперерабатывающая отрасли. Остальные отрасли относятся к более мелким потребителям: металлургическая промышленность и обработка металлов, пищевая, электронная, фармацевтическая, стекольная, ракетно-космическая техника, использование в качестве топливного газа и др. В химической промышленности до 80% общего объема потребления водорода расходуется в процессах синтеза аммиака и метанола (чистота менее 99,5%).

Мировая торговля водородом ведется в ограниченных масштабах. Она наиболее активна в Западной Европе, где имеется небольшая, но развитая сеть трубопроводов по перекачке водорода между предприятиями.

Водород не является биржевым товаром, и говорить о его мировых ценах пока нельзя, поскольку цены при поставках являются контрактными и зависят от многих условий, в том числе от требуемой чистоты водорода. Диапазон цен на водород варьирует от 750 долл/т на отдельных заводах в России до 3000 долл/т у ряда потребителей в Западной Европе и США.

По различным прогнозам в XXI веке ожидается резкий рост спроса на водород в связи с увеличением глубины переработки нефти, развитием производства аммиака, метанола, облагороженного (например, из сланцев или битуминозных песков) и синтетического (в первую очередь, из угля) жидкого топлива, процессов прямого получения качественного железа и др. Наибольший вклад в перспективный рост мирового спроса на водород следует ожидать от автотранспорта и систем рассредоточенного энергоснабжения, в которых водород выступает как экологически чистый энергоноситель, который можно накапливать и транспортировать подобно природному газу.

Для различных сценариев развития мировой экономики и показателей ожидаемого уровня энергопотребления прогнозные оценки рыночного потенциала производства и потребления водорода изменяются от пренебрежимо малых объемов (в 1,5—2 раза превышающих нынешний уровень потребления этого продукта, равный примерно 6 EJ) до приоритетных стратегий водородной экономики с выходом потребления водорода на 300—400 EJ к 2100 г.

Считая основным перспективным потребителем водорода автотранспорт, его потребление в этом секторе может составить от 200 до 300 млн т в 2050 г., исходя из прогноза общей численности транспортных средств (ТС) 1,6 млн ед. и усредненного по регионам и секторам автотранспорта среднегодового расхода водорода 0,18 т/ТС.год при возможной доли водородного транспорта, равной, соответственно, 70 и 100% общего мирового автопарка к 2050 г.

К 2100 г., при росте числа ТС до 2,5 млн ед. (средне-европейский уровень обеспеченности при численности населения Земли около 10 млрд чел) рост производства водорода достигнет 450 млн т/год.

Общие потенциальные потребности в водороде по прогнозам на 2050 г. составят около 370 млн т H₂. После 2050 г., в связи с возможным дефицитом углеводородов и ограничением прямого сжигания угля, можно ожидать увеличения производства водорода для газификации угля и производства синтетического жидкого топлива. К 2100 г. только на производство 0,6—1,2 трлн нм³ синтетического метана потребуется до 200 млн т водорода.

За рамками приведенной выше оценки осталось потребление водорода автономными локальными потребителями и межрегиональные

поставки водорода для энергетических и технологических потребностей других отраслей. Термодинамические потери, связанные с многократным преобразованием энергии в таких схемах, приведут к тому, что даже для самых перспективных на сегодняшний день систем производства водорода и получения электроэнергии у потребителя с помощью ЭХГ, имеющих эффективность до 65%, с учетом затрат на компримирование и/или ожижение водорода и его транспортировку и возможных потерь, суммарная эффективность преобразования первичной энергии составит не более 20—25%.

Ниже представлены сводные показатели изменения структуры и масштабов мирового потребления водорода (табл. 2).

Рост потребления водорода, как ожидается, будет идти почти линейно (рис. 2), несмотря на заметные изменения внутренней структуры и увеличение доли таких потребителей как автотранспорт (с нуля до 55%) и синтетическое жидкое топливо (с нуля до 25%).

Рост потребности в водороде может быть обеспечен только при использовании для его производства ядерных источников энергии. Переход производства водорода на новые технологии будет происходить постепенно с переходом на ядерное топливо и использованием метана только как химического сырья по мере возрастания его стоимости.

Сочетание ВТГР и паровой конверсии метана позволяет примерно в 2 раза снизить расход, а, следовательно, и затраты на природный газ для производства водорода.

Наиболее радикальные изменения произойдут при освоении высокоэффективных процессов термохимического или высокотемпературного электрохимического разложения воды на базе ВТГР. Антропогенное влияние на окружающую среду в таком сценарии будет наименьшим в сравнении с альтернативами, основанными на биомассе или других способах экстенсивного преобразования солнечной энергии.

В пересчете на ядерные мощности, необходимые для производства указанных количеств водорода, в варианте «ВТГР-ПКМ» придется развернуть ядерно-водородные комплексы общей мощностью 1,500 ГВт_{тепл.} (с одновременным потреблением природного или синтетического

Таблица 2

Масштабы и структура рынка водорода в XXI веке, млн т

Отрасль потребления	2000 г.	2050 г.	2100 г.
Производство аммиака	20	50	87,5
Производство метанола	3	7,5	13
Нефтепереработка и нефтехимия	11	27,5	27,5
Металлургия	3	16	32
Производство синтетического топлива	Нет данных	—	180
Топливо для автотранспорта	—	260	450
Другие потребители, в т.ч. товарный водород	Менее 3	7,5	13
Всего	40	~370	~800

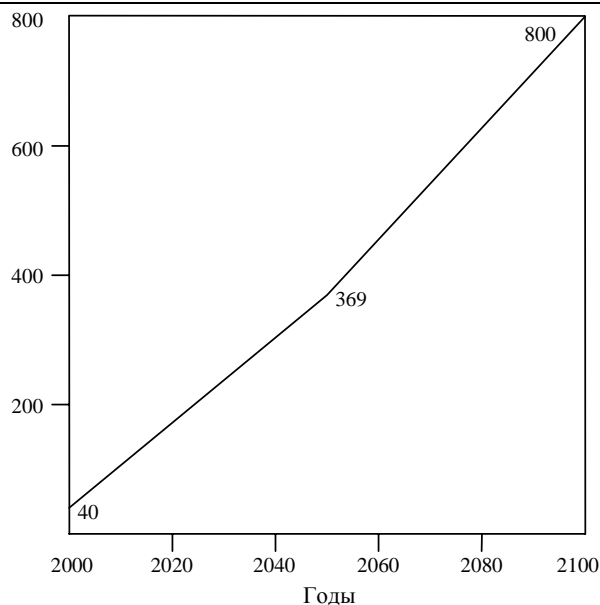


Рис. 2. Динамика мирового потребления водорода, млн т

метана в объеме 2,5—3 трлн м³), а в варианте «ВТГР-получение водорода из воды» (термохимическим ее разложением или высокотемпературным электролизом) ввод необходимых мощностей должен составить ~10,000 ГВт_{тепл.}, что соизмеримо с требуемым ростом ядерных мощностей для производства электроэнергии по сценариям интенсивного развития.

Промежуточная стратегия предусматривает использование технологии ВТГР-ПКМ в период, когда стоимость природного газа соизмерима со стоимостью ядерного тепла, производимого ВТГР. Затем, с ростом цен на природный или синтетический метан до уровня 500—600 дол. США(2003)/1000 нм³, что превышает стоимость ядерного тепла в 3,5—4 раза, станет уже конкурентоспособным водород, полученный разложением воды.

Существенное влияние на развитие атомно-водородной энергетики могут оказать международные соглашения о мероприятиях по защите окружающей среды.

Базовыми производителями водорода призваны стать АЭС с ВТГР. В частности, для модульных реакторных установок типа МГР-Т возможно применение различных процессов производства водорода: паровая конверсия метана, высокотемпературный электролиз и, после решения сложных проблем по созданию конструкций и материалов для агрессивных сред, термохимические циклы производства водорода из воды.

Предлагаемый путь перехода к водородной экономике строится на технологии использования энергии ВТГР в процессах производства водорода с высокой технико-экономической эффективностью. Процессы по возможности должны исключать потребление органического топлива, прежде всего нефти и газа, ценного сырья для промышленности, запасы которых ограничены.

В то же время для первого этапа освоения водородной энергетики, при еще относительно низких ценах на природный газ рассматривается и процесс получения водорода из метана. Для последующих этапов применения предлагаются процессы с использованием в качестве сырья природной воды: термохимическое разложение воды и высокотемпературный электролиз водяного пара.

Выполненные проектные исследования по реакторной установке МГР-Т показали, что:

— данная реакторная установка может рассматриваться как перспективная технология для высокоэффективного производства водорода и электроэнергии;

— развитые свойства самозащитности и использование пассивных систем безопасности обеспечивают высокий уровень ее безопасности;

— предварительный технологический задел, созданный по конструкционным материалам, топливу и оборудованию показывает, что нет непреодолимых технических барьеров для реализации предлагаемой концепции МГР-Т.

Выполненные предварительные технико-экономические оценки производства водорода из метана и воды на базе реакторной установки МГР-Т показали конкурентоспособность данной энерготехнологии в рассмотренных экономических условиях на период устойчивых мировых цен на природный газ.

На основе энергоисточников этого типа создана возможность вводить энерготехнологические комплексы для регионального энергоснабжения, решающего, в том числе, задачи поставки топлива для транспорта и низкопотенциального тепла для бытовых нужд и коммерческого сектора. Особую роль в реализации такого комплексного системного освоения новых энергоисточников, как это не раз уже было в прошлом, призвана, конечно, сыграть атомная отрасль, включившая это направление в число своих основных приоритетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А.П., Пономарев-Степной Н.Н. 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. Вopr. атом. науки и техн. Сер. Атомно-водородная энергетика, 1976, вып. 1, с. 5—34.
3. Александров А.П., Легасов В.А., Сидоренко В.А. и др. Атомная энергия, 1977, т. 43, вып. 6, с. 427—432.
4. Костин В.И., Кодочигов Н.Г., Васяев А.В. и др. МГР-Т — инновационная ядерная технология для комбинированного производства водорода и электроэнергии. Докл. на 2 Рос. научно-техн. конф. МАЯТ-2, 6-30 сентября 2005 г.
5. Столяревский А.Я. Ядерно-технологические комплексы на основе высокотемпературных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1988.
6. Пономарев-Степной Н.Н., Столяревский А.Я. Альтернативная энергетика и экология, 2004, № 3, с. 11.
7. Forsberg C. The advanced high-temperature reactor for hydrogen production, 15/5/02 GA Workshop, 2002.
8. Митенков Ф.М., Кодочигов Н.Г., Васяев А.В. и др. Атомная энергия, 2004, т. 97, вып. 6, с. 432—446.