

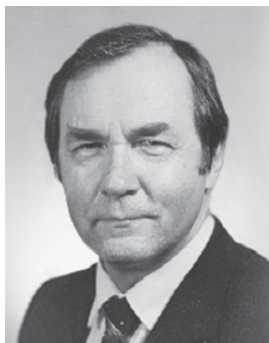
АТОМНО-ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Н. Н. Пономарев-Степной, А. Я. Столяревский

РНЦ «Курчатовский институт»

пл. И. В. Курчатова, 1, Москва, 123182, Россия

Тел.: (095) 196-90-66; факс: (095) 943-00-74; e-mail: niknik@kiae.ru



Пономарев-Степной
Николай Николаевич

Сведения об авторе: вице-президент РНЦ «Курчатовский институт», зам. директора ИЯР, директор ОтВЭ; член Ядерного общества России, редактор журнала «Атомная энергия», член редколлегии журнала «Nuclear Science and Engineering»; доктор техн. наук, профессор, академик РАН, лауреат Ленинской и Государственной премий.

Образование: МИФИ (1952 г.), специальность «Проектирование и эксплуатация физических приборов и установок».

Область научных интересов: перспективы развития ядерно-энергетического комплекса, структура атомной энергетики, физика и техника реакторов и техника термоэмиссионного преобразования энергии, ядерная и радиационная безопасность, радиационная стойкость ядерных материалов, нераспространение и контроль ядерных материалов, ядерный топливный цикл (диспозиция Pu, использование Th).

Публикации: более 150 научных работ.



Столяревский
Анатолий Яковлевич

Сведения об авторе: родился 08.08.1951 г.; кандидат техн. наук (1982 г.).

Образование: факультет «Двигатели летательных аппаратов» МАИ (1973 г.), специальность «Космические энергоустановки».

Профессиональный опыт:

■ с 1973 г. по настоящее время — Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова (с 1992 г. — РНЦ «Курчатовский институт»);

■ 1979 г. — начальник группы;

■ с 1982 г. — начальник лаборатории энерготехнологических систем, член Международной ассоциации по водородной энергетике;

■ с 1986 г. — директор советско-германского проекта атомной энерготехнологической станции с ВТГР;

■ с 1991 г. — директор центра комплексного развития технологий и энерготехнологических систем (КОРТЭС);

■ с 1991 — вице-президент Российского энерготехнологического конгресса.

Публикации: более 100 статей и докладов.

Hydrogen is highly effective and ecologically clean fuel. Large-scale use of hydrogen is mastered in industrial chemical processes and rocket engineering. Manufacture of hydrogen in the world has exceeded 50 Mt H₂ (6.4 EJ) and quickly grows.

In the article it is considered the concept of Nuclear-hydrogen power (NHE) as strategy of production and use of hydrogen on base of «clean» technologies and, first of all, modern innovative high-temperature nuclear energy sources (NES) such as GT-MHR, modified under application to steam conversion of methane (SCM).

The increase of a share NES in a world energy balance is capable essentially to affect structure of organic fuel consumption, and, therefore, on resulting flows of hydrocarbons and CO₂ emissions.

The analysis of various sectors NHE is submitted and are given prognoses of an estimation of scales of its development in XXI century.

Водород — высокоэффективное и экологически чистое топливо. Его производство в мире на сегодняшний день превысило 50 Мт (6,4 ЭДж) и продолжает возрастать. Крупномасштабное

использование водорода освоено в промышленных химических процессах и ракетной технике. Дополнительные возможности увеличения доли ядерных энергоисточников (ЯЭИ) в миро-

вом энергобалансе способны существенно повлиять на структуру потребления ЭИ на органическом топливе, а, следовательно, и на результирующие показатели по потокам углеводородов и выбросы CO_2 .

Разработанная в начале 1970-х гг. концепция широкого использования производимого из воды с помощью ядерных реакторов водорода как энергоносителя в промышленности, в энергетике, на транспорте и в быту названа атомно-водородной энергетикой (АВЭ) [1–6].

При реализации концепции существенно возрастают возможности решения проблем производства и потребления энергии. Производство и использование водорода при работе «чистых» энергоисточников практически не сопровождается вредными выбросами в атмосферу. АВЭ предусматривает расширенное использование ядерной энергии для энергоемких отраслей химической, металлургической, строительной, топливной промышленности и транспорта. Сюда же можно включить теплоснабжение распределенных потребителей с использованием хемотермической передачи энергии от ядерно-конверсионных центров на основе высокотемпературных гелиевых реакторов (ВТГР). И, наконец, концепция предполагает крупномасштабное производство пресной воды.

АВЭ требует создания нового экономического и структурного подхода к производству и потреблению энергии. Энергогенерирующие и сетевые компании будут производить и транспортировать не только электричество, в их функции войдут производство водорода и других энергоносителей на его основе, их транспорт, хранение и распределение, децентрализация

энергоснабжения (включая дальнейшее хемотермическое теплоснабжение), производство и распределение пресной воды. АВЭ поможет сохранить нефть и газ для неэнергетических производств, обезопасить атмосферу от вредных выбросов продуктов сгорания и будет способствовать снижению риска распространения ядерных материалов: АВЭ дает возможность поставлять энергетическим рынкам развивающихся стран готовые энергоресурсы (водород и его производные) вместо ядерных реакторов и ядерных материалов.

Развитие АВЭ потребует значительных усилий по изучению и разработке многих специальных технологий в этом направлении: высокотемпературных реакторов, термохимических и термоэлектрохимических агрегатов для производства водорода из воды, водородных топливных элементов, хемотермических преобразователей, хранения и транспорта водорода и т. д. При освоении АВЭ должны быть решены проблемы водородной безопасности на всех этапах: при производстве, хранении, транспорте, использовании.

Технологии производства водорода

По данным конца XX в., в странах с развитой экономикой 77 % водорода получали из природного газа и нефтепродуктов, 18 % — из угля, 4 % — из воды и 1 % — из прочего сырья (табл. 1).

В настоящее время наиболее распространенным является мнение, что в будущем из всех ископаемых источников, пригодных для получения водорода, применяться будет только уголь. Вопреки этому мнению последние 20 лет новейшие разработки в области получения водорода

Таблица 1

Основные технологии получения водорода

Технология производства водорода	Затраты энергии (кВт·ч/нм ³)		Сырье	Эффективность использования первичной энергии, %	Форма подвода энергии	Доля общего производства, %
	теор.	практ.				
Паровая конверсия метана	0,78	2–2,5	природный газ (ПГ)	70–80	тепло + пар	48
Термолиз метана			ПГ	54	тепло	
Окисление тяжелых нефтей	0,94	4,9	тяжелая нефть	70	тепло	30
Риформинг нефти			нафта		тепло	
Газификация угля (TEXACO)	1,01	8,6	уголь	60	тепло	18
Частичное окисление угля			уголь	55	сжигание в процессе	
HYDROCARB	3,54	4,9	уголь		тепловая	
Железопаровой			уголь	46	тепловая	
Щелочной электролиз	3,54	4,9	вода	28	электроэнергия	4
Высокотемпературный электролиз			вода	48	электроэнергия	
Термохимические циклы			вода	35–45	тепло	—
Конверсия биомассы			биомасса		тепло	—
Фотолиз			вода	10	свет	—

были направлены главным образом на поиск более эффективных, чем традиционный электролиз, технологий производства водорода из воды, которая в долгосрочной перспективе может оказаться основным источником получения водорода с помощью ядерной и нетрадиционных возобновляемых видов энергии.

На сегодняшний день крупнотоннажное производство водорода и водородосодержащих продуктов в мире осуществляется в основном путем паровой конверсии метана (ПКМ). Чтобы отделить водород от углеродной основы в метане, требуются пар и тепловая энергия при $T = 750\text{--}850^\circ\text{C}$. Процесс проходит в химических паровых риформерах на каталитических поверхностях. Для осуществления эндотермического процесса ПКМ сжигается около половины исходного газа, что приводит к загрязнению окружающей среды продуктами сгорания. С целью экономии природных ресурсов и снижения негативного влияния на окружающую среду в России, США и Японии ведутся разработки технологии ПКМ с подводом тепла от ВТГР. Создание тандема ВТГР + ПКМ открывает путь широкого применения ядерной энергии для производства водорода и другой продукции в энергоемких отраслях промышленности — крупнотоннажной химии и металлургии. Синтез-газ ($\text{CO} + x\text{H}_2$), получаемый на таком комплексе, может поставляться на производства аммиака, метанола, нефтепереработку, прямое восстановление железа. Территориальная модель такого комплекса (ядерно-конверсионного центра) состоит из ядерно-технологической части, вырабатывающей синтез-газ, который транспортируется к химико-технологической части производства, где используется для выработки конечной продукции. Масштабы теплоэнергопотребления подобных производств соизмеримы с мощностями энергоисточников в атомной энергетике.

Структура потребления водорода в странах с развитой экономикой примерно идентична. Крупнейшие потребители (до 90 % общего объема производства) — химическая и нефтеперерабатывающая отрасли. В химической промышленности около 80 % общего объема потребления водорода расходуется в процессах синтеза аммиака и метанола (чистота продукта менее 99,5 %)*. К мелким потребителям относятся: металлургическая и металлообрабатывающая, пищевая, электронная, фармацевтическая, стекольная отрасли промышленности, ракетно-космическая техника, а также использование водорода в качестве топливного газа и др.

Основное количество водорода производят на местах его потребления, что становится ха-

рактерным и для некрупных потребителей (пищевая промышленность, электроника). Крупным потребителям, не имеющим собственного производства, водород поставляется либо по трубопроводам, либо в жидком виде, в том числе высокочистый (99,995 %).

Мировая торговля водородом пока ограничена и наиболее активна в Западной Европе, где имеется небольшая, но развитая сеть трубопроводов и два основных производителя и поставщика водорода — немецкая фирма «Chemische Werke Huls» и французская «L’Air Liquide». Поскольку водород не является биржевым товаром, говорить о его мировых ценах невозможно, так как цена при поставках является контрактной и зависит от многих условий.

Электролиз и термохимические процессы расщепления воды

По-видимому, в ближайшем будущем технологии получения водорода с использованием органического сырья останутся ведущими. Однако сырьевые и экологические ограничения процесса ПКМ стимулируют разработку и применение промышленных процессов производства водорода с использованием воды в качестве исходного сырья. Среди способов получения водорода из воды наибольший интерес в контексте АВЭ представляют электролиз и термохимические циклы, или комбинированные термоэлектрохимические циклы.

Термохимический процесс получения водорода с КПД до 50 % использует цикл реакций с химически активными соединениями, например, соединениями брома или йода, и требует подвода тепла при температуре около 1000°C . В ведущих странах мира этому процессу уделяется особое внимание как потенциально эффективной технологии производства водорода из воды с помощью ВТГР. Источником тепла при термохимическом разложении воды служит высокотемпературный реактор. На отдельных стадиях процесса такого типа наряду с термическим воздействием для отщепления водорода может использоваться электролиз участвующих в процессе химических реагентов. В случае комбинации термохимии с электролизом или при электролизе (в том числе высокотемпературном) ядерный реактор служит источником тепла и электроэнергии.

Изучено много комбинаций химических реакций, в которых вода расщепляется в замкнутом цикле с поглощением тепла и электричества. Такой цикл может быть построен и на базе ПКМ, при которой 50 % водорода производится не из метана, а из воды. Довести в этом цикле долю водорода, получаемого расщеплением воды,

* В мире на производство аммиака расходуется примерно 20 Мт H_2 (~40 % его мирового потребления), около 3 Мт H_2 — на синтез метанола (на этом производстве работают агрегаты мощностью 3000 т/сутки).

При прямом восстановлении железа, в частности, на Оскольском электрометаллургическом комбинате, расход водорода составляет 630 нм³/т железа. Прогнозируют увеличение мирового производства продуктов прямого и порошкового восстановления железа с 45 млн. т (2000 г.) до 60 млн. (2005 г.), что потребует производства ~4 млн. т водорода в качестве восстановителя.

до 100 % и тем самым полностью избежать расхода метана как сырья можно путем получения в качестве промежуточного продукта метанола с последующим электрохимическим восстановлением метана, возвращаемого в начало процесса. Такая технология может стать рентабельной при условии роста цен на природный газ.

Выбор оптимального процесса определяется рядом критериев, среди которых важнейшими являются эффективность цикла, термодинамические и кинетические характеристики отдельных реакций, доступность и стоимость реагентов, совместимость реагентов и конструкционных материалов, безопасность процесса, экологические соображения и экономические показатели.

Исследования показали, что достижение достаточно высокой эффективности в производстве водорода требует высоких температур на выходе из реактора. На рис. 1 показана зависимость расчетной эффективности процесса получения водорода в термохимическом серно-йодном (SI) цикле от температуры термолитической серной кислоты.

При создании реакторов типа ВТГР увеличение температуры теплоносителя на выходе из активной зоны с 850 °C (проект ГТ-МГР) до 1000 °C создает трудности при выборе материала металлических внутрикорпусных конструк-

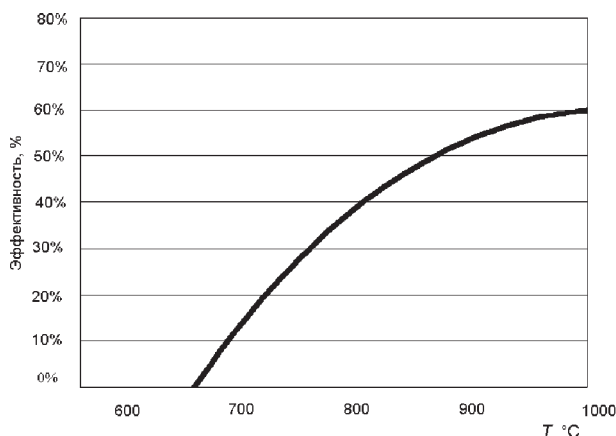


Рис. 1. Эффективность теоретического SI-цикла в зависимости от температуры процесса

ций, но в то же время не является принципиальной проблемой для графита и керамики.

В случае использования термохимического SI-цикла в процессе получения водорода потребуются применение промежуточного контура между первым контуром и химико-технологическим блоком для того, чтобы исключить смешение коррозионно-агрессивных технологических сред с теплоносителем первого контура при возможной течи теплообменника.

Введение промежуточного контура несколько снижает общую эффективность цикла. Так, например, при температуре на выходе из реактора 950 °C и передаче тепла в производство водорода SI-процессом через промежуточный гелиевый контур теоретический КПД самого про-

цесса (при температуре термолитической серной кислоты 830 °C) составит около 45 %. Однако учет затрат на прокачку гелия промежуточного контура и тепловых потерь по тракту горячего трубопровода гелия промежуточного контура снижают эффективность использования тепла данным методом до 36 %.

Высокотемпературный электролиз является разновидностью обычного электролиза. Часть энергии, необходимой для расщепления воды, вкладывается в виде высокотемпературного тепла в нагрев пара, делая процесс более эффективным. Для температур ниже 900 °C разработана концепция стыковки ВТГР с высокотемпературными электролизерами, позволяющая иметь суммарный КПД производства водорода из воды до 50 %.

Из разработанных и рассматриваемых в перспективе методов получения водорода наиболее конкурентоспособными являются термохимические (включая ПКМ) и высокотемпературные электрохимические технологии, обеспечивающие эффективность до 50 %, а в случае ПКМ — почти до 100 %.

Реализация таких технологий возможна только при создании адекватного по температурным возможностям ЯЭИ (с температурой нагрева теплоносителя выше 800–850 °C). Из предлагаемых по программе INPRO или G-4 инновационных ЯЭИ только реакторы с гелиевым теплоносителем (тепловые и быстрые) способны обеспечить необходимую температуру теплоподвода. В настоящее время ведутся работы по энерготехнологическому комплексу с реактором МГР-Т для производства водорода, направленные на решение узловых проблем стыковки ядерной энергоустановки типа ВТГР мощностью 600 МВт_{тепл} с прямым газотурбинным циклом и термохимического производства водорода путем ПКМ или SI-цикла. На рис. 2 показан общий вид стенда ХТС для отработки технических решений термоконверсионного агрегата с гелиевым нагревом для процесса конверсии метана.

Потенциальные масштабы применения ИЯС для производства водорода

По различным прогнозам (IIASA, IAEA, IEA, EPRI и др.) в нынешнем столетии ожидается резкое повышение спроса на водород в связи с переходом различных базовых технологических отраслей на интенсивные методы производства качественных продуктов с увеличением глубины переработки нефти, большего выпуска аммиака и метанола, производств обогащенного (например, из сланцев или битуминозных песков) или синтетического (в первую очередь, из угля) жидкого топлива, ростом масштабов прямого получения качественного железа и др.

Однако наибольшего влияния на повышение мирового спроса на водород следует ожидать от автотранспорта и систем рассредоточенного энергоснабжения, где водород выступает в качестве



Рис. 2. Стенд ХТС (РНЦ «Курчатовский институт») [9]

ве энергоносителя, способного накапливаться и транспортироваться (как природный газ), но не имеющего ограничений по ресурсной базе (как метан) и не загрязняющего атмосферу.

Прогнозные объемы производства водорода зависят от выбора сценария развития мировой экономики и показателей ожидаемого уровня энергоснабжения. В этой связи в различных моделях оценки рыночного потенциала объемов производства водорода варьируются от пренебрежимо малых (с точки зрения глобального энергобаланса) показателей, в 1,5–2 раза превышающих нынешний уровень потребления этого продукта, равный примерно 6 ЭДж, до приоритетных стратегий водородной экономики с выходом потребления водорода на 300–400 ЭДж к 2100 г.

Ниже приведен анализ современных тенденций и прогнозируемых стратегий, позволяющий уточнить сложившиеся представления.

Динамика изменения доли водородных технологий в энергообеспечении основных энергоемких отраслей ожидается весьма высокой (ННА, 2000). Агрегированная доля электрохимических генераторов (ЭХГ) в сценарии В1–Н2 достигнет 51 % в 2050 г. и возрастет до 71 % в 2100 г. (рис. 3). В первую очередь рост водородных технологий развивается в секторе транспортного потребления, где и происходит основной переход от традиционных технологий, основанных в большинстве транспортных средств (ТС) на двигателях внутреннего сгорания, на водородные ЭХГ.

В сценарии В1–Н2 (рис. 3) по сравнению со сценарием IIASA B2/SRES, 2000, Riahi and Roehrl, 2000, который можно считать моделью обычного изменения во времени («dynamics-as-usual»), пиковые выбросы CO_2 достигают 10,5 Гт углерода (ГтС) в 2040 г. и снижаются до 5,7 ГтС к 2100 г., тогда как в сценарии В2 рост эмиссии парниковых газов сдержать не удастся, и выбросы непрерывно растут до уровня 14,2 ГтС к 2100 г.

Если считать автотранспорт основным перспективным потребителем водорода, потенциаль-

ные масштабы его потребностей в этом секторе на 2050 г. можно оценить в 200–288 Мт. При получении этой оценки общая численность ТС принята равной 1600 млн. ед. (согласно прогнозу), среднегодовой расход водорода — 0,18 т на каждое ТС, возможная доля ТС на водороде — 70–100 %. Если к 2100 г. число ТС вырастет до 2500 млн. ед. (эту оценку дает среднеевропейский уровень обеспеченности транспортом населения Земли в 10 млрд. человек), то рост производства водорода достигнет 450 млн. т/год.

Масштабы неавтомобильного потребления метанола составят среднеэнергетический рост, т. е. увеличатся в 2,5 раза к 2050 г. (медиана сценариев SRES), тогда производство водорода к этому времени возрастет до 7,5 млн. т.

При аналогичном по темпам ожидаемом росте потребления аммиака производство водорода к 2050 г. составит 50 млн. т.

В нефтепереработке и нефтехимии углубление переработки нефти будет противостоять в росте потребления водорода снижению темпов добычи нефти, что в результате, как ожидается, приведет к росту потребления водорода в этом секторе до 27,5 млн. т.

По всем перечисленным секторам потенциальные потребности в водороде суммарно составят ~373 млн. т к 2050 г. Затем, в связи с возможным дефицитом углеводородов и ограничением прямого сжигания угля, можно ожидать увеличения производства водорода для газификации угля и производства из угля синтетического жидкого топлива (СЖТ) с темпами, обеспечивающими выход к 2100 г. на производство 0,6–1,2 трлн. nm^3 синтетического метана (включая в эту цифру и эквивалентное производство СЖТ), что потребует производства 90–180 млн. т водорода.

Логично ожидать, что потребление аммиака и метанола в химической промышленности за период 2050–2100 гг. вырастет в 1,75 раза, т. е. будет соответствовать темпам роста общего энергопотребления, которое, по сценарию WEC-B, достигнет 34,7 Гт н. э. Тогда к 2100 г.

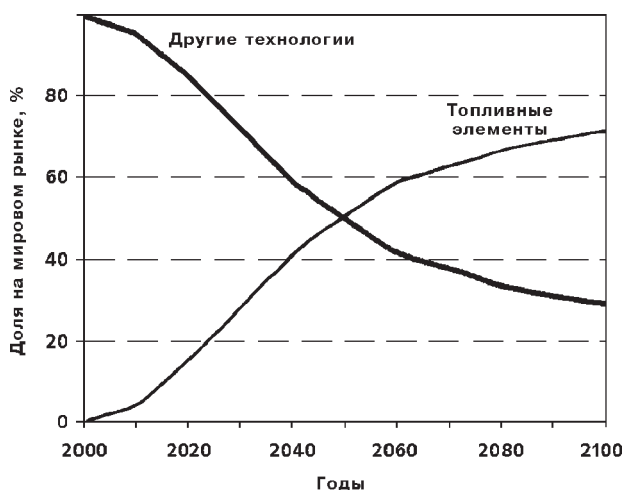


Рис. 3. Возможная динамика замены технологий при развитии ЭХГ на водороде

азотная промышленность потребит 87,6 млн. т водорода, а производство метанола — 13 млн. т. Потребности автотранспорта в водороде здесь не учитываются.

Потребление водорода в металлургии, как ожидается, будет идти опережающими темпами и может составить 16 млн. т к 2050 г. (рост прямого получения железа до 240 млн. т), а к 2100 г. достичь 32 млн. т.

Примем сценарий стабилизации потребления водорода в нефтехимии и нефтепереработке (после 2050 г.) на уровне 27,5 млн. т, тогда суммарное производство водорода для нужд пересчитанных выше секторов составит к 2100 г. 700–790 млн. т.

За рамками приведенных выше оценок осталось потребление водорода для обеспечения автономных локальных потребителей и межрегиональные поставки для энергетических нужд и технологических потребностей других отраслей.

Даже самые перспективные на сегодняшний день системы производства водорода из воды имеют эффективность не более 50 %, а производство электроэнергии с помощью ЭХГ имеет КПД не выше 60 %. Это означает, что с учетом затрат на компримирование и(или) ожижение водорода, его транспортировку, а также с учетом возможных потерь суммарная эффективность преобразования первичной энергии в таких системах составит не более 20–25 %.

Капитальные затраты на создание таких систем также будут ограничивать уровень их конкурентоспособности, делая приемлемыми и эффективными лишь в частных проектах, общие масштабы которых могут быть весьма значительны, хотя вряд ли превысят 10–20 % от суммарных потребностей в основных секторах потребления водорода.

Таким образом, к 2100 г. может развиваться крупномасштабный рынок применения водорода в качестве вторичного энергоносителя и сырьевого компонента. Потенциальные масштабы такого рынка составят 770–950 млн. т/год.

В пересчете на требуемые мощности ЯЭИ, необходимые для производства указанных количеств водорода, придется развернуть ядерно-водородные комплексы общей мощностью 1,232–1,520 ГВт_{тепл} (с одновременным потреблением природного или синтетического метана в объеме 2,5–3 трлн. м³) в варианте ВТГР + ПКМ или ВТГР – получение водорода из воды ее термохимическим разложением или высокотемпературным электролизом. Ввод необходимых мощностей должен составить более 11,0–13,5 ГВт_{тепл}, что соизмеримо с требуемым ростом ЯЭИ для производства электроэнергии по сценариям А1Т и В1. По видимому, реализовываться будет какая-то промежуточная стратегия, использующая технологию ВТГР + ПКМ периода соизмеримости стоимости природного газа со стоимостью ядерного тепла, производимого ВТГР. При уве-

личении стоимости природного или синтетического метана до уровня, превышающего стоимость ядерного тепла в 3,5–4 раза, т. е. до 500–600\$ за 10³ нм³ метана (2003 г.), водород, полученный термохимическим разложением воды, станет конкурентоспособным.

Подчеркнем, что использование качественных вторичных энергоносителей (электроэнергии, водорода) в крупных секторах энергопотребления (теплоснабжение, в том числе промышленное и коммунально-бытовое) с термодинамической точки зрения неоправданно и применимо только в системах типа тепловых насосов, восстанавливающих исходный тепловой потенциал, или в электротехнологиях, обеспечивающих резкое (в 3–4 раза) снижение энергозатрат и повышение производительности труда в конечных технологиях получения качественного продукта (порошковая металлургия, лазерные технологии упрочнения и т. д.).

Существенное влияние на развитие АВЭ могут оказать институциональные факторы, в первую очередь, международные соглашения о мероприятиях по защите окружающей среды.

Список литературы

1. Атомно-водородная энергетика — энергетика будущего. Бюлл. по атомной энергии. Май, 2003.
2. Шпильрайн Э. Э., Малышенко С. П., Кулешов Г. Г. Введение в водородную энергетику / Под ред. В. А. Легасова. М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. Столяревский А. Я. Ядерно-технологические комплексы на основе высокотемпературных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1988.
4. Атомно-водородная энергетика и технология. М.: Энергоатомиздат, 1978–1988. Вып. 1–8.
5. Пономарев-Степной Н. и др. Перспективы развития газовой и ядерной отраслей в России // Ядерное общество России. 2000. № 5–6.
6. Рачков В. И., Экономика атомной энергетики // Вестник концерна Росэнергоатом. 2002. № 10(34).
7. Fuel Cell Market Prospects and Intervention Strategies. Final Report. ICCEPT, UNEP. 2002.
8. Marc W. Melaina. Initiating hydrogen infrastructures preliminary analysis of a sufficient number of initial hydrogen stations in the US // Int. J. of Hydrogen Energy. 2003. Vol. 28, No. 7.
9. Forsberg C. The advanced high-temperature reactor for hydrogen production, 5/15/02 GA Workshop, 2002.
10. Market potential for non-electric applications of nuclear energy // Technical reports series. No. 410. International Atomic Energy Agency. Vienna, 2002.
11. INPRO, Phase I-A report. IAEA TECDOC 1362. June 2003.
12. Hydrogen as an energy carrier and its production by nuclear power. IAEA-TECDOC-1085. May 1999.