

**УДК 620.9; 504.064****Ю.М. МАЦЕВИТЫЙ**, академик НАН Украины, докт. техн. наук, профессор, директор,**В.В. СОЛОВЕЙ**, докт. техн. наук, профессор, заведующий отделом,**А.А. ТАРЕЛИН**, канд. техн. наук, доцент, заведующий отделом

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины (ИПМаш НАНУ), г. Харьков

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА ОСНОВЕ ВОДОРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Рассмотрены актуальные аспекты использования водорода в качестве эффективного экологически чистого энергоносителя. Предложены подходы к созданию инновационной программы развития водородной энергетики с учетом возможностей внедрения результатов научных исследований по замещению водородом традиционных энергоносителей на транспорте, в стационарной энергетике, промышленности и коммунально-бытовой сфере Украины.

Ключевые слова: водородные технологии, энергоэффективность, возобновляемые источники энергии, экологическая безопасность.

Основные вызовы современности, связанные с повышением эффективности использования энергетических ресурсов, определяют актуальные приоритеты научно-технологического развития, которые направлены:

- на повышение устойчивости действующей энергетической системы за счет широкого использования разнообразных энергетических источников, в т.ч. возобновляемых, не загрязняющих окружающую природную среду (ОПС), и меньшей зависимости от импортируемых топлив;
- увеличение энергоэффективности, включая рациональное использование и хранение энергии;
- энергобезопасность, устраняющую зависимость энергетики от поставок сырья и изменения климата;
- повышение конкурентоспособности промышленных предприятий.

Согласно прогнозу экспертов Международного энергетического агентства развитие мирового топливно-энергетического комплекса (ТЭК) в ближайшей перспективе будет базироваться на замещении углеводородных ископаемых топлив, обеспечивающих в настоящее время более 90 % объема мирового потребления энергии, альтернативными и возобновляемыми энергоносителями, среди которых особое место занимает водород [1].

Анализ тенденций развития топливно-энергетического сектора экономики индустриально развитых стран показывает, что радикальным средством разрешения экологических проблем, связанных с энергопотреблением, является расширение сферы применения водорода в качестве универсального энергоносителя и технологи-

ческого сырья. Такой подход лежит в основе стратегической концепции водородной энергетики, реализуемой в рамках ряда международных и национальных программ США, Канады, стран ЕС, Японии, Китая и России.

Характеризуя современное состояние водородной энергетики, следует отметить качественные изменения, прошедшие за последние десятилетия в этой области. Если ранее основное внимание уделялось технологическим и энергетическим аспектам, то в настоящее время на первый план выходят экологические и экономические составляющие проблемы создания межотраслевой инфраструктуры, обеспечивающей широкомасштабное использование водорода как эффективного экологически чистого энергоносителя на транспорте и в стационарной энергетике.

Водород уже сегодня применяют в качестве промежуточного реагента в химической, нефтеперерабатывающей, металлургической и многих других отраслях промышленности. Накопленный отечественный и международный опыт его использования полезен как при решении задачи замещения традиционных энергоносителей на мировом рынке, так и при разработке инновационных программ развития водородных технологий в Украине. Это ценная техническая и психологическая база для более широкого использования водорода в промышленной и коммунально-бытовой сферах.

Сложившаяся экстремально тяжелая ситуация в ТЭК нашей страны, особенно в газовом секторе (структура потребления первичных энергоносителей в Украине представлена на рис. 1), является дополнительным стимулом для ускорения темпов перехода к водородной экономике.



Рисунок 1 – Структура потребления первичных энергоносителей в Украине

Следует отметить, что на фундаментальных и прикладных исследованиях в области энергетики и энергоэффективности сосредоточено внимание ряда целевых программ НАН Украины: «Водород в альтернативной энергетике и новейших технологиях», «Биотопливо», «Научно-технические основы решения проблем энергосбережения», «Научно-технические проблемы интеграции энергетической системы Украины в Европейскую энергетическую систему».

Интерес к водороду как к эффективному и экологически чистому энергоносителю носит весьма многоплановый характер, охватывая широкий диапазон от чисто научных до сугубо практических задач. Именно поэтому в междисциплинарных исследованиях по целевой программе «Фундаментальные проблемы водородной энергетики», которая предшествовала текущей программе «Водород в альтернативной энергетике и новейших технологиях», было задействовано более 25 институтов НАН Украины, реализовано свыше 65 исследовательских проектов по трем тематическим направлениям: «Производство водорода», «Хранение водорода» и «Использование водорода». Среди этих проектов – исследования технологий производства водорода (Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины – ИПМаш НАНУ); глубокой очистки водорода и гибридных солнечно-водородных установок (Институт газа); синтеза порошков для топливных элементов (Институт общей и неорганической химии им. В.И. Вернадского); новых материалов для производства топливных элементов и систем хранения (Институт проблем материаловедения им. И.М. Францевича НАН Украины); полимерных топливных элементов и матери-

алов для их производства (Институт химии высокомолекулярных соединений); технологий и оборудования для неразрушающего контроля систем хранения и транспортировки водорода (Институт электросварки им. Е.О. Патона); аккумуляирования водорода в наноструктурных сплавах (Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт») и многие другие [2].

Остановимся на конкретных возможностях использования и внедрения результатов научных исследований в отечественную экономику.

В связи с наличием в Украине богатых запасов каменного и бурого угля в качестве перспективных технологий получения водорода можно рассматривать методы, базирующиеся на парофазной плазмохимической конверсии водорода из углей указанных видов и торфа. Особого внимания заслуживает метод производства водорода путем подземной газификации угля (на месте его естественного залегания), так как стоимость полученного таким образом водорода в два-три раза ниже, чем в случае применения других технологий. Кроме того, перспективным является способ генерирования водорода с помощью энергоаккумулирующих веществ, получаемых, в частности, из минеральной составляющей энергетических углей в процессе их сжигания на тепловых электрических станциях.

Применение энерготехнологических схем на основе водорода даст возможность резко сократить, а в отдельных случаях полностью вытеснить естественные органические топлива из энергоемких производств. Поскольку природные энергоресурсы ограничены, а газ и нефть в перспективе будут дорожать быстрее, чем уголь и ядерное топливо, следует ожидать, что даже водород, произведенный энергоемким способом (например, с помощью электролиза воды), сможет успешно конкурировать по удельной стоимости энергии с другими энергоносителями. Максимальный экономический эффект будет достигнут при одновременном решении технологических и энергоэкологических задач.

Говоря об экологически более благоприятном воздействии водорода на биосферу по сравнению с традиционными энергоносителями, нельзя забывать о том, что сами технологии производства водорода также не должны оказывать вредного воздействия на ОПС. Если получение данного экологически чистого энергоносителя будет происходить с загрязнением окружающей среды, это, безусловно, снизит эффект от внедрения водородных технологий. Поэтому в качестве перспективных первичных источников энергии для производства водорода в первую очередь следует рассматривать возобновляемые виды энергии, запасами которых богаты многие регионы Украины (рис. 2) [3].

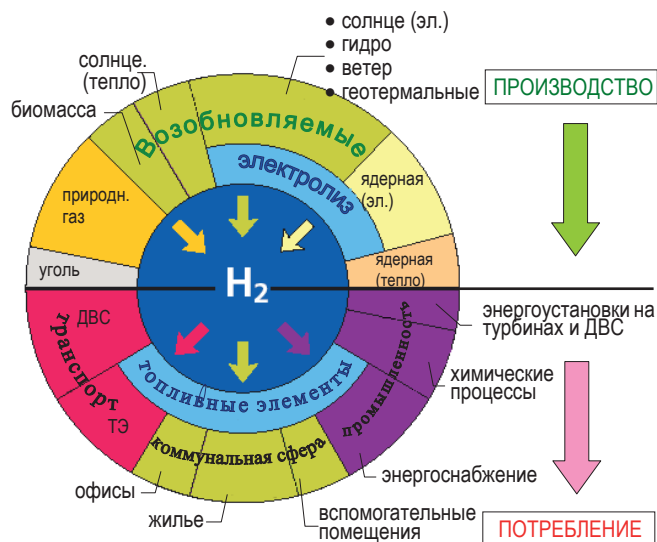


Рисунок 2 – Схематическое представление концепции водородных энергосистем

Анализ современных технологических возможностей показывает, что в настоящее время имеются объективные предпосылки для включения в планы развития ТЭК Украины конкретных водородных технологий и энергетических систем. Актуальность расширения масштабов производства и использования водорода в Украине обусловлена тем, что страна располагает ресурсной и технологической базой (большими запасами бурого и каменного угля, развитой углехимической отраслью, значительным потенциалом возобновляемых источников энергии, в т.ч. биоэнергетических), необходимой для получения товарного водорода – прежде всего для химической промышленности – и синтетических топлив на его основе.

Исходя из предложенной концепции использования водорода в Украине следует на основе системного анализа рассмотреть перспективы крупномасштабного применения водородных технологий с учетом условий функционирования территориально-промышленных мегаполисов, ориентируясь на энергетическую и технологическую базу конкретных регионов.

Опираясь на результаты фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований в области водородной энергетики, ИПМаш НАНУ в настоящее время успешно развивает те направления, которые могут не только дать принципиально новые научные результаты, но и обеспечить перевод технико-экономических и экологических показателей промышленных объектов на качественно новый уровень, что повысит конкурентные преимущества предприятий.

Так, в частности, специалистами ИПМаш НАНУ разработаны методы получения водорода, базирующиеся

на комплексном использовании электрической энергии и химического потенциала исходных продуктов, применяемых для его производства. В данных технологиях электроэнергия необходима лишь для инициирования химических реакций конверсии водородсодержащих композиций, а основной энерговклад в их осуществление вносится одним из реагентов. При этом сырьем могут служить некондиционные угли, продукты углеобогащения, органические отходы растительного и животного происхождения, коммунально-бытовые стоки и другие углеводородсодержащие вещества. В результате утилизации таких отходов производится экологически чистый энергоноситель, способный заменить природный газ в сфере промышленного и коммунального потребления, и снижается антропогенная нагрузка на ОПС [4].

В ИПМаш НАНУ также созданы металлгидридные технологии переработки водорода, включающие его выделение из газовых смесей, очистку, компактное хранение, разделение изотопов и их перевод в энергетически неравновесное состояние, которое обеспечивает снижение энергии активации химических реакций с участием водорода. Для этих целей разработана технология изготовления сплавов – сорбентов водорода на основе редкоземельных металлов и циркония, предусматривающая использование отечественных сырьевых ресурсов.

Важное место в работах ИПМаш НАНУ занимают проблемы создания и внедрения в промышленность металлгидридных установок, обеспечивающих эффективное использование водорода в порошковой металлургии, технологиях получения новых материалов и промышленных газов, электрофизических установках большой мощности, криогенной и водородожижительной технике, энергетике, стекольной, пищевой и других отраслях промышленности [5].

Для аэрокосмического применения разработаны системы бортового аккумулирования и подачи водорода на основе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза гидридообразующих материалов, обеспечивающих необходимую динамику и высокие энергетические характеристики генерируемого водорода [6].

Созданы оригинальные системы использования водорода в качестве горючего в двигателях внутреннего сгорания (ДВС), что обеспечивает снижение токсичности отработанных газов транспортных средств и экономию углеводородного топлива (рис. 3). Эти технологии нашли практическое воплощение при создании опытной партии автомобилей, работающих на водороде (более 30 лет назад такие машины эксплуатировались в г. Харькове как таксомоторы) [7, 8].

В последнее время во многих странах широким фронтом ведутся работы по применению водорода в двигателях

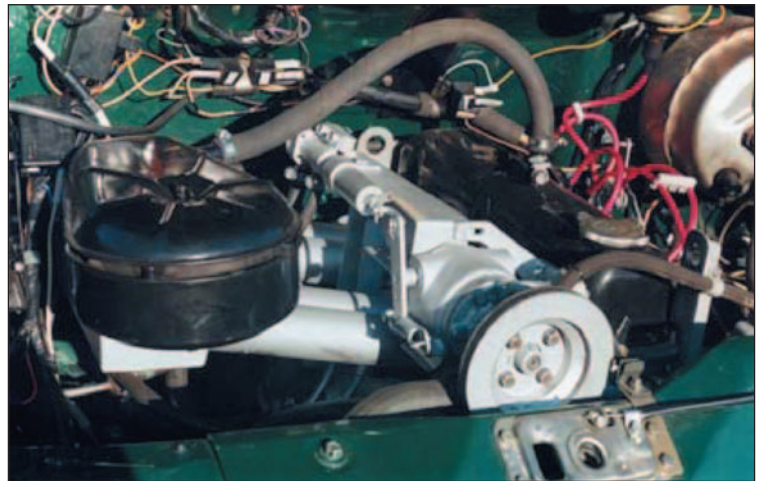


Рисунок 3 – Общий вид экспериментального образца водородного автомобиля и двигательного отсека на базе модели ГАЗ-2705

легковых автомобилей и городских автобусов. По данным немецкой компании L-B-Systemtechnik GmbH, сегодня насчитывается более 200 типов автомобилей и автобусов, работающих на водороде, при этом треть из них оснащена ДВС, а две трети снабжены энергоустановками с использованием топливных элементов. Поэтому в ближайшие годы актуальной будет задача создания инфраструктуры для обеспечения автотранспорта экологически чистым топливом, важнейшим элементом которой станут системы генерации водорода.

Современный уровень развития водородных технологий, которые реализуются в разработанных электрохимических установках, позволяет вырабатывать и накапливать водород в системах с высоким давлением на водородных заправочных станциях и использовать его в качестве топлива в автомобильных двигателях и энергоустановках судов каботажного плавания.

Топливозаправочные станции, построенные по предлагаемой схеме (рис. 4), могут составить конкуренцию энергетическим станциям для выработки водорода

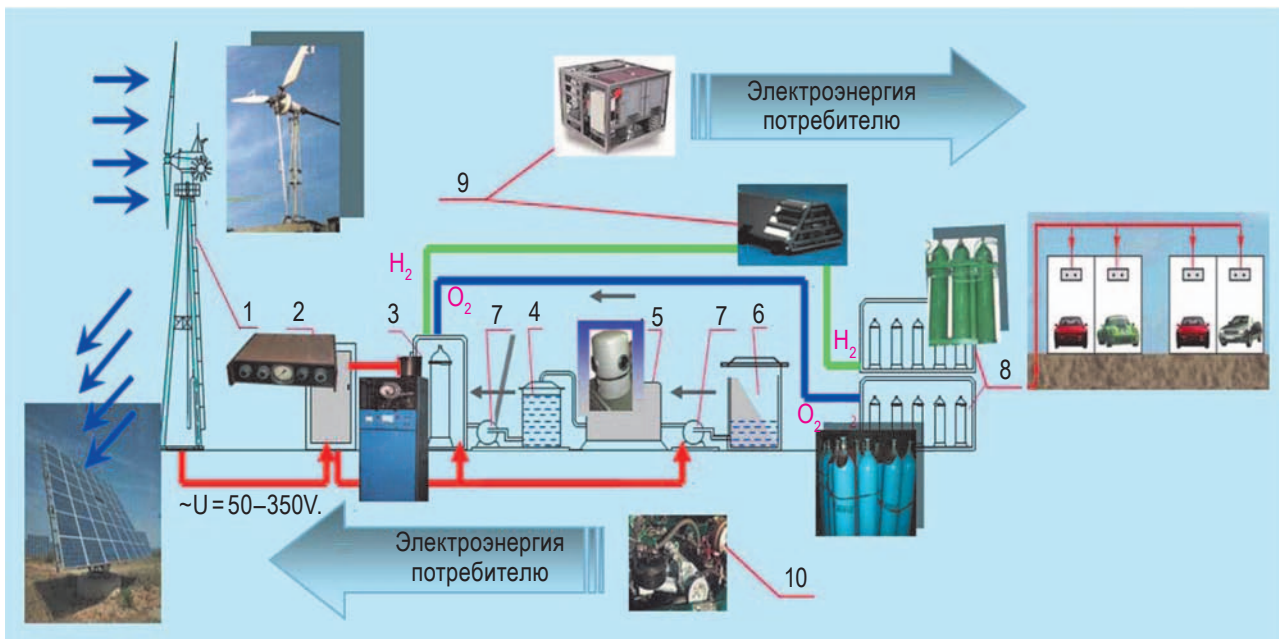


Рисунок 4 – Принципиальная схема автономного ветроводородного энерготехнологического комплекса для заправки автотранспорта:

- 1 – ветроэлектрическая турбогенераторная установка; 2 – система электропреобразования и управления; 3 – электролизер высокого давления; 4 – бак опресненной воды; 5 – опреснительный блок; 6 – бак исходной воды; 7 – насос; 8 – накопительные емкости для водорода и кислорода; 9 – металлгидридная система для длительного хранения и сжатия водорода; 10 – водородный двигатель



из бытового газа (Home Energy Station производства фирмы Honda), так как исключают образование CO_2 .

Иницирующие свойства водорода делают его чрезвычайно эффективным для применения в автомобильных ДВС в качестве дополнительного топлива, что обеспечивает существенное улучшение их экономических и экологических показателей (в первую очередь за счет снижения выбросов в ОПС канцерогенно-мутагенных соединений отработанных газов).

Установлено, что в условиях городской эксплуатации легковых автомобилей с ДВС при работе на обедненных бензоводородовоздушных смесях (добавка водорода составляет около 10 % по массе) обеспечивается уменьшение расхода нефтяного топлива на 40 % с одновременным повышением эксплуатационной топливной экономичности автомобиля. Содержание CO_2 в выбросах снижается при этом в 1,5 раза, NO_x – в восемь раз, а канцерогенных углеводородов – более чем на порядок. В случае работы автомобильных двигателей только на водороде токсичные компоненты в отработавших газах практически отсутствуют [9].

С учетом тенденции к изменению цен на энергоносители можно констатировать, что применение водорода в качестве моторного топлива уже сегодня конкурентоспособно на рынке автомобильных топлив, причем по мере ужесточения экологических параметров, регламентирующих эксплуатацию транспортных средств, его преимущества будут возрастать.

Выполненные проекты по применению водородно-энергетических установок на водном транспорте, в системах, использующих возобновляемые виды энергии, глубоководных комплексах показывают эффективность предлагаемых подходов. В частности, создан и испытан в натуральных условиях не имеющий аналогов глубоководный аппарат для подъема грузов из морских глубин, в котором для создания подъемной силы используется водород, генерируемый с помощью специальных химических реагентов.

Особого внимания заслуживают разработанные технологии для термобарохимического воздействия водорода на нефтяные пласты с целью повышения дебита скважин. Метод прошел апробацию в реальных условиях различных климатических зон от Сибири до юга Украины. В результате его внедрения эффективность работы скважин повысилась в 3–4 раза [10].

Проектами, направленными на улучшение ситуации в ТЭК Украины, предусмотрено производство водорода путем газификации угля и электролиза воды с использованием электроэнергии, производимой на атомных и тепловых электростанциях.

Водород способен заменить природный газ и в промышленности, и в энергетике. В частности, его можно

применять в качестве «подсветки» в энергоблоках ТЭС, потребляющих низкосортное угольное топливо. В работах ИПМаш НАНУ показано, что высокотемпературные продукты водородной газификации способствуют более эффективному сжиганию низкорекционных углей, чем традиционные «подсветочные» энергоносители. Поэтому перспективным является использование водорода для повышения реакционной способности топливной композиции, в результате чего существенно сокращается фаза неустойчивого развития цепных реакций, а также интенсифицируется процесс воспламенения рабочей смеси, что приводит к повышению на 10–15 % полноты сгорания основного топлива.

Анализируя изменение цен на энергоносители, можно констатировать, что стоимость единицы энергии в водороде, получаемом путем электролиза в установках, разработанных ИПМаш НАНУ, сопоставима со стоимостью единицы энергии природного газа (при условии, что производство водорода осуществляется за счет электроэнергии, отбираемой для обеспечения собственных нужд ТЭС).

Оригинальными звеньями в разрабатываемой технологии являются элементы электролизной техники, позволяющие снизить энергоемкость производства водорода, а также специальные горелочные устройства с предварительной зоной газификации угля, работающие по схеме паругольной конверсии (рис. 5) [11, 12].

Перспективным является также создание мощных электролизных производств, потребляющих 25–30 % производимой электроэнергии и работающих в буферном режиме при наличии избытка электроэнергии в «провальные» периоды графика энергопотребления. Ввод в эксплуатацию электролизных производств обеспечит работу энергооборудования ТЭС в наиболее экономичном и безопасном базовом режиме. Для осуществления такого проекта потребуется более 1000 электролизеров повышенной производительности (до 3000–5000 $\text{м}^3/\text{час}$), производство которых целесообразно организовать на украинских предприятиях. Избыток водорода в рассматриваемом случае может быть направлен в существующую газотранспортную сеть. При содержании водорода в смеси с природным газом на уровне 3–5 % не требуется изменения технологии использования этой смеси в коммунально-бытовом и промышленном секторах экономики.

Последующий этап реконструкции и замены имеющегося теплоэнергетического оборудования должен включать постепенное внедрение новых высокоэффективных энерготехнологий, основанных на использовании водорода и топливных элементов.

Весомый вклад в диверсификацию энергопотоков может внести развитие децентрализованных энерго-

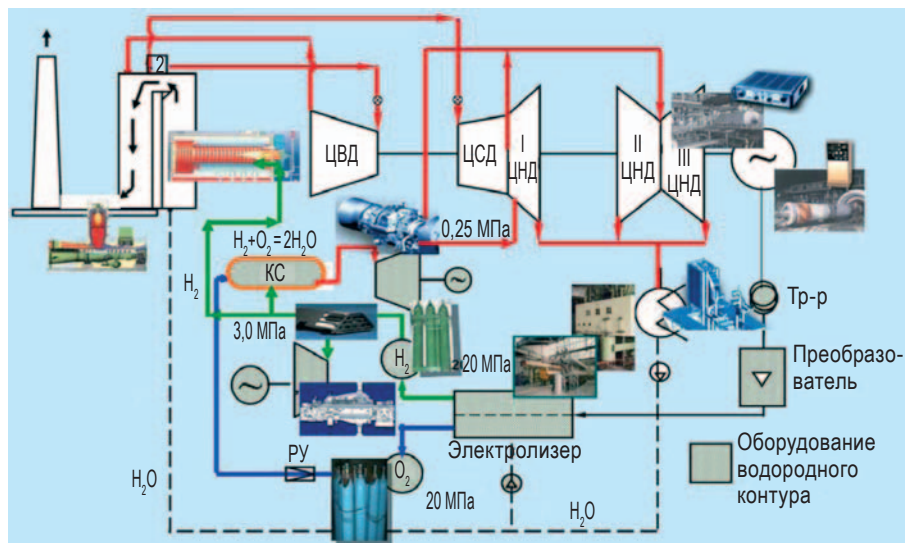


Рисунок 5 – Принципиальная схема высокоманевренного энергоблока ТЭС с водородным энерготехнологическим контуром

систем на основе возобновляемых источников энергии и водорода. Если увеличить их долю в энергобалансе страны до 2 %, то наряду с гидроэнергетикой (5,3 %) они будут эффективным средством восполнения дефицита пиковых высокоманевренных электрических мощностей.

Как свидетельствует зарубежный опыт в этой сфере, программу работ в области водородной энергетики целесообразно формировать из отдельных целевых подпрограмм, представляющих собой технически замкнутый цикл отраслевого или территориально-производственного характера и имеющих самостоятельное экономическое значение. Такие подпрограммы связаны между собой не столько научно-техническими решениями, сколько методологическими подходами к их реализации.

Пришло время расширить области применения водородных технологий и сформировать национальную программу развития водородной энергетики. Среди целевых подпрограмм, имеющих важное значение для экономики Украины, выделим те, которые могут быть реализованы в кратчайшие сроки с максимальной экономической результативностью:

1. Повышение эффективности эксплуатации мощных энергоблоков ТЭС за счет использования водородных энергоаккумулирующих систем. Такой подход к формированию программ является отраслевым. Его реализация позволит обеспечить работу энергоблоков в базовом режиме, повысить надежность и экономичность эксплуатации оборудования с продленным ресурсом и получить дополнительный эффект – исключить потребление природного газа в качестве «подсветки» на ТЭС и ТЭЦ.

2. Примером территориально-промышленного подхода является повышение эффективности использования нетрадиционных и возобновляемых энергоресурсов в инфраструктуре ТЭК южных регионов Украины с помо-

щью водородных технологий, что обеспечивает решение энергетических и экологических проблем региона.

3. Использование инфраструктуры металлургической и коксохимической отраслей промышленности для получения водородсодержащих газов представляет собой регионально-отраслевой подход, при реализации которого доменные печи и коксохимические батареи могут быть реконструированы для производства из угля синтез-газа, содержащего водород, который выделяют из газовой смеси и используют в энергетических и технологических целях, в т.ч. для получения жидкомоторных топлив.

По мере выполнения проектов будут созданы необходимые методические и организационно-технические предпосылки для коренной перестройки устаревших энергоемких производств (в первую очередь химических и металлургических), обеспечивавших до недавнего времени более половины валютных поступлений в экономику Украины.

Реализация программы развития водородной энергетики призвана стать стимулом для освоения новых подходов к управлению социально-экономическим развитием страны. В системе высшего образования должна произойти корректировка учебных программ для подготовки кадров, обладающих профессиональными знаниями в области нетрадиционной энергетики и водородных технологий и хорошо разбирающихся в вопросах коммерциализации технологий и стратегического планирования научно-технологического развития.

При подготовке специалистов по водородной энергетике важно сочетать фундаментальный подход с прикладной ориентацией обучения. Необходимо привлекать студентов к целевой научно-исследовательской работе, закладывать водородную тематику в процессы выполнения курсовых и дипломных работ. Кроме того, следует



шире внедрять спецкурсы по проблемам водородной энергетики в различные формы дополнительного профессионального образования и повышения квалификации государственных служащих, а также специалистов иных сфер и отраслей народного хозяйства [13].

ВЫВОДЫ

Реализация предлагаемого комплекса образовательных и научно-технических мероприятий, входящих в состав целевых государственных программ, и законодательная поддержка безотлагательного внедрения инновационных водородных технологий позволят диверсифицировать потоки энергоносителей в инфраструктуре топливно-энергетического комплекса Украины, обеспечить повышение устойчивости его функционирования путем переориентации энергетической системы на собственные энергоресурсы и, как следствие, снижения ее зависимости от импорта углеводородных топлив, а также улучшить состояние окружающей природной среды в экологически неблагоприятных территориально-промышленных регионах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Мацевитый Ю. М.** Обеспечение устойчивого функционирования энергетического комплекса Украины на основе инновационных технологий / Ю. М. Мацевитый, В. В. Соловей, Н. Г. Шульженко, А. В. Русанов, В. Н. Голощапов // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – № 3(13). – С. 9–13.
2. **Tarelin A.** Ukrainian R&D Capacities in Energy / A. Tarelin // Joint Support Office for Enhancing Ukraine's Integration into the European Research Area. – 2011. – P. 4–18.
3. **Solovey V.** Autonomous energy technological complex with hydrogen as the secondary energy carrier / V. Solovey, M. Muminov, A. Basteev // International Scientific Journal «Alternative Energy and Ecology». – 2004. – N 1(9). – P. 60–64.
4. **Васильев А. И.** Водород-кислородная технология стабилизации горения осадков сточных вод / А. И. Васильев, В. В. Соловей, В. Н. Лисьев, М. А. Клименко // Вісник Інженерної академії України. – 2011. – № 2. – С. 132–136.
5. **Товажнянский Л. Л.** Интегрированные энергосберегающие теплотехнологии в стекольном производстве / Л. Л. Товажнянский, В. В. Соловей, В. М. Кошельник // Х. : НТУ «ХПИ», 2008. – 628 с.
6. Системы хранения и подачи водорода на основе твердых веществ для бортовых энергетических установок / Ю. А. Абрамов, В. И. Кривцова, В. В. Соловей. – Х., 2002. – 277 с.
7. **Соловей В. В.** Ризики техногенно-екологічного характеру при експлуатації об'єктів автотранспортної інфраструктури / В. В. Соловей, А. В. Гриценко, Н. В. Внукова // Екологія и промышленность. – № 3(28). – 2011. – С. 37–40.
8. **Соловей В. В.** Глобальное потепление климата и автотранспорт / В. В. Соловей, П. М. Канило, Н. В. Внукова // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2011. – Вып. 53. – С. 103–110.
9. **Соловей В. В.** Проблемы загрязнения атмосферы городов канцерогенно-мутагенными супертоксикантами / П. М. Канило, К. В. Костенко // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2011. – Вып. 52. – С. 47–53.
10. **Божко О. Є.** Розробка технологій та технічних заходів для забезпечення надійності постачання вуглеводнів в Україні / О. Є. Божко, Я. В. Коцкулич, О. В. Кравченко, П. І. Огородників та ін. – Х. : Новое слово, 2010. – 548 с.
11. Пат. 97164 Україна, МПК⁶¹, F23D 1/00; F23C 1/12; F23C 3/00. Пальниковий пристрій для спалювання пилувугільного палива / Соловей В. В., Мацевитий Ю. М., Канило П. М. – Опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.
12. Пат. 103681 Україна, МПК C25B 1/12, C25B 1/03. Пристрій для одержання водню високого тиску / Соловей В. В., Шевченко А. А., Котенко А. Л., Макаров О. О. – Опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21.
13. **Мацевитый Ю. М.** Участие инновационных структур в решении экономических и экологических проблем региона / Ю. М. Мацевитый, В. В. Соловей, А. А. Тарелин // Экология и промышленность. – 2013. – № 1. – С. 9–15.

Поступила в редакцию 04.11.2014

Розглянуто актуальні аспекти використання водню як ефективного екологічно чистого енергоносія. Запропоновано підходи до створення інноваційної програми розвитку водневої енергетики з урахуванням можливостей і перспектив впровадження результатів наукових досліджень щодо заміщення воднем традиційних енергоносіїв – на транспорті, в стаціонарній енергетиці, промисловості та комунально-побутовій сфері України.

Actual aspects of hydrogen usage as efficient non-polluting energy source are considered. Approaches to develop innovative program of hydrogen energy taking into account opportunities and prospects for implementation of R&D results on hydrogen substitution of traditional energy sources in transport, stationary energy, industry and municipal utilities in Ukraine are introduced.