

УДК 669.85+504.05

## СНИЖЕНИЕ ЭМИССИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕТРОВОДОРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А. В. Гриценко, проф., д. геогр. н., В. В. Соловей, проф., д. т. н.,  
Н. В. Внукова, проф., к. геогр. н.,

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

*Аннотация.* Рассмотрена проблематика использования возобновляемых видов энергии путем создания ветроводородных энерготехнологических комплексов для обеспечения транспортных и стационарных энергоустановок экологически чистым топливом – водородом. Предложена принципиальная схема электролизера для генерации газов высокого давления, а также схема автономного ветроводородного энерготехнологического комплекса для заправки автотранспорта.

*Ключевые слова:* возобновляемые виды энергии, генерация газов, ветроводородные технологии.

## ЗНИЖЕННЯ ЕМІСІЇ ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ПОВІТРЯНОВОДНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

А. В. Гриценко, проф., д. геогр. н., В. В. Соловей, проф., д. т. н.,  
Н. В. Внукова, проф., к. геогр. н.,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

*Анотація.* Розглянуто проблематику використання відновлюваних видів енергії шляхом створення повітряноводневих енерготехнологічних комплексів для забезпечення транспортних і стаціонарних енергоустановок екологічно чистим паливом – воднем. Запропоновано принципову схему електролизера для генерації газів високого тиску, а також схему автономного повітряноводневого енерготехнологічного комплексу для заправки автотранспорту.

*Ключові слова:* відновлювані види енергії, генерація газів, повітряноводневі технології.

## REDUCTION OF CARBON DIOXIDE EMISSIONS BASED ON WIND UTILIZATION OF HYDROGEN TECHNOLOGIES

A. Gritsenko, Prof., D. Sc. (Geogr.), V. Solovei, Prof., D. Sc. (Eng.),  
N. Vnukova, Prof., Ph. D. (Geogr.),

Kharkov National Automobile and Highway University

*Abstract.* The article discusses the problems of the use of renewable energy by creating wind hydrogen energy technology systems to provide transportation and stationary power plants by environmentally friendly fuel – hydrogen. A basic scheme of the electrolyzer to generate high-pressure gases, as well as the stand-alone wind and hydrogen diagram of the energytechnological complex for refueling vehicles are offered.

*Key words:* renewable energy, generation gas, wind hydrogen technology.

### Введение

Важное значение в проблеме «глобального потепления» климата имеют процессы, приводящие к нарушению замкнутости углеродного цикла и связанные с экстремально вы-

соким уровнем использования биосферных ресурсов и глобальным загрязнением окружающей среды различного рода биоцидами, опасными для всего живого токсичными и канцерогенно-мутагенными химическими соединениями, тяжелыми металлами и ра-

диоактивными элементами, образующимися в результате антропогенной деятельности, в том числе в значительных количествах при сжигании органических топлив. Вносимые загрязнители способствуют деградации и уничтожению фитораствительности, что приводит к ослаблению естественных стоков  $\text{CO}_2$ , в том числе к снижению его поглощения фотосинтезирующими системами и уменьшению его растворимости в водах мирового океана [1].

Таким образом, необходимое глобальное изменение климатических условий в значительной степени является проблемой антропогенно-экологической, что требует существенного усиления вектора экологизации хозяйственной деятельности общества, особенно в энергетической сфере. Это приводит к необходимости поиска новых подходов к использованию экологически чистых технологий на базе возобновляемых источников энергии [2].

Экологизация хозяйственной деятельности на основе внедрения новых высокоэффективных технологий использования природных ресурсов, в том числе высокоэкономичных и экологически чистых технологий генерации энергии с применением водорода и возобновляемых источников энергии, позволит существенно снизить удельное потребление органических энергоносителей и, как следствие, уменьшить выбросы в атмосферу экологически опасных ингредиентов, что будет способствовать решению как топливо-экологической проблемы, так и снижению темпов накопления  $\text{CO}_2$  в атмосфере.

#### Анализ публикаций

Основные положения указанной проблематики рассматривались в работах таких ведущих ученых: Козина Л. Ф., Васильева А. И., Семиноженко В. П., Волкова С. В. Но вопросам снижения эмиссии углеводорода и использованию ветроводородных технологий уделено недостаточно внимания, что и определило выбор исследования [1, 8].

#### Цель и постановка задачи

Расширение масштабов использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (ВИЭ) приводит к необходимости повышения энергоэффективности процессов преобразования энергии и технико-экономи-

ческих характеристик (показателей) систем энергоснабжения, базирующихся на их основе. Одним из основных направлений решения этой проблемы является совершенствование процессов преобразования энергии на всех этапах, начиная со стадии ее генерации и завершая оптимизацией. Это обуславливает необходимость системного исследования динамики процессов энергетического преобразования в основных элементах системы трансформации энергии с учетом современных технологических возможностей. Поэтому большое значение приобретают работы, направленные на повышение эффективности использования энергии ветра и солнца в инфраструктуре топливно-энергетического комплекса на основе использования инновационных водородных технологий.

Весомый вклад в диверсификацию энергопотоков может обеспечить развитие децентрализованных энергосистем на основе возобновляемых источников энергии и водорода. Их вклад в энергобаланс страны может быть увеличен в ближайшее время до 12 % и наряду с гидроэнергетикой (5,3 %) восполнить дефицит пиковых и высокоманевренных электрических мощностей с одновременным снижением эмиссии диоксида углерода в процессе их эксплуатации.

#### Пути решения проблемы

В настоящее время использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) направлено, в основном, на генерацию электроэнергии и в меньшей степени тепла. Как показывает анализ соотношения потребляемых в мире конечных видов энергии, на электроэнергию приходится более 20 %, в то же время более 70 % используется в тепловой и механической формах энергии. Очевидно, что мощность и продолжительность рабочего цикла ветровых и солнечных электрогенераторов в значительной степени зависят от погодных условий, времени года и суток. Поэтому очень важным для повышения эффективности использования ВИЭ является разработка методов аккумулирования электроэнергии, а также ее диверсификации в другие виды энергии.

Такая возможность открывается при использовании части электроэнергии для получения электролитического водорода, который может быть аккумулятором энергии в нерабочие для ВИЭ периоды. С целью снижения

остроты энергоэкологического кризиса предлагается расширить использование возобновляемых видов энергии путем создания ветродородных энерготехнологических комплексов для обеспечения транспортных и стационарных энергоустановок экологически чистым топливом – водородом.

Технологии получения водорода, базирующиеся на процессах разложения воды путем электролиза, широко применяются в различных областях современной техники. По сравнению с другими методами получения водорода, электролиз отличается простотой технологической схемой, доступностью исходного сырья и относительной простотой обслуживания энергетических установок. Основным недостатком электрохимического метода получения водорода является большая энергоемкость процесса разложения воды. Поэтому весьма актуальной является проблема разработки электрохимических технологий генерации водорода из воды с минимальными затратами электроэнергии и расходуемых ма-

териалов, особенно в свете расширения сфер использования водорода в качестве экологически чистого энергоносителя.

В существующих моделях электролизеров снижение энергозатрат достигается путем использования металлов платиновой группы в качестве электродных материалов, сложных и дорогих в технологическом исполнении мембран, что приводит к удорожанию оборудования, повышению требований к обслуживанию, снижению надежности и уменьшению их эксплуатационного ресурса [3].

С целью снижения энергоемкости процессов получения водорода путем электролиза воды в Институте проблем машиностроения имени А. Н. Подгорного НАН Украины и ХНАДУ разработана оригинальная технология электрохимического получения водорода и кислорода высокого давления. Принципиальная схема установки для ее практической реализации приведена на рис. 1.

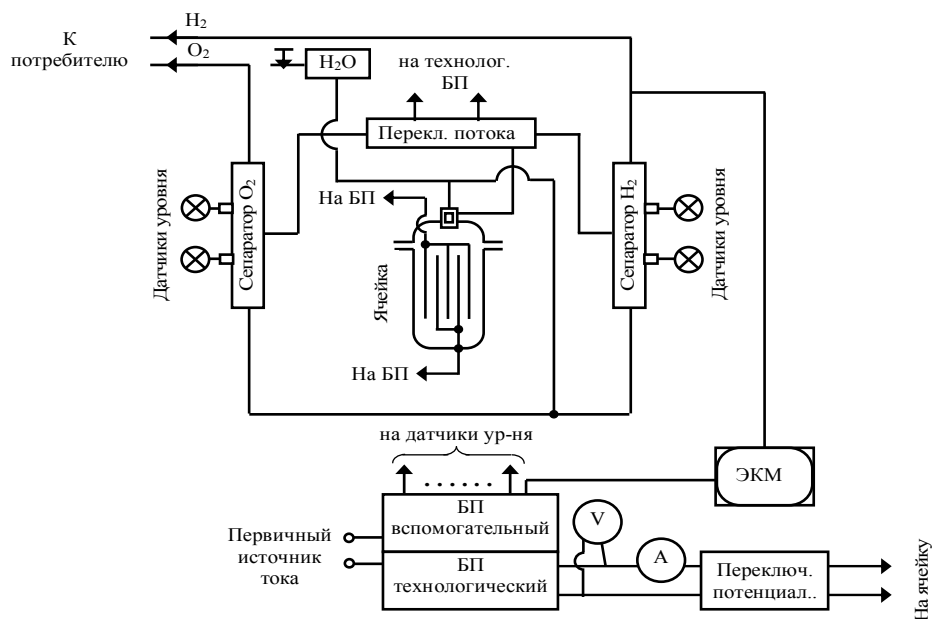


Рис. 1. Принципиальная схема электролизера для генерации газов высокого давления

Иновационной составляющей разработанного электрохимического метода разложения воды является использование в качестве одного из электродов (далее именуемый активным) материала, химически взаимодействующего с кислородом, в результате чего реализуется циклический механизм генерации газов, состоящий из чередующихся во времени процессов выделения водорода и

кислорода, что исключает необходимость использования разделительных мембран [4–6].

Практическое осуществление предлагаемой технологии начинается с подачи на пассивный электрод отрицательного потенциала, в результате чего осуществляется процесс генерации водорода. Активный электрод выступит в качестве анода. Реакция разложения

воды происходит под давлением, обусловленным выделением водорода в газообразном виде на пассивном электроде, который с помощью системы газораспределения подается в магистраль высокого давления. В этой части цикла кислород химически связывается активным электродом (накапливается в виде химического соединения).

При этом способе получения водорода электрохимическая реакция разложения воды протекает с ростом напряжения. При достижении напряжением заданной величины производится переключение полярности электродов с одновременным подключением реакционного объема к кислородной магистрали с помощью электромагнитного переключателя газового потока, в результате чего пассивный электрод становится анодом, а активный электрод – катодом. На этой стадии процесса на пассивном электроде происходит выделение газообразного кислорода, а на катоде идет электрохимическое восстановление активной массы.

Управление длительностью полуволн генерации газов осуществляется по контролируемым значениям напряжения на анодно-катодной паре. При достижении напряжения заданной величины происходит переключение полярности на электродах и цикл повторяется.

Применение оригинальной электролизной технологии по сравнению с традиционными электролизерами обеспечивает следующие преимущества:

- 1) снижение энергозатрат на 10–15 % на единицу произведенного продукта (удельное энергопотребление составляет 3,8–4,1 кВт·ч/м<sup>3</sup>);
- 2) система обеспечивает генерацию газов с давлением, ограниченным лишь прочностью конструкции корпусных элементов;
- 3) отсутствие разделительных мембран, что повышает надежность и безопасность эксплуатации системы;
- 4) в электрохимическом генераторе водорода и кислорода высокого давления не используются редкоземельные металлы и металлы платиновой группы, за счет чего уменьшается стоимость основного оборудования, которая повышает его конкурентоспособность на рынке технических способов получения водорода;
- 5) в системе отсутствуют специальные средства для механического компримирования газов.

Техническая проработка конструкции электролизера модульной конструкции производительностью 220,0 м<sup>3</sup>/ч, предназначенного для работы в энерготехнологическом комплексе на базе ВЭУ-500, показала, что система обеспечивает возможность перегрузки по потребляемой электрической мощности до 10 %. При контейнерном размещении электролизера объем помещения для монтажа генератора водорода указанной производительности составит ~100 м<sup>3</sup>. Схема компоновки блока модулей, состоящего из четырех электролизных ячеек (всего их должно быть 10), приведена на рис. 2.

На рис. 3 представлено сопоставление габаритов электролизной установки и системы управления с габаритами опорной мачты ветроагрегата мощностью 500 кВт, имеющей диаметр у основания 4,9 м.

Результаты исследований показали, что автономная ветроводородная станция мощностью 500 кВт·ч при работе на расчетном режиме может произвести за сутки ~200 кг (2200 м<sup>3</sup>) водорода, что соответствует 600 л бензина в энергетическом эквиваленте и обеспечивает уменьшение выбросов в атмосферу ~1500 кг CO<sub>2</sub>. На основании изложенной информации можно заключить, что буферная система, состоящая из электролизера и водородного накопителя энергии, органично вписывается в энерготехнологическую схему ВЭС, обеспечивая решение проблемы наличия энергоносителя в период отсутствия ветровой нагрузки [7].

В настоящее время во многих странах широким фронтом проводятся работы по применению водорода в легковых автомобилях и городских автобусах как основного, так и дополнительного энергоносителя. По данным компании L-B-Systemtechnik GmbH, представившей на сайте [www.h2mobility.org](http://www.h2mobility.org) историю развития водородной автомобильной техники, в настоящее время насчитывается более 200 типов автомобилей и автобусов, работающих на водороде. При этом треть из них оснащена ДВС, а две трети – энергоустановками с использованием топливных элементов. Поэтому в ближайшие годы актуальной будет задача создания инфраструктуры для обеспечения автотранспорта экологически чистым топливом. Важнейшим элементом такой инфраструктуры являются системы генерации водорода [8].

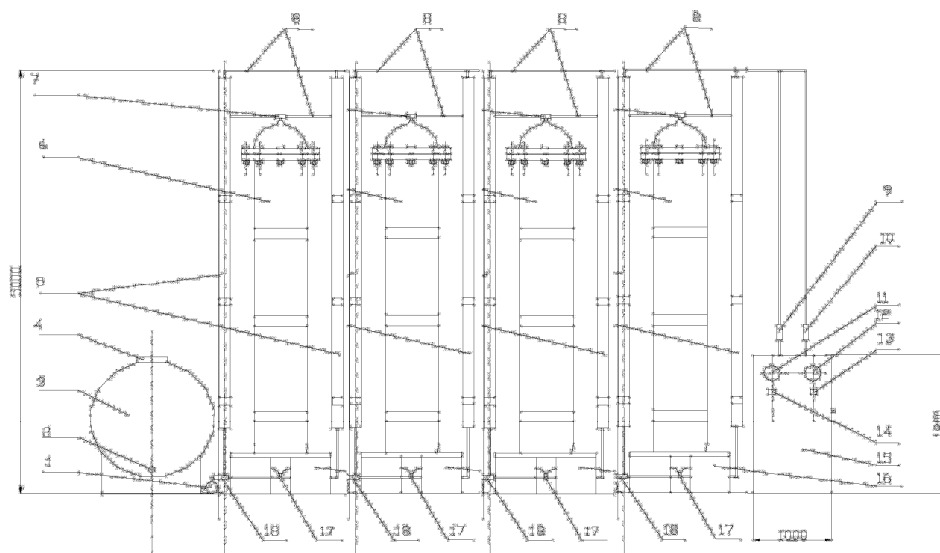


Рис. 2. Модульная конструкция электролизера высокого давления: 1 – плунжерный насос подачи дистиллированной воды; 2 – сливной вентиль для дистиллята; 3 – емкость для дистиллята; 4 – заливная горловина; 5 – сепараторы; 6 – электролизная ячейка; 7 – переключатель газового потока; 8 – газовые магистрали; 9 – обратный клапан  $H_2$ ; 10 – обратный клапан  $O_2$ ; 11 – манометр  $H_2$ ; 12 – манометр  $O_2$ ; 13 – вольтметр; 14 – амперметр; 15 – блок питания и управления; 16 – фундамент; 17 – сливной вентиль электролита; 18 – обратный клапан для дистиллята



Рис. 3. Размещение электролизной установки при компоновке ветроводородного накопителя энергии

При этом следует учесть, что получение экологически чистого энергоносителя не должно сопровождаться образованием экологически опасных ингредиентов. В связи с этим электролизные установки для получения водорода в комплексе с ветроэнергетическими агрегатами являются весьма перспективными.

Современный уровень водородных технологий, которые реализуются в разработанных электрохимических установках, позволяет вырабатывать и накапливать водород в системах с высоким давлением, непосредственно в условиях водородных заправочных станций (рис.4), и использовать его в качестве топлива в автомобильных двигателях и энергоустановках судов каботажного плавания, что снижает токсичность отработавших газов транспортных средств и обеспечивает экономию углеводородных энергетических ресурсов [9].

Топливозаправочные станции, построенные по рассматриваемой схеме, могут составить конкуренцию Home Energy Station, которые предлагаются фирмой Honda для выработки водорода из бытового газа, т. к. в последнем случае технология исключает образование  $CO_2$ .

В работе [10] показано, что 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 канцерогенно-мутагенных соединений в ОГ.

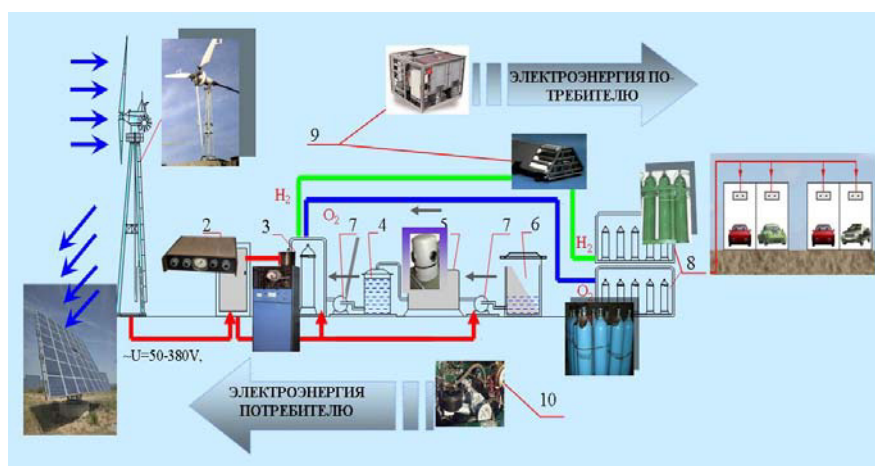


Рис. 4. Принципиальная схема автономного ветроводородного энерготехнологического комплекса для заправки автотранспорта: 1 – ветроэлектрическая турбогенераторная установка; 2 – система электропреобразования и управления; 3 – электролизер высокого давления; 4 – бак опресненной воды; 5 – опреснительный блок; 6 – бак исходной воды; 7 – насос; 8 – накопительные емкости для водорода и кислорода; 9 – металлгибридная система для длительного хранения и сжатия водорода; 10 – водородный двигатель

В условиях городской эксплуатации легковых автомобилей с ДВС при работе на обедненных бензоводородовоздушных смесях (добавка водорода до  $g_{H_2} \approx 10\%$  по массе)

обеспечивается уменьшение расхода нефтяного топлива на 40% с одновременным повышением эксплуатационной топливной экономичности автомобиля. При этом достигается снижение выбросов с  $CO_2$  в 1,5 раза, с  $NO_x$  – в 8 раз, а канцерогенных углеводородов (БП) – более чем 1,5 раза.

Несмотря на то, что среднегодовое увеличение выбросов  $CO_2$  автотранспортом не превышает 0,5% от его годового накопления в тропосфере, он является определяющим загрязнителем атмосферы городов предельно опасными токсичными и канцерогенно-мутатогенными ингредиентами, что существенным образом влияет на продуктивность фотосинтезирующих систем, приводя к существенному снижению уровня поглощения  $CO_2$ .

Оценка эффективности применения ВИЭ в удаленной от центрального энергоснабжения местности показало, что при использовании в качестве автономного источника электроэнергии ветрогенератора относительно малой мощности 15 кВт удовлетворяется практически полная потребность индивидуального хозяйства во всех видах энергоносителей. Для возможности дополнительного аккумуляирования и диверсификации электроэнергии с наработкой моторного топлива исполь-

зуется установка получения водорода путем электролиза воды. В состав энергоустановки входят: электрогенератор, выпрямитель, аккумулятор, инвертор и электронагреватели.

Ветроэнергоустановка с водородным накопителем энергии обеспечивает электрической энергией работу электробытовых приборов, электроинструмента, нагрев воды для бытовых целей и обогрев помещения. Остальная часть электроэнергии может быть направлена на получение электролитического водорода и его накопление. При использовании 25% вырабатываемой электроэнергии в течение 20 часов в сутки можно получить примерно 1,5 кг водорода, что по энергоёмкости равноценно 6 л бензина или дизельного топлива.

При средней продолжительности работы ветрогенератора в течение года 3000 часов, экономия дизельного топлива составит около 14 т, что обеспечит снижение выбросов  $CO_2$  в количестве 35 т.

В результате обработки и обобщения информации, полученной в процессе исследований, сформированы научно-технические принципы создания электрохимических водородных аккумуляторов энергии и предложены пути оптимизации их работы на переменных режимах, характерных для реальных условий эксплуатации энерготехнологических установок в разных геоклиматических условиях.

### Выводы

Предложена новая технология преобразования энергии первичных источников путем создания ветроводородных энерготехнологических комплексов и заправочных станций для обеспечения автотранспорта и судовых энергоустановок экологически чистым топливом – водородом. Применение в составе ВЭУ оригинальной электролизной технологии по сравнению с традиционными электролизерами обеспечивает снижение энергозатрат на 10–15 % на единицу произведенного продукта. При этом обеспечивается генерация водорода и кислорода высокого давления, что создает необходимые условия для использования данного электролизного оборудования в бескомпрессорных буферных системах аккумулирования энергии.

Использование ветроэнергетических комплексов для обеспечения автотранспорта и судовых энергоустановок водородом позволит существенно снизить потребление автомобильных углеводородных топлив и значительно улучшит состояние окружающей среды, что особенно важно для городских территорий, курортных и рекреационных зон, а также труднодоступных районов, в которых отсутствует централизованное энергоснабжение и затруднена доставка топлива. Вместе с тем дальнейшего развития требует решение проблемы корректного определения экологического ущерба при замене водородом традиционных углеводородных топлив с учетом снижения эмиссии CO<sub>2</sub> факторов негативного влияния отработавших газов, особенно их канцерогенных составляющих на окружающую среду, что, безусловно, повысит инвестиционный рейтинг разработок в области использования возобновляемых источников энергии с применением водородных технологий.

### Литература

1. Козин Л. Ф. Современная энергетика и экология: проблемы и перспективы / Л. Ф. Козин, С. В. Волков. – К.: Наукова думка, 2006. – 776 с.
2. Мировое (глобальное) потепление на планете Земля [Электронный ресурс] / – Режим доступа: <http://www.world-warming.info/printout253.html>. – 10.02.2010.
3. Якименко Л. М. Электродные материалы в прикладной электрохимии / Л. М. Якименко. – М.: Химия, 1977. – 264 с.

4. Соловей В. В. Влияние режимных факторов на эффективность электролизера высокого давления / В. В. Соловей, А. С. Жиров, А. А. Шевченко // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: сб. науч. трудов. – 2003. – С. 250–254.
5. Пат. № 98705 Україна, МПК С 25 В 1/02 С 25 В 9/4 Спосіб роботи електролізної установи для одержання водню і кисню високого тиску / Соловей В. В., Шевченко А. А., Зеров О. С., Маковров О. О. (Україна); заявник Інститут проблем машинобудування імені А. М. Підгорного Національної академії наук України. – № а2010 13742; заявл 19.11.2010; обубл. 11.06.2012, Бюл. 11
6. Пат. № 103681 Україна, МПК<sup>6</sup> С 25В 1/12. Пристрій для одержання водню високого тиску / Соловей В. В., Шевченко А. А., Котенко А. Л., Макаров О. О. (Україна); Інститут проблем машинобудування імені А. М. Підгорного Національної академії наук України – № 2011 15332; заявл. 26.12.2011; опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21.
7. Solovey V. V. Autonomous wind-hydrogen stations / V. V. Solovey, V. A. Glazkov, V. K. Pishuk // Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials, T. N. Veziroglu et. al. (eds), Hydrogen materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials – 2007, Springer – P. 861–865.
8. Васильев А. Й. Використання геліюта вітроенергетичних комплексів для зниження техногенного навантаження в рекреаційних зонах / А. Й. Васильев, В. В. Соловей, І. Емрі // Вісник Інженерної академії України. – 2014. – Вип. 1. – С. 209–214.
9. Канило П. М. Глобальное потепление климата и автотранспорт / П. М. Канило, В. В. Соловей, Н. В. Внукова // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета: сб. науч. тр. – 2011. – Вып. 53. – С. 103–110.
10. Гриценко А. В. Роль інноваційних технологій індустріального симбіозу в вирішенні проблеми техногенної безпеки територіально-промислових комплексів / А. В. Гриценко, В. В. Соловей // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета: сб. науч. тр. – 2010 – Вып. 4. – С. 25–29.

Рецензент: Ф. И. Абрамчук, профессор, д. т. н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 12 февраля 2014 г.

