
ЕКОЛОГІЯ І ВИРОБНИЦТВО

УДК 621.43.662.61

ОЦІНКА ВПЛИВУ ЕНЕРГО-ЕКОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА КОНКУРЕНТОЗДАТНІСТЬ ВОДНЮ ЯК МОТОРНОГО ПАЛИВА

Внукова Н.В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
вул. Петровського, 25, 61002, м. Харків
vnukovanv@ukr.net

Розглянуто техніко-технологічні рішення, які забезпечують отримання водню на базі використання відновлювальних джерел енергії з метою його застосування в якості моторного палива. Проведено аналіз впливу енерго-екологічних факторів на конкурентоздатність водню як моторного палива на основі оцінки основних складових життєвого циклу автомобіля. Встановлена доцільність використання вітроенергетичного потенціалу на автономних автозаправних станціях. *Ключові слова:* водень, моторне паливо, відновлювальні джерела енергії, життєвий цикл автомобіля.

Оценка влияния энерго-экологических факторов на конкурентоспособность водорода в качестве моторного топлива. Внукова Н.В. Рассмотрено технико-технологические решения, которые обеспечивают получение водорода на основе использования возобновляемых источников энергии с целью его применения в качестве моторного топлива. Проведено анализ влияния энерго-экологических факторов на конкурентоспособность водорода как моторного топлива на основе оценки основных составляющих жизненного цикла автомобиля. Установлена целесообразность использования ветроэнергетического потенциала на автономных автозаправочных станциях. *Ключевые слова:* водород, моторное топливо, возобновляемые источники энергии, жизненный цикл автомобиля.

Evaluation of the influence of energy-ecological factors on the competitiveness of hydrogen as a motor fuel. Vnukova N.V. Technical and process design details that provide hydrogen production based on the use of renewable energy sources for the purpose of its use as motor fuel are considered. Analysis of the influence of energy-ecological factors on the competitiveness of hydrogen as a motor fuel on the basis of evaluation of the main components of the life cycle of a car is carried out. The expediency of using wind energy potential at autonomous filling stations is determined. *Keywords:* hydrogen, motor fuel, renewable energy sources, life cycle of car.

На сьогодні загострюється проблема охорони навколишнього природного середовища при масовій експлуатації автотранспортних засобів у міських умовах. Оскільки у світі автомобільний парк вже досяг рівня 1 млрд. од. і споживає близько поло-

вини нафтових палив, це практично змушує всі країни шукати шляхи зниження їх використання, орієнтуючись на заміщення альтернативними енергоносіями. Незважаючи на екологічні обмеження, що постійно стають жорсткішими, при збереженні сфор-

мованої на тепер структури автомобільного парку та нестримних темпів росту числа автомобілів, викиди шкідливих речовин до 2020 р. зростуть ще на 30 %. Аналіз соціально-економічної оцінки наслідків забруднення атмосфери свідчать, що найбільша частка в можливому збитку належить складовій, яка пов'язана із впливом забруднення на здоров'я людини. У мегаполісах ця складова сягає 75–80 % сумарного екологічного збитку від викидів автотранспорту.

Отже, нині актуальним стає саме розвиток таких паливних технологій в автомобільному транспорті, які б одночасно дозволили значно покращити еколого-економічні показники експлуатації автомобілів з використанням альтернативних моторних палив.

Постановка проблеми

Екологічна безпека є одним із визначальних критеріїв розвитку автотранспортних засобів (АТЗ) і вимагає глибоких досліджень, які спрямовані на поліпшення стану навколишнього середовища, зменшення його забруднення продуктами згоряння АТЗ і збереження природних біосферних комплексів для майбутніх поколінь і всього людства.

Результати забруднення атмосфери міст із інтенсивним автомобільним рухом свідчать про те, що найнебезпечнішими за ступенем впливу на організм людини є оксиди азоту (NO_x) та канцерогенні вуглеводні (КВ). Їхня частка при оцінці екологічної безпеки автомобільних двигунів сягає 95 % [1; 2]. Особливо небезпечні їхні похідні – нітроканцерогенні речовини, що мають, як наслідок, явища синергізму та мутагенні властивості.

Одними з основних носіїв канцерогенів і нітроканцерогенів, що істотно посилюють їхню агресивність, є дрібнодисперсні тверді частинки (ТЧ), які мають вуглецеву основу. Тому в Німеччині введено екологічний рейтинг автомобілів за критеріями, що відбивають ступінь шкідливого впливу на здоров'я людини окремих складових відпрацьованих газів (ВГ), відповідно до якого перше місце належить КВ. У зв'язку з цим поставлено завдання перед автотранспортною інфраструктурою великих міст скоротити до 2020 р. викиди КВ не менш, ніж на 90 % [3]. Аналіз публікацій свідчить про активний пошук шляхів щодо зниження техногенного впливу ВГ автомобілів на навколишнє природне середовище [4]. Одночасно розробляються наукові основи створення та використання альтернативних джерел енергії, в тому числі альтернативних моторних палив. Доцільним стає необхідність узагальнення результатів комплексних паливно-екологічних досліджень двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) за Європейським їздовим циклом з урахуванням рівнів викидів канцерогенних інгредієнтів при використанні як традиційних нафтових, так і альтернативних палив. Вагомий обсяг наукових праць включає питання пошуку альтернативних енергоносіїв [5], у тому числі для використання в ДВЗ [6; 7]. Щодо практичного використання альтернативних і композитних палив в ДВЗ необхідне вивчення узагальнених показників з часткової участі шкідливих речовин в забезпеченні еколого-хімічної безпеки ДВЗ при використанні різних палив.

Загострюється питання щодо питомих вартісних витрат при викорис-

танні додаткових енергоносіїв, яким присвячені роботи Канавіної М. А., Сидоренко В. Ф. [8]. Це питання визначення витрат на етапах життєвого циклу [9], управління життєвим циклом запропонованих інновацій та процесів життєвого циклу в машинобудуванні, які включають дослідження зміни питомих вартісних витрат при використанні водню як додаткового енергоносія з урахуванням ресурсів для його отримання. Отже, стаття спрямована на узагальнення теоретичних і експериментальних даних з розробки методів більш ефективного спалювання моторних палив і екологічно прийнятного їхнього використання у ДВЗ з використанням водню, як вторинного енергоносія, який одержано з урахуванням питомих вартісних витрат за допомогою первинних енергоносіїв.

Результати досліджень

Цілі та задачі орієнтовані на експериментальне та методологічне вивчення таких питань:

- розгляд та виділення найнебезпечніших речовин, які характеризують екологічну безпеку (небезпеку) автотранспортних засобів, а їх вмістом у ВГ автомобілів;

- проведення експериментальних досліджень щодо практичного підтвердження оцінки досконалості і технічного стану автомобілів, яка базується, в тому числі, на індикаторі сумарної канцерогенності автомобілів, ($M_{\text{ЕПАР}}$);

- розрахунок питомих вартісних витрат при використанні водню як додаткового енергоносія в автотранспорті з вивченням розгляданням можливості його одержання за різними паливними технологіями та

використанням у композитних паливах як альтернативи традиційним моторним паливам.

Технології виробництва водню та експериментальні випробування використання бензинових паливних композицій (БВПК)

Перспективним є шлях зниження канцерогенно-мутагенної небезпеки ДВЗ і скорочення експлуатаційних витрат традиційних нафтових палив за рахунок використання альтернативних палив, включаючи водень, який можна застосовувати як основне, так і додаткове паливо [10]. Результати досліджень свідчать, що ініціювання властивості водню робить його надзвичайно ефективним для застосування в автомобільних ДВЗ як додаткового палива, що відіграє роль активатора процесу горіння. На рис. 1 наведено дані щодо зміни ефективності спалювання бензоводневих паливних композицій та токсичних характеристик ДВЗ.

Результати аналізу експериментальних даних, одержаних при випробуванні автомобілів різних марок, показали, що по масових викидках



Рис. 1. Вплив домішок водню (g_{H_2}) на економічні (m_e) та екологічні (c_i) показники ДВЗ

одного з найбільш вивчених КВ – бенз (а) пірену (БП) можна визначати рівні викидів компонентів пріоритетної групи поліароматичних вуглеводнів поверхнево активних речовин (ПАР) і оцінювати сумарну канцерогенність ВГ без повного хімічного аналізу всього спектра ПАР, що є досить складною процедурою. Інтегральні екоканцерогенні показники автомобілів з ДВЗ значною мірою визначаються їх експлуатаційною паливною економічністю, параметричною стабільністю та якістю палив, зокрема їх енергетичними показниками та співвідношенням в їх складі вмісту вуглецю, водню та ароматичних вуглеводнів [11; 12]. Отже, результати аналізу і узагальнення даних чисельних досліджень підтвердили, що БП є надійним показником рівнів викидів пріоритетної групи канцерогенних вуглеводнів і може застосовуватись як індикатор сумарної канцерогенності ($M_{\Sigma \text{ПАР}}$) ВГ автомобілів згідно розрахунку за формулами:

$$M_{\Sigma \text{ПАР}} = 34,6 \times m_{\text{БП}} \quad (1)$$

$$M_{\Sigma \text{ПАР}(k)} = 11,6 \times m_{\text{БП}} \quad (2)$$

$$\sum (m_{\text{БП}} \times IKA) = 1,3 \times m_{\text{БП}} \quad (3)$$

де – масовий викид i -ї речовини з ВГ автомобіля, г/км; IKA – індекс канцерогенної агресивності компонентів пріоритетної групи КВ, $IKA_{\text{БП}}=1$.

Випробування легкових автомобілів та мікроавтобусів з ДВЗ на стенді з біговими барабанами за міським їздовим циклом та подальшою їх експлуатацією при використанні бензоводневих паливних композицій (БВПК) показали істотне поліпшення їх економічних і екологічних показників. Встановлено, що в умовах міської

експлуатації вказаних транспортних засобів при використанні збіднених бензоводневоповітряних сумішей (частка водню $g_{\text{H}_2} < 10$ % мас.) забезпечується зменшення витрати нафтового палива до 40 % (за рахунок заміщення бензину воднем і підвищення експлуатаційної паливної економічності автомобіля) та зниження викидів з ВГ: J_x – в 8 разів, а канцерогенних вуглеводнів (зокрема, БП) – на порядок і більше.

Зміна питомих вартісних витрат ($83(p+n_2)$) при використанні водню як додаткового енергоносія, які в умовах міської експлуатації легкових автомобілів з ДВЗ сумарні паливні витрати при використанні збіднених бензоводневоповітряних сумішей з традиційним іскровим запалюванням, не перевищують вказаних витрат в порівнянні з бензином при $\zeta = 3,0$ і $g_n < 0,15$. А при $\zeta = 2,0$ і $g_n = 0,3$ рівень сумарних витрат на паливо зменшується на 15 %. Таким чином, додавання водню до збіднених бензо-повітряних паливних сумішей в ДВЗ є економічно виправданими при існуючих цінах на паливо навіть без урахування поліпшення їх еколого-хімічних показників.

Додатковим стимулом вибору водню як енергоносія для автотранспорту є технологічний прорив, пов'язаний з освоєнням паливних елементів (ПЕ) як джерела електроенергії для електродвигуна, що використовується для переміщення автомобіля. У цьому випадку автомобілі на базі водню мають більш високу ефективність, тому що ККД паливного елемента сягає 60 % на відміну від ДВЗ у якого цей показник не перевищує 30 %. Крім того, водневий автомобіль із ПЕ є високоекологічним, тому що

викидами є тільки водяна пара – сліди мастильних матеріалів і тверді частинки, що утворюються при зношуванні гальмових колодок і покришок. Тому в ряді країн Європи почалося широке застосування водню в легкових автомобілях і міських автобусах як основного, так і додаткового енергоносія. За даними компанії GMBH на теперішній час налічується більше 200 типів автомобілів та автобусів, що працюють на водні, при цьому третина з них оснащена ДВЗ, а дві третини – енергоустановками з використанням паливних елементів.

В основі технологій, що дозволяють одержувати водень, лежать процеси виділення водню з воденьвміщуючих з'єднань на базі фізико-хімічних перетворень або розкладання молекул води. Тому вартість первинних енергоресурсів, що використовуються при одержанні водню, який є вторинним енергоносієм, має визначальне значення для оцінки доцільності його використання, при проведенні техніко-екологічного обґрунтування.

Сучасний рівень водневих технологій, які реалізуються зокрема в електрохімічних установках, створених в Інституті проблем машинобудування Національної академії наук України ім. А. М. Підгорного (ІПМаш НАНУ), дозволяє виробляти і накопичувати водень в системах з високим тиском, безпосередньо в умовах водневих заправних станцій і використовувати його в якості екологічно чистого палива в автомобільних двигунах, що знижує токсичність відпрацьованих газів транспортних засобів і забезпечує економію вуглеводневих енергетичних ресурсів [13; 14].

Інтегральна оцінка повного споживання енергії та супутніх цьому вики-

дів забруднюючих речовин при різних технологіях одержання й використання водню на автомобільному транспорті, дозволяє отримати дані, щодо оцінки викидів не тільки від використання палива безпосередньо у двигуні автомобіля, але й по всьому паливному циклу починаючи від одержання первинного енергоносія, забезпечення функціонування інфраструктури для виробництва й доставки водню до бака автомобіля, а також з урахуванням витрат, пов'язаних з виробництвом самого транспортного засобу і його наступною утилізацією [15]. Це дає можливість оцінити повне навантаження на навколишнє середовище й підійти до розрахунку соціально-економічної складової запропонованих технологій.

Як відмічалось автомобіль на водні з ПЕ є практично чистим технологічним об'єктом, якщо розглядати тільки стадію його використання. Однак, при цьому слід враховувати значні витрати енергії та відповідні викиди в навколишнє середовище на стадіях видобутку сировини й генерування електроенергії для одержання водню. Крім того, необхідно додати витрати, що пов'язані з різницею виробництва традиційного й водневого автомобілів, адже конструкція вузлів і агрегатів, а також склад матеріалів, які використовуються, помітно різняться. Аналіз результатів закордонних досліджень свідчить, що подорожчання водневого автомобіля при виході на комерційне використання оцінюється в розмірі близько 20–30 % порівняного з бензиновим аналогом [16; 17]. Тому для коректного порівняння ефективності водневих технологій варто аналізувати повні витрати енергії на реалізацію життєвого циклу виробу

з урахуванням екологічних факторів, характерних для кожного з етапів. Результати такого комплексного аналізу є основою вибору пріоритетних напрямків інноваційної діяльності й розробки стратегії розвитку автомобільного транспорту.

**Аналіз та оцінка впливу
енерго-екологічних факторів
на конкурентоздатність водню
як моторного палива**

Враховуючи, що використання відновлювальних джерел енергії є пріоритетним напрямом енергетичної політики, розглянемо техніко-економічні показники електролізних технологій виробництва водню при використанні електроенергії від вітрової електростанції та електростанції на сонячних фотоелектричних перетворювачах.

При проведенні аналізу були використані вартісні параметри основних елементів технологічних схем (у тому числі, розроблених в ППМаш НАНУ ім. А. М. Підгорного – п. 1–3):

1. електролізер високого тиску (30,0 МПа) -12000 дол./м³ H₂ [18].
2. метало гідридний термосорбційний водневий компресор – 1000 дол./м³ H₂ [19].
3. установка по скрапленню водню на базі метало-гідридного термосорбційного водневого компресору – 60000 дол./кг H₂ [20].
4. система зберігання водню в стислому вигляді (70,0 МПа) – 2000 дол./кг H₂.
5. Система зберігання рідкого водню -3000 дол./кг H₂.

Для зберігання водню розглянуто технології його накопичення під тиском у газоподібному стані та криогенний спосіб зберігання зрідженого

водню. Визначено, що зберігання водню під тиском у газоподібному стані обходиться в 5–6 разів дешевше, ніж при криогенному внаслідок того, що вартість ємностей та витрати на компримування водню істотно нижче сумарних витрат на зрідження, зберігання водню і його реконденсацію.

Для транспортування стислого водню пропонується використовувати вантажні автомобілі з ємностями високого тиску, для зрідженого водню – вантажні автомобілі з криогенними танками.

Сучасні технології виробництва ємностей, що працюють під високим тиском, зокрема з композитних матеріалів, дозволяють суттєво знизити матеріалоємність балонів. При виготовленні таких балонів використовується тонкостінна металева оболонка (лейнер) з нержавіючої сталі або алюмінію, яка значно підсилюється оболонкою з композитного матеріалу. Порівняно з суцільнометалевим питома маса балона знижується в 2–3 рази. Компанія “Quntum – Tecstar” розробила для водню металокомпозитні заправні баки для автомобільного транспорту на робочий тиск 70 МПа [21]. При такому тиску питомий обсяг зберігання газоподібного водню наближається до питомого обсягу його зберігання в рідкому стані. Для транспортування газоподібного водню розроблено конструкцію автопричепа, основу якого становлять 10 одиниць сферичних ємностей високого тиску зі сталі 12ХН2МДФ-Ш об'ємом 0,9 м³ з робочим тиском 31,3 МПа, які виготовлено ВАТ «Сумське машинобудівне наукове виробниче об'єднання ім. Фрунзе». Середній обсяг перевезення водню одним вантажним авто-

мобілем становить близько 1400 кг для газоподібного водню під тиском і близько 1600 кг для рідкого водню. Вартість доставки водню на відстань 1000 км становитиме: для газоподібного водню 3,0 дол./кг при автомобільних перевезеннях і для рідкого водню – 4,0 дол./кг.

Наступною складовою при використанні водню є витрати на заправлення автомобілів на рідкому і газоподібному водні під тиском. Капітальні витрати на створення автономної заправної станції для стислого водню становлять ~270 тис. дол. США (для зрідженого водню – 450 тис. дол. США). При терміні служби устаткування на роздавальній колонці для стислого водню 15 р. та 10 р.

для зрідженого газу вартість водневого палива у споживача зростає на 0,3 дол./кг для стислого водню і на 0,5 дол./кг – для рідкого. Отже, інфраструктурні витрати в сумі збільшують вартість водню (додатково до вартості його одержання) в боці автомобіля на 0,1–1,5 дол./кг для газоподібного водню і приблизно на 2,3–3,0 дол./кг для зрідженого, що повністю виключає його з конкурентно-здатних технологій в автотранспортній інфраструктурі. Для підвищення ефективності використання водню, виготовленого за допомогою вітрових електростанцій (ВЕС), необхідне суттєве зниження вартості ВЕС, у першу чергу, за рахунок складової вартості фотоелектричних перетворювачів.

Таблиця 1

Оцінка повних витрат енергії та викидів до атмосфери при використанні різних паливних технологій в автомобільному транспорті

Тип виробництва	Водень (електроліз ВЕС)	Бензин	Дизельне паливо
Всього енергія, МДж/1000 км	2250	3700	2700
Паливний цикл, %	28	17	14
Експлуатація автомобіля, %	41	66	66
Виробництво автомобіля та рециклінг, %	31	17	20
Викиди кг/1000 км			
CO ₂	76	23,9	21,5
VOC (volatile organic compounds)	16,6	33,2	23,3
CO	27,2	135,3	84,0
NO _x	11,0	22,8	22,2
ТЧ 2,5-10 мкм	12,5	12,2	11,7
ТЧ менш ніж 2,5 мкм	4,6	5,1	4,9

У табл. 1 наведено результати розрахунку повних витрат енергоресурсів при використанні традиційних моторних палив і водню, який одержують за різних технологій його виробництва. Такий комплексний підхід дозволяє давати обґрунтовану

економічну оцінку збитків за результатами використання різних водневих технологій на автотранспорті [21].

Дані табл. 1 свідчать що різні водневі технології потребують від 2700–3700 МДж/1000 км, в той час як для водневого авто цей показник не

перевищує 2250 МДж/1000 км. При цьому безпосередньо в процесі експлуатації автомобіля витрачається від 40 до 70 % енерговитрат, а інші розподілені приблизно однаково між витратами на одержання моторних палив та виготовлення автомобіля, включаючи матеріали. Сумарні питомі викиди CO₂ протягом життєвого циклу виробу сягають 200–250 кг/1000 км, а інших забруднювачів – від 2,0 кг для дизельного палива та 2,5 кг – для бензину. При використанні поновлюваних джерел енергії (зокрема ВЕС) для одержання водню шляхом електролізу ці показники становлять 75 %, що свідчить про доцільність залучення до сфери практичного використання у водневій інфраструктурі вітроенергетичного потенціалу.

Загалом по розглянутих технологіях виробництва водню і його використанню в автотранспорті та з урахування даних щодо оцінки викидів у навколишнє середовище одержано такі значення очікуваної вартості 1000 км пробігу автомобіля: паливний цикл (виробництво палива, його доставка, зберігання та заправлення на автозаправні станції (АЗС); витрати

на виробництво автомобіля (вартість автомобіля, страхування, обслуговування, амортизація, ремонти та ін.); витрати на здійснення процедури рециклінгу та витрати на відшкодування екологічного збитку (оцінка в грошовому еквіваленті негативного впливу забруднюючих речовин на здоров'я людей при використанні автомобіля). Із зростанням пробігу автомобіля в міських умовах внесок екологічної складової проявляється більш суттєво, що надає додаткові переваги технології використання водню як моторного палива (табл. 2).

Отже, ці показники дають підставу зробити висновок, що за оцінкою повної вартості 1000 км пробігу водневий автомобіль на газоподібному водні цілком конкурентноздатний порівняно з автомобілем з бензиновим двигуном, якщо водень одержувати шляхом електролізу води з використанням енергії ВЕС. З освоєнням цих технологій варто очікувати вдосконалювання їх техніко-економічних показників, що підвищить соціально-економічну привабливість цієї транспортної складової водневої енергетики.

Таблиця 2

**Еколого-економічні показники експлуатації автомобілів
залежно від пробігу в міських умовах**

Паливо	Екологічний збиток при долі пробігу в міському циклі, долар США/1000 км			Повні витрати при долі пробігу в міському циклі, долар США/1000 км		
	50 %	75 %	100 %	50 %	75 %	100 %
Бензин	3,5	4,1	4,6	34,7	35,3	35,9
Дизельне паливо	3,4	4,0	4,5	30,8	31,4	32,0
Водень (електроліз від ВЕС)	1,8	1,9	2,0	36,2	36,2	36,3

Висновки

Аналіз результатів обробки експериментальних даних, одержаних при випробуванні автомобілів різних марок показав, що обсяг масових викидів еколого-хімічної небезпеки (безпеки) досліджених ДВЗ переважно (на 95 % і більше) визначається рівнями викидів з ВГ >ТО і канцерогенними вуглеводнями (зокрема БП).

Після проведення експериментальних досліджень виявлено значне зниження рівнів викидів >ТОз відпрацьованими газами ДВЗ та істотне (на порядок і більше) зниження сумарної канцерогенності ВГ по канцерогенних вуглеводнях ДВЗ при використанні нафтових палив, що забезпечується введенням домішок водню. На підставі аналізу і узагальненню

результатів чисельних досліджень підтверджено, що БП є надійним показником рівнів викидів пріоритетної групи канцерогенних вуглеводнів і може застосовуватись як індикатор сумарної канцерогенності ($M_{2ПАР}$) ВГ.

Дано оцінку повних витрат енергії та викидів до атмосфери при використанні домішок водню в вуглеводневих паливах як додаткового енергоносія. Проведено аналіз повних витрат енергії та викидів до атмосфери при використанні різних паливних технологій в автомобільному транспорті. Встановлено, що використання водню як енергоносія для автотранспорту з урахуванням витрат енергії протягом життєвого циклу автомобіля та супутніх їм викидів може розглядатися як альтернатива традиційним моторним паливам.

Література

1. Канило, П. М. Проблемы загрязнения атмосферы городов канцерогенно-мутагенными супертоксиантами / П. М. Канило, В. В. Соловей, К. В. Костенко // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2011. – Вып. 52. – С. 47–53.
2. Канило, П. М. Автомобиль и окружающая среда / П. М. Канило, И. С. Бей, А. И. Ровенский. – Харьков: Прапор, 2000. – 304 с.
3. Петров, Р. Л. Германия: Экологический рейтинг автомобилей / Р. Л. Петров // Автомобильная промышленность. – 2001. – № 7. – С. 35–39.
4. Канило, П. М. Анализ эффективности использования нефтяных и альтернативных топлив в автомобильном транспорте / П. М. Канило, К. В. Костенко, Э. А. Почаи, В. А. Беседина // Автомобильный транспорт. -2010. – Вып. 27. – С. 127–133.
5. Волков, В. С. Уровень развития и перспективы использования альтернативных источников энергии на автомобильном транспорте / В. С. Волков, Е. В. Тарасова // Сборник трудов конференций, 2014. – С. 50–53.
6. Cammack, R. Hydrogen as a Fuel. Learning from Nature / R. Cammack, M. Frey, R. Robson. – New York: Taylor and Francis, 2001. – P.227–230. doi:10.1201/9780203471043
7. Голубев, В. А. Перспективное моторное топливо для дизеля / В. А. Голубев, А. П. Уханов // Сборник трудов конференций, 2010. – С. 24–27.
8. Канавина, М. А. Факторы оценки эффективности работы нетрадиционных источников энергии / М. А. Канавина, В. Ф. Сидоренко // Сборник трудов конференций, 2004. – С. 98–100.
9. Филиппова, И. А. Управление жизненным циклом инновации / И. А. Филиппова // Сборник трудов конференций, 2014. – С. 305–308.
10. Соловей, В. В. Ризики техногенно-екологічного характеру при експлуатації об'єктів автотранспортної інфраструктури / В. В. Соловей, А. В. Гриценко, Н. В. Внукова // Экология и промышленность. – 2011. – № 3 (28). – С. 37–40.

11. Матвеев, С. Г. Влияние химического состава топлива на выброс бенз (а) пирена автомобилями / С. Г. Матвеев, М. Ю. Орлов, И. В. Четет // Вестник Самарского аэрокосмического университета. – 2007. – № 2 (13). – С. 134–136.
12. Rachin, E. Теоретическая оценка канцерогенности полициклических ароматических углеводородов / E. Rachin // Bulg. Chem Commun. – 1995. – № 5. – С. 353–357.
13. Васильев, А. Й. Використання геліо-та вітроенергетичних комплексів для зниження техногенного навантаження в рекреаційних зонах / А. Й. Васильев, І. Емрі, М. М. Зіпунніков та ін. // Вісник Інженерної академії України. – 2014. – Вип. 1. – С. 209–214.
14. Naegeli, D. M. Effects of fuel properties on soot formation in turbine combustion / D. M. Naegeli, C. A. Moses // Ibid. – 1991. – Vol. 781026. – P. 3–9.
15. Синяк, Ю. В. Прогнозные оценки стоимости водовода в условиях его централизованного производства / Ю. В. Синяк, В. Ю. Петров // Проблемы прогнозирования. – 2008. – № 3. – С. 41–48.
16. Taeko, Sano NOx formation in laminar flames / Sano Taeko // Combustion Science and technology. – 1992. – Vol. 29. – P. 261–275.
17. Caton, J. A. Detailed results for nitric oxide emissions as determined from a multiple – zone cycle simulation for a spark-ignition engine / J. A. Caton // Proceedings of 2002 Fall Technical Conference of the ASME – ICED (New Orleans, 8–11 Sept. 2002): Sheraton New Orleans, 2002. – P. 1–18. doi: 10.1115/icef2002-491
18. Пат. № 103681 України 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.
19. Solovey, V.V. Metal hydride thermosorption compressors with improved dynamic characteristics / V.V. Solovey, Yu. F. Shmal'ko, A. I. Ivanovsky, L. A. Kennedy // Int. J. of Hydrogen Energy. – 1996. – Vol. 21, Issue 11–12. – P. 1053–1055. doi: 10.1016/s0360-3199(96) 00041-9
20. Мацевитый, Ю. М. Научные основы создания газотурбинных установок с термохимическим сжатием рабочего тела / Ю. М. Мацевитый, В. Н. Голощапов, А. В. Русанов та ін. – НАН Украины, Институт проблем машиностроения. – Киев: Наук.думка, 2011. – 251 с.
21. H2Mobility: Hydrogen Vehicles [Electronic resource] / Available at: <http://www.h2mobility.org>