

*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, енерго-екологічні фактори*

*Rассмотрены технико-технологические решения, которые обеспечивают получение водорода на основе использования возобновляемых источников энергии с целью его применения в качестве моторного топлива. Проведен 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, энерго-экологические факторы*

## ВПЛИВ ЕНЕРГО-ЕКОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА КОНКУРЕНТОЗДАТНІСТЬ ВОДНЮ ЯК МОТОРНОГО ПАЛИВА (В ТРАНСПОРТНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВКАХ)

**В. В. Соловей**

Доктор технічних наук, професор,  
начальник відділу водневої енергетики\*

E-mail: solovey\_v\_v@ukr.net

**Н. В. Внукова**

Кандидат географічних наук, професор  
Кафедра екології

Харківський національний автомобільно-дорожній університет  
вул. Петровського, 25, м. Харків, Україна, 61002

E-mail: vnukovanv@ukr.net

**А. В. Гриценко**

Доктор географічних наук, професор, директор  
Український науково-дослідний інститут  
екологічних проблем

вул. Бакуліна, 6, м. Харків, Україна, 61166

E-mail: director@niiep.kharkov

**П. М. Каніло**

Доктор технічних наук, професор,  
провідний науковий співробітник\*

E-mail: pmk@ipmach.kharkov.ua

\*Інститут проблем машинобудування

Національної академії наук України ім. А. М. Підгорного  
вул. Дм. Пожарського, 2/10, м. Харків, Україна, 61046

### 1. Вступ

У зв'язку з тим, що світовий автомобільний парк досяг рівня 1 млрд., і споживає близько половини нафтових палив, практично всі країни змушені шукати шляхи зниження їх використання, орієнтуючись на заміщення альтернативними енергоносіями. Не менш гостро постає проблема охорони навколишнього середовища при масовій експлуатації транспортних установок у міських умовах. За останні 5 років викиди автотранспортних засобів зросли на 14,2% і склали більше ніж 40% від сумарних викидів в атмосферу всіма споживачами палив. Незважаючи на екологічні обмеження, що постійно жорсткішають, при збереженні сформованої на тепер структури автомобільного парку та незмінності темпів росту числа автомобілів, викиди шкідливих речовин до 2020 р. зростуть ще на 30%. Дослідження з питань соціально-економічної оцінки наслідків забруднення атмосфери свідчать,

що найбільша частка в можливому збитку належить складовій, котра пов'язана із впливом забруднення на здоров'я людини. У мегаполісах ця складова сягає 75–80% сумарного екологічного збитку від викидів автотранспорту.

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

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Екологічна безпека є одним з визначальних критеріїв розвитку автотранспортних засобів (АТЗ) і вимагає глибоких досліджень. Отримані результати дослідження спрямовані на поліпшення стану навколишнього се-

редовища, завдяки зменшенню забруднення продуктами згоряння АТЗ і збереженню природних біосферних комплексів для майбутніх поколінь і всього людства.

Аналіз забруднення атмосфери міст із інтенсивним автомобільним рухом свідчить про те, що найнебезпечнішими за ступенем впливу на організм людини є оксиди азоту ( $\text{NO}_x$ ) та канцерогенні вуглеводні (КВ). Їхня частка при оцінці екологічної небезпеки автомобільних двигунів сягає 95 % [1, 2]. Особливо небезпечні їхні похідні – нітроканцерогенні речовини, що мають, як наслідок явищ синергізма, 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. В зв'язку з цим поставлено завдання перед автотранспортною інфраструктурою великих міст скоротити до 2020 р. викиди КВ не менш ніж на 90 % [3]. Аналіз літературних даних свідчить про те, що активно йде пошук шляхів щодо зниження техногенного впливу на оточуюче природне середовище ВГ автомобілів [4], а також паралельно йде розвиток наукових основ розробки 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. Достатньо великий обсяг наукових праць включає питання пошуку альтернативних енергоносіїв [5] в тому числі для використання в ДВЗ [6, 7]. Для практичних підходів щодо використання в альтернативних і композитних палив в ДВЗ необхідним стає питання отримання узагальнених показників і часткової участі шкідливих речовин у еколого-хімічній небезпеці ДВЗ при використанні різних палив.

Гостро стає питання питомих вартісних витрат при використанні додаткових енергосіїв. Цім питанням присвячені роботи Канавіної М. А., Сидоренко В. Ф. [8]. Питання підходу до витрат на етапах життєвого циклу [9], питання управління життєвим циклом запропонованих інновацій та процесів життєвого циклу в машинобудуванні включають до себе дослідження зміни питомих вартісних витрат при використанні водню як додаткового енергоносія, але бажано розширити відповідь на це питання з урахуванням ресурсів для отримання водню. Таким чином, проблема, яку автори досліджують в статі, є узагальнення теоретичних і експериментальних даних з розробки методів більш ефективного спалювання моторних палив і екологічно прийнятого їхнього використання у ДВЗ з використанням водню, як вторинного енергоносія, який отримано з урахуванням питомих вартісних витрат за допомогою первинних енергоносіїв.

### 3. Ціль та задачі дослідження

Рішення поставленої проблеми потребує формування цілей та задач, які б допомогли вирішити шля-

хом експериментальних та методологічних досліджень наступні питання:

- розгляд та виділення найнебезпечніших речовин, які характеризують екологічну безпеку (небезпеку) автотранспортних засобів, з точки зору їх вмісту в ВГ автомобілів;
- проведення експериментальних досліджень, що практично підтвердять оцінку досконалості і технічного стану автомобілів, яка базується, в тому числі, на індикаторі сумарної канцерогенності автомобілів ( $M_{\Sigma\text{ПАР}}$ );
- розрахунок питомих вартісних витрат при використанні водню, як додаткового енергоносія в автотранспорті з розгляданням можливості його отримання на основі розглянутих різних паливних технологій та використання в композитних паливах в якості альтернативи традиційним моторним паливам.

### 4. Технології виробництва водню та експериментальні випробування з використанням бензинових паливних композицій (БВПК)

Перспективним є шлях зниження канцерогенно-мутагенної небезпеки ДВЗ і зменшення експлуатаційної витрати традиційних нафтових палив за рахунок використання альтернативних палив, включаючи водень, який можна застосовувати як основне, так і додаткове паливо [10]. Результати досліджень свідчать, що ініціюючі властивості водню роблять 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.

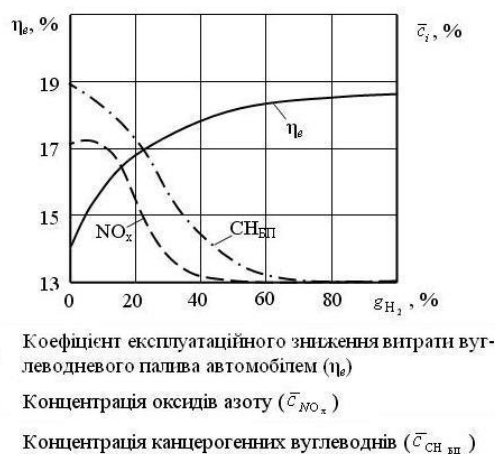


Рис. 1. Вплив домішок водню ( $g_{\text{H}_2}$ ) на економічні ( $\eta_e$ ) та екологічні ( $\bar{c}_i$ ) показники ДВЗ

На основі обробки експериментальних даних, отриманих при випробуванні автомобілів різних марок встановлено, що за результатами вимірів масових викидів одного з найбільш вивчених КВ – бенз(а)пірену (БП) – можна визначити рівні викидів компонентів пріоритетної групи поліароматичних вуглеводнів поверхнево активних речовин (ПАР) і надати оцінку

сумарної канцерогенності ВГ не роблячи повного хімічного аналізу всього спектру ПАР, що являє собою досить складну процедуру. 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]. Таким чином, 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 ( $M_{\Sigma \text{ПАР}}$ ) ВГ автомобілів згідно розрахунку за формулами:

$$M_{\Sigma \text{ПАР}} = 34,6 \cdot \bar{m}_{\text{вп}}, \quad (1)$$

$$M_{\Sigma \text{ПАР(К)}} = 11,9 \cdot \bar{m}_{\text{вп}}, \quad (2)$$

$$\Sigma(m_{\text{КВ}} \cdot \text{ІКА}) = 1,3 \cdot \bar{m}_{\text{вп}}, \quad (3)$$

де  $\bar{m}_{\text{вп}}$  – масовий викид і-ї речовини з ВГ автомобіля, г/км; ІКА – індекс канцерогенної агресивності компонентів пріоритетної групи КВ,  $\text{ІКА}_{\text{БП}}=1$ .

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  $g_{\text{H}_2} \leq 10\%$  мас.) забезпечується зменшення витрати нафтового палива до 40% (за рахунок заміщення бензином воднем і підвищення експлуатаційної паливної економічності автомобіля) та зниження викидів з ВГ:  $\text{NO}_x$  – в 8 разів, а канцерогенних вуглеводнів (зокрема, БП) – на порядок і більше.

Зміна питомих вартісних витрат ( $\delta \bar{Z}_{\text{п+н}_2}$ ) при використанні водню як додаткового енергоносія, які віднесено до вартості одиниці маси опочаткового вуглеводневого палива розраховується згідно рівняння:

$$\begin{aligned} \delta \bar{Z}_{\text{п+н}_2} &= \left[ (a \cdot g_{\text{п}} \cdot \text{Ц}_{\text{H}_2} - g_{\text{п}} \cdot \text{Ц}_{\text{п}}) + \right. \\ &+ \left. \bar{\eta}_e \cdot (1 - g_{\text{п}}) \cdot \text{Ц}_{\text{п}} - \text{Ц}_{\text{п}} \right] / \text{Ц}_{\text{п}} = \\ &= (a \cdot \bar{\text{Ц}} - 1) \cdot g_{\text{п}} + \bar{\eta}_e \cdot (1 - g_{\text{п}}) - 1, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $a = H_{\text{п}}^{\text{н}} / H_{\text{н}_2}^{\text{н}}$  – відношення теплоти згоряння відповідно основного вуглеводневого палива (П) і водню ( $\text{H}_2$ );  $g_{\text{п}}$  – еквівалентна масова частка початкового вуглеводневого палива заміщена (за тепловиділенням) додатковим енергоносієм (наприклад, для водню і сучасного бензину  $g_{\text{H}_2} = a \cdot g_{\text{п}} \approx 0,37 \cdot g_{\text{п}}$ );  $\text{Ц}_{\text{п}}$ ,  $\text{Ц}_{\text{H}_2}$  – вартість одиниці маси або енергетична вартість ( $\bar{\text{Ц}}$ ) відповідно вуглеводневого палива і водню на місці споживання, грн/кг, грн/ГДж;  $\bar{\text{Ц}} = \text{Ц}_{\text{H}_2} / \text{Ц}_{\text{п}}$ ;  $\bar{\eta}_e$  – коефіцієнт експлуатаційного зниження витрати вуглеводневого палива автомобілем за рахунок підвищення ефективності спалювання композитних сумішей (при

змішаному регулюванні подачі водню в камеру згорання ДВЗ на режимах Європейського їздового циклу  $\eta_e \approx (1 - g_{\text{п}})$ ).

Результати аналізу рівняння (4) свідчать, що 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  $\bar{\text{Ц}} \approx 3,0$  і  $g_{\text{п}} \leq 0,15$ . А при  $\bar{\text{Ц}} \approx 2,0$  і  $g_{\text{п}} = 0,3$  рівень сумарних витрат на паливо зменшується на 15%. Таким чином, додавання водню до збіднених бензоповітряних паливних сумішей в ДВЗ є економічно виправданими при існуючих цінах на паливо навіть без урахування поліпшення їх екологічних 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 високоекоекологічним, тому що викидами є тільки водяна пара – сліди мастильних матеріалів і тверді частинки, що утворюються при зношуванні гальмових колодок і покриттів. Тому в ряді країн Європи почалося широке застосування водню в легкових автомобілях і міських автобусах як основного, так і додаткового енергоносія. За даними компанії L-B-Systemtechnik GmbH ([www.h2mobility.org](http://www.h2mobility.org)) 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 викидів 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 функціонуван-

ня 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, тому що конструкція вузлів і агрегатів, а також склад матеріалів, які використовуються, помітно розрізняється. 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 розробці стратегії розвитку автомобільного транспорту.

##### **5. 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 електродіодних технологій виробництва водню при використанні електроенергії, яку отримано від вітрової електростанції та електростанції на сонячних фотоелектричних перетворювачах.

При проведенні аналізу були використані наступні 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./м<sup>3</sup> Н<sub>2</sub> [18].
2. Металогідридний термосорбційний водневий компресор – 1000 дол./м<sup>3</sup> Н<sub>2</sub> [19].
3. Установка по скрапленню водню на базі металогідридного термосорбційного водневого компресору – 60000 дол./кг Н<sub>2</sub> [20].
4. Система зберігання водню в стислому вигляді (70,0 МПа) – 2000 дол./кг Н<sub>2</sub>.
5. Система зберігання рідкого водню – 3000 дол./кг Н<sub>2</sub>.

Для зберігання водню розглянуто технології його накопичення під тиском в газоподібному стані та криогенний спосіб зберігання зрідженого водню. Визначено, що при умовах зберігання водню під тиском у газоподібному стані обходиться в 5–6 разів дешевше, ніж при криогенному способі, 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 із криогенними танками.

Сучасні технології виробництва ємностей, що працюють під високим тиском, зокрема з композитних матеріалів, дозволяють суттєво знизити матеріалоемісність балонів. При виготовленні таких балонів використовується тонкостінна металева оболонка (лейнер) з нержавіючої сталі або алюмінію, яка істотно підсилюється оболонкою з композитного матеріалу. У порівнянні із суцільнометалевим питомою 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 штук сферичних ємностей високого тиску зі сталі 12ХН2МДФ-Ш об'ємом 0,9 м<sup>3</sup> з робочим тиском 31,3 МПа, які виготовлено ВАТ «Сумське машинобудівне наукове виробниче об'єднання ім. Фрунзе». Середній обсяг перевезення водню одним вантажним автомобілем становить близько 1400 кг для газоподібного водню під тиском і приблизно 1600 кг для рідкого водню. Вартість доставки водню на відстань 1000 км буде становити: для газоподібного водню – 3,0 дол./кг при автомобільних перевезеннях, і для рідкого водню – 4,0 дол./кг.

Наступною складовою витрат при використанні водню є витрати на заправлення автомобілів на рідкому і на 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. Таким чином, інфраструктурні витрати в сумі збільшують вартість водню (додатково до вартості його одержання) в баці 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 поля конкурентоздатних технологій в автотранспортній інфраструктурі. Для підвищення ефективності використання водню, виготовленого за допомогою вітрових електростанцій (ВЕС) необхідно суттєве зниження вартості ВЕС, у першу чергу за рахунок складової вартості фотоелектричних перетворювачів.

У табл. 1 наведено результати розрахунку повних витрат енергоресурсів, що виникають при використанні традиційних моторних палив і водню, котрий одержують на базі різних технологій його виробництва. Такий комплексний підхід дозволяє обґрунтовано підійти до економічної оцінки збитків у результаті використання різних водневих технологій на автотранспорті [22].

Як випливає з даних табл. 1 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 нарівно між витратами на одержання моторних палив та виготовлення автомобіля, включаючи матеріали. Сумарні питомі викиди CO<sub>2</sub> протягом життєвого циклу виробу сягають 200–250 кг/1000 км, а інших забруднювачів – від 2,0 кг для дизельного палива та до 2,5 кг для бензину. У випадку використання поновлюваних джерел енергії, (зокрема ВЕС) для одержання водню шляхом електролізу зазначені показники становлять 75 %, що свідчить про доцільність залучення в сферу практичного використання у водневій інфраструктурі вітроенергетичного потенціалу.

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
Паливний цикл, %	28	17	14
Експлуатація автомобіля, %	41	66	66
Виробництво автомобіля та рециклінг, %	31	17	20
Викиди кг/1000 км			
CO <sub>2</sub>	76	23,9	21,5
VOC (volatile organic compounds)	16,6	33,2	23,3
CO	27,2	135,3	84,0
NO <sub>x</sub>	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 підсумку на основі розглянутих технологій виробництва водню і його використання в автотранспорті та з урахування даних щодо оцінки викидів у навколишнє середовище було отримано значення очікуваної вартості 1000 км пробігу автомобіля за основними її складовими: 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). По мірі зростання пробігу автомобіля в міських умовах внесок екологічної складової проявляється більш суттєво, що дає додаткові переваги технології використання водню, як моторного палива (табл. 2).

Як виходить з наведених даних, оцінка повної вартості 1000 км пробігу робить водневий автомобіль на газоподібному водні цілком конкурентноздатним у порівнянні з автомобілем з бензиновим двигуном, якщо водень одержують шляхом електролізу води з використанням енергії ВЕС. У міру освоєння цих технологій варто очікувати вдосконалення 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

## 6. Висновки

Авторами було проаналізовано та виділено на основі обробки експериментальних даних, отриманих при випробуванні автомобілів різних марок, що за результатами вимірів масових викидів еколого-хімічна небезпека (безпека) досліджених ДВЗ в основному (на 95 % і більше) визначається рівнями викидів з ВГ NO<sub>x</sub> і канцерогенних вуглеводнів (зокрема БП).

Встановлено, після проведення експериментальних досліджень, що значиме зниження рівнів викидів NO<sub>x</sub> з відпрацьованими газами ДВЗ та істотне (на поряток і більше) зниження сумарної канцерогенності ВГ по канцерогенним вуглеводням ДВЗ при використанні нафтових палив забезпечується введенням домішок водню, а 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<sub>ΣПАР</sub>) ВГ.

Оцінено повні витрати енергії та викидів до атмосфери при використанні домішок водню в вуглеводневих паливах як додаткового енергоносія. Проведено оцінку повних витрат енергії та викидів до атмосфери при використанні різних паливних технологій в автомобільному транспорті. Разраховано та 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 супертоксикантами [Текст] / 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 [Текст] / П. М. Канило, И. С. Бей, А. И. Ровенский. – Харьков: Прапор, 2000. – 304 с.
3. Петров, Р. Л. Германия: Экологический рейтинг автомобилей [Текст] / Р. Л. Петров // Автомобільна промисловість. – 2001. – № 7. – С. 35–39.
4. Канило, П. М. Анализ эффективности использования нефтяных и альтернативных топлив в автомобильном транспорте [Текст] / 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 [Текст] / В. С. Волков, Е. В. Тарасова // Сборник трудов конференций, 2014. – С. 50–53
6. Cammack, R. Hydrogen as a Fuel. Learning from Nature [Text] / 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 [Текст] / В. А. Голубев, А. П. Уханов // Сборник трудов конференций, 2010. – С. 24–27.
8. Канавина, М. А. Факторы оценки эффективности работы нетрадиционных источников энергии [Текст] / М. А. Канавина, В. Ф. Сидоренко // Сборник трудов конференций, 2004. – С. 98–100.
9. Филиппова, И. А. Управление жизненным циклом инновации [Текст] / И. А. Филиппова // Сборник трудов конференций, 2014. – С. 305–308.
10. Соловей, В. В. Ризики техногенно-екологічного характеру при експлуатації об'єктів автотранспортної інфраструктури [Текст] / 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 [Текст] / С. Г. Матвеев, М. Ю. Орлов, И. В. Четч // Вестник Самарского аэрокосмического университета. – 2007. – № 2(13). – С. 134–136.
12. Rachin, E. Теоретическая оценка канцерогенности полициклических ароматических углеводородов [Текст] / 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 [Текст] / 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 un soot formation in turbine combustion [Text] / D. M. Naegeli, C. A. Moses // Jbid. – 1991. – Vol. 781026. – P. 3–9.
15. Синяк, Ю. В. Прогнозные оценки стоимости водовода в условиях его централизованного производства [Текст] / Ю. В. Синяк, В. Ю. Петров // Проблемы прогнозирования. – 2008. – № 3. – С. 41–48.
16. Taeko, Sano NOx formation in laminar flames [Text] / Sano Taeko // Combustion Science and technjlogy. – 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 [Text] / 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/iced2002-491
18. Пат. № 103681 України МПК С25В 1/12, С25В 1/03. Пристрій для одержання водню високого тиску [Текст] / 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 [Text] / 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 [Текст] / 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>
22. Петров, В. Ю. Конкурентоспособность водорода как моторного топлива на автомобильном транспорте [Текст] / В. Ю. Петров. – Труды ИИП РАН, 2008. – С. 38–44.