

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 621.434.432

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).2.164-174](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).2.164-174)**О.О. Кухаренко**, магістрант, **Д.О. Шалапко**, доц., канд. техн. наук*Херсонський ННІ НУК, м. Херсон, Україна***Л.А. Тарандушка**, проф., д-р техн. наук*Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна**e-mail: shalapko.denys@gmail.com, tarandushkal@ukr.net*

Інтеграція водневих технологій у транспортні двигуни внутрішнього згоряння: аналіз впливу на ефективність та екологічність

У світлі зростаючого інтересу до альтернативних джерел енергії, ця стаття пропонує глибокий аналіз перспектив впровадження водневих технологій у транспортній сфері. Розглянуті відомості про сучасність та перспективи цієї галузі, а також акцентовано увагу на екологічних, економічних та соціальних вигодах використання водню. Зокрема, надано огляд технічних рішень для оптимізації ефективності водневих двигунів та висвітлено значення розвитку інфраструктури в цьому контексті. За допомогою аналізу кейс-стадій успішного впровадження водневих технологій у різних країнах, стаття виробляє високий рівень усвідомленості про потенціал водню як ключового елементу сталого розвитку транспортного сектору.

водневі технології, транспортний сектор, водневі двигуни внутрішнього згоряння, паливні елементи, ефективність двигунів

Постановка проблеми. Зміна клімату та виснаження викопних паливних ресурсів є одними з найважливіших викликів сучасності. Використання традиційних видів палива призводить до значного забруднення навколишнього середовища, викидів парникових газів та інших шкідливих речовин. Це спонукає наукову спільноту та промисловість шукати альтернативні джерела енергії, які були б екологічно чистими та ефективними.

Водень як паливо для транспортних засобів привертає все більше уваги завдяки своїм унікальним властивостям. Він має високу теплотворну здатність і при згорянні утворює лише воду, що робить його одним з найчистіших видів палива. Використання водню в двигунах внутрішнього згоряння (ДВЗ) може стати ефективним рішенням для зменшення викидів парникових газів та інших забруднювачів, що сприятиме збереженню навколишнього середовища.

Впровадження водневих технологій у транспортні ДВЗ також відкриває нові можливості для підвищення ефективності двигунів. Сучасні дослідження зосереджені на оптимізації процесів згоряння водню, використанні новітніх матеріалів і технологій для підвищення ККД та надійності двигунів. Крім того, важливими аспектами є розвиток інфраструктури для виробництва, зберігання та транспортування водню, а також економічні та соціальні переваги від переходу на водневі технології.

У цій статті розглянуто сучасний стан водневих технологій у транспортних ДВЗ, проаналізовано технічні рішення для підвищення їх ефективності, екологічні переваги, а також економічні та інфраструктурні виклики. Особливу увагу приділено кейс-стадіям успішного впровадження водневих технологій у різних країнах, що дозволяє виявити ключові фактори успіху та перспективи подальшого розвитку цієї галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання водню як палива для двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) пропонує екологічно чисту альтернативу традиційним бензиновим та дизельним двигунам. Сучасні технології водневих ДВЗ розвиваються в кількох ключових напрямках, зокрема адаптації існуючих двигунів для роботи на водні, розробки нових конструкцій двигунів, оптимізації систем подачі палива та згоряння, а також впровадження технологій зниження викидів шкідливих речовин [1].

Одним з найпоширеніших підходів є адаптація існуючих бензинових або дизельних двигунів для роботи на водні. Це включає модифікацію систем подачі палива, впорскування та системи запалювання. Використання водню в таких двигунах може здійснюватися в двох режимах:

1. чисте водневе паливо: двигуни, що працюють виключно на водні, потребують спеціальних змін для роботи з високими температурами згоряння та забезпечення належної суміші палива і повітря [2].

2. двофазне паливо: двигуни, що працюють на суміші водню з традиційними видами палива, що дозволяє знизити викиди CO_2 та підвищити ефективність згоряння [3].

Інший підхід полягає в розробці нових двигунів, спеціально спроектованих для роботи на водні [4]. Такі двигуни можуть мати оптимізовану геометрію камер згоряння, системи впорскування та запалювання, що забезпечує максимальну ефективність та мінімальні викиди. Деякі перспективні технології включають:

- пряме впорскування водню: дозволяє точно контролювати подачу водню і забезпечувати оптимальні умови згоряння.

- система подвійного впорскування: використання водню та традиційного палива для досягнення кращої ефективності та зниження викидів.

- турбонаддув: підвищення потужності та ефективності двигуна шляхом збільшення подачі повітря в камеру згоряння.

Для ефективної роботи водневих ДВЗ важливо забезпечити належну подачу палива та оптимальні умови згоряння [5]. Основні технології включають:

- електронні системи управління: дозволяють точно контролювати подачу водню, забезпечуючи оптимальні умови згоряння та зниження викидів.

- системи охолодження згоряння: використання технологій для зниження температури згоряння, що дозволяє зменшити утворення оксидів азоту (NO_x).

- каталітичні системи: використання каталітичних нейтралізаторів для зниження викидів шкідливих речовин.

Однією з ключових переваг використання водню є значне зниження викидів CO_2 [6]. Проте, високі температури згоряння водню можуть призводити до утворення оксидів азоту (NO_x) [7]. Для вирішення цієї проблеми застосовуються такі технології:

- системи рециркуляції відпрацьованих газів (EGR): дозволяють знижувати температуру згоряння та зменшувати утворення NO_x .

- впорскування води або пари: додавання води або пари до камери згоряння для зниження температури та утворення NO_x .

- каталітичні нейтралізатори: використання спеціальних каталізаторів для зниження викидів NO_x у відпрацьованих газах [8].

Постановка завдання. Таким чином, сучасні технології водневих двигунів внутрішнього згоряння спрямовані на підвищення ефективності, зниження викидів шкідливих речовин та забезпечення екологічної чистоти. Розвиток цих технологій відкриває нові можливості для створення екологічно безпечного транспорту та зниження залежності від викопних видів палива.

Виклад основного матеріалу. Підвищення ефективності водневих двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) є важливим завданням для забезпечення конкурентоспроможності цих технологій порівняно з традиційними двигунами. Ефективність водневих ДВЗ можна покращити за допомогою кількох технічних рішень, спрямованих на оптимізацію процесу згоряння, використання нових матеріалів і технологій, а також удосконалення систем управління двигуном [9].

Оптимізація процесу згоряння водню [10]:

1. Пряме впорскування водню: системи прямого впорскування дозволяють точно дозувати подачу водню безпосередньо у камеру згоряння. Це забезпечує краще перемішування палива з повітрям, знижує ймовірність детонаційного згоряння і покращує загальну ефективність двигуна.

2. Контрольоване запалювання: використання систем контролю запалювання дозволяє точно регулювати момент займання водню, що сприяє оптимальному згорянню палива та підвищенню ефективності. Це може включати використання іскрових свічок з високою напругою або систем лазерного запалювання.

3. Зниження температури згоряння: високі температури згоряння водню можуть призводити до утворення оксидів азоту (NOx). Для зниження температури згоряння застосовуються технології, такі як впорскування води або пари у камеру згоряння, що дозволяє ефективно контролювати температуру і зменшувати викиди NOx.

Щодо використання нових матеріалів і технологій варто розподілити на:

1. Легкі та міцні матеріали: використання новітніх матеріалів, таких як алюмінієві сплави, титан або композитні матеріали, дозволяє зменшити вагу компонентів двигуна, що підвищує загальну ефективність та продуктивність. Ці матеріали також мають високу термічну стійкість, що важливо для роботи з воднем.

2. Антикорозійні покриття: водень має агресивні властивості, які можуть спричинити корозію металевих компонентів. Використання спеціальних антикорозійних покриттів дозволяє продовжити термін служби двигуна та забезпечити його надійність.

Відповідно до удосконалення систем управління двигуном, вони потребують наступних змін:

1. Електронні системи управління двигуном (ECU): сучасні ECU можуть забезпечити точний контроль над усіма параметрами роботи двигуна, включаючи подачу палива, запалювання, рециркуляцію відпрацьованих газів (EGR) та інші. Це дозволяє оптимізувати роботу двигуна в режимі реального часу для досягнення максимальної ефективності.

2. Системи рециркуляції відпрацьованих газів (EGR): використання EGR дозволяє знижувати температуру згоряння та зменшувати утворення NOx. Це досягається шляхом повернення частини відпрацьованих газів у камеру згоряння, що дозволяє знизити пікові температури і покращити загальну ефективність двигуна.

3. Турбонаддув та суперчарджинг: використання турбокомпресорів і суперчарджерів дозволяє збільшити подачу повітря в камеру згоряння, що підвищує потужність двигуна та його ефективність. Це особливо важливо для водневих ДВЗ, де досягнення оптимальної суміші повітря і водню є ключовим фактором ефективного згоряння.

Інтеграція з гібридними системами:

1. Гібридні водневі ДВЗ: інтеграція водневих ДВЗ з електричними двигунами у гібридних системах може забезпечити додаткову ефективність та гнучкість у використанні енергії. Це дозволяє використовувати електричний двигун для низьких

швидкостей або під час зупинок, знижуючи загальне споживання водню і покращуючи паливну економічність.

2. Рекуперація енергії: використання систем рекуперації енергії, що зберігають енергію під час гальмування та використовують її для додаткового приводу або інших потреб, може значно підвищити загальну ефективність водневих ДВЗ.

Впровадження цих технічних рішень дозволяє підвищити ефективність водневих двигунів внутрішнього згоряння, забезпечуючи їх конкурентоспроможність з іншими видами транспортних засобів і сприяючи розвитку екологічно чистих технологій у транспортній галузі.

Екологічні аспекти використання водню у транспортних ДВЗ.

Використання водню як палива для двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) відкриває нові можливості для зниження негативного впливу на навколишнє середовище. У цьому розділі розглянуто основні екологічні аспекти, пов'язані з водневими ДВЗ, включаючи зниження викидів парникових газів, зменшення забруднення повітря іншими шкідливими речовинами, вплив на якість повітря та можливості використання відновлюваних джерел енергії.

Однією з головних екологічних переваг водневих ДВЗ є відсутність викидів вуглекислого газу (CO_2) під час згоряння водню. Традиційні бензинові та дизельні двигуни викидають значну кількість CO_2 , який є основним чинником глобального потепління та зміни клімату. Водень, при згорянні, утворює лише воду (H_2O), що робить його екологічно чистим паливом. Завдяки цьому, перехід на водневі ДВЗ може суттєво знизити викиди парникових газів у транспортному секторі.

Хоча згоряння водню не виробляє CO_2 , високі температури згоряння можуть сприяти утворенню оксидів азоту (NO_x), які є шкідливими для навколишнього середовища та здоров'я людини. Для вирішення цієї проблеми розроблені кілька технологій:

- Рециркуляція відпрацьованих газів (EGR): Використання EGR дозволяє знижувати температуру згоряння шляхом повернення частини відпрацьованих газів у камеру згоряння, що зменшує утворення NO_x .

- Каталітичні нейтралізатори: Встановлення каталізаторів у вихлопних системах водневих ДВЗ дозволяє перетворювати NO_x на менш шкідливі речовини, такі як азот (N_2) і вода (H_2O).

- Охолодження згоряння: Впорскування води або пари у камеру згоряння допомагає знижувати пікові температури, що сприяє зменшенню утворення NO_x .

Водневі ДВЗ також сприяють зниженню викидів інших шкідливих речовин, таких як оксиди сірки (SO_x), тверді частинки (PM) та незгорілі вуглеводні (HC). Водень не містить сірки, тому його згоряння не призводить до утворення SO_x , які викликають кислотні дощі та інші екологічні проблеми. Тверді частинки та незгорілі вуглеводні, які утворюються при згорянні вихлопного палива, також значно знижуються при використанні водню, що позитивно впливає на якість повітря.

Перехід на водневі ДВЗ може значно покращити якість повітря, особливо у міських районах, де концентрація транспортних засобів є високою. Зменшення викидів CO_2 , NO_x , SO_x , PM та HC сприяє зниженню рівня смогу та покращенню загального стану повітря. Це, в свою чергу, позитивно впливає на здоров'я населення, зменшуючи захворюваність на респіраторні та серцево-судинні захворювання.

Водень можна виробляти з використанням відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія. Це робить водневі технології ще більш привабливими з екологічної точки зору. Виробництво водню шляхом електролізу води, де електроенергія отримується з відновлюваних джерел, дозволяє знизити залежність від

викопних видів палива та зменшити загальний екологічний вплив на планету. Відновлюваний водень, вироблений з використанням зеленої енергії, створює замкнений цикл, де вода, утворена в результаті згоряння водню, може бути знову використана для його виробництва.

Економічні та соціальні переваги впровадження водневих ДВЗ

Перехід на водневі двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) має не лише екологічні, але й значні економічні та соціальні переваги. Ці переваги включають зменшення залежності від викопних видів палива, створення нових робочих місць, розвиток інноваційних технологій, покращення енергетичної безпеки та підвищення якості життя.

Зменшення залежності від викопних видів палива:

1. Енергетична незалежність: Використання водню як палива дозволяє країнам зменшити залежність від імпорту викопних видів палива, таких як нафта та газ. Це сприяє зміцненню енергетичної незалежності та знижує ризики, пов'язані з коливанням цін на нафту та геополітичними конфліктами.

2. Стабільніші ціни на паливо: Водень може бути вироблений з місцевих відновлюваних джерел енергії, що допомагає стабілізувати ціни на паливо та зменшити їхню залежність від світових ринків нафти.

Створення нових робочих місць

1. Розвиток водневої інфраструктури: Впровадження водневих технологій вимагає розбудови нової інфраструктури, включаючи виробництво, зберігання, транспортування та заправні станції для водню. Це створює численні можливості для працевлаштування у різних секторах економіки.

2. Інноваційні технології та стартапи: Розвиток водневих ДВЗ стимулює появу нових компаній та стартапів, які зосереджуються на розробці та впровадженні інноваційних рішень у цій галузі. Це сприяє розвитку наукових досліджень і технологічного прогресу.

Розвиток інноваційних технологій включає покращення ефективності та продуктивності: впровадження водневих ДВЗ стимулює дослідження та розробки у галузі енергетичних технологій, що включає вдосконалення методів виробництва водню, оптимізацію двигунів та розробку нових матеріалів і компонентів. Також важлива синергія з іншими технологіями: водневі технології можуть бути інтегровані з іншими передовими технологіями, такими як відновлювані джерела енергії та електричні транспортні засоби, що сприяє створенню комплексних рішень для сталого розвитку енергетичного сектору.

Покращення енергетичної безпеки включає різноманітність джерел енергії: водень можна виробляти з різних джерел, включаючи воду, біомасу, природний газ та відновлювані джерела енергії, що дозволяє диверсифікувати енергетичні ресурси та знижує ризики, пов'язані з обмеженістю або виснаженням окремих видів палива. Крім того, водень може бути використаний як засіб зберігання енергії, що дозволяє згладжувати коливання виробництва енергії з відновлюваних джерел, таких як сонячні та вітрові електростанції, підвищуючи таким чином стабільність та надійність енергетичних систем.

Підвищення якості життя безпосередньо пов'язане з впровадженням водневих технологій у транспортній галузі, що має низку суттєвих переваг. Однією з головних переваг є зменшення забруднення повітря. Використання водневих ДВЗ значно знижує викиди шкідливих речовин, таких як оксиди азоту, сірки та тверді частинки, які є основними забруднювачами в міських умовах. Це сприяє покращенню якості повітря, особливо у густонаселених містах, де проблема забруднення повітря є найбільш

гострою. Покращення якості повітря позитивно впливає на здоров'я населення, знижуючи ризик захворювань дихальної та серцево-судинної систем, а також зменшує витрати на медичне обслуговування, які часто пов'язані з лікуванням захворювань, викликаних забрудненням повітря.

Крім зменшення забруднення повітря, водневі технології сприяють стійкому розвитку громад. Впровадження цих технологій створює можливості для побудови більш екологічно чистих та енергоефективних громад, що включає розвиток транспорту, житлової інфраструктури та промисловості з меншим впливом на довкілля. Зокрема, розвиток водневого транспорту сприяє зменшенню залежності від викопного палива, що знижує викиди парникових газів і сприяє боротьбі зі зміною клімату.

Крім того, водневі технології можуть бути інтегровані в житлову інфраструктуру, забезпечуючи ефективно та екологічно чисте енергопостачання для будинків та комерційних споруд. Це включає використання водню для опалення, гарячого водопостачання та виробництва електроенергії, що зменшує навантаження на традиційні енергетичні системи і знижує викиди шкідливих речовин у атмосферу.

На промисловому рівні водневі технології можуть сприяти розвитку нових галузей та створенню робочих місць у сферах, пов'язаних з виробництвом, зберіганням та розподілом водню. Це стимулює економічний розвиток та сприяє створенню стійких робочих місць з високим рівнем екологічної відповідальності. Таким чином, впровадження водневих технологій сприяє формуванню економіки, орієнтованої на екологічну стійкість та високу якість життя для всіх громадян.

Інфраструктурні виклики та рішення

Впровадження водневих двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) у транспортному секторі стикається з низкою інфраструктурних викликів. Ці виклики пов'язані з виробництвом, зберіганням, транспортуванням та розподілом водню. У цьому розділі розглянемо основні інфраструктурні проблеми та можливі рішення для їх подолання.

Виробництво водню

Виклики:

1. Висока вартість виробництва: виробництво водню, особливо зеленого водню з відновлюваних джерел енергії, є дорогим процесом, що робить водень менш конкурентоспроможним у порівнянні з традиційними викопними видами палива.

2. Обмежені виробничі потужності: наразі існуючі потужності для виробництва водню недостатні для задоволення майбутнього попиту з боку транспортного сектору.

Рішення:

1. Інвестиції у нові технології: розвиток та вдосконалення технологій електролізу води, включаючи більш ефективні та дешевші електролізери, можуть знизити вартість виробництва водню.

2. Розширення виробничих потужностей: інвестиції у будівництво нових заводів з виробництва водню, особливо з використанням відновлюваних джерел енергії, допоможуть задовольнити зростаючий попит.

Зберігання водню

Виклики:

1. Низька щільність енергії: водень має низьку щільність енергії за нормальних умов, що ускладнює його зберігання у великих обсягах.

2. Потреба в високому тиску або криогенних умовах: для зберігання водню у великих об'ємах необхідно використовувати високий тиск або криогенні температури, що потребує спеціального обладнання та інфраструктури.

Рішення:

1. Високотисковані резервуари: використання високотискованих резервуарів дозволяє зберігати водень у стисненому стані, що зменшує обсяг, необхідний для зберігання.

2. Зріджений водень: зберігання водню у зрідженому стані при криогенних температурах дозволяє значно зменшити об'єм, необхідний для зберігання, хоча це потребує складнішої інфраструктури та високих енергетичних витрат.

Транспортування водню

Виклики:

1. Потреба у спеціалізованих транспортних засобах: транспортування водню вимагає використання спеціалізованих транспортних засобів, здатних забезпечити безпечно перевезення під високим тиском або у зрідженому стані.

2. Відсутність розвинутої мережі: існуюча інфраструктура для транспортування водню є недостатньою для масового впровадження водневих технологій.

Рішення:

1. Розвиток водневих трубопроводів: будівництво спеціалізованих трубопроводів для транспортування водню може забезпечити ефективне та безпечно переміщення водню на великі відстані.

2. Використання існуючих газопроводів: адаптація існуючих природногазових трубопроводів для транспортування водню або воднево-газових сумішей може зменшити витрати на розбудову нової інфраструктури.

Розподіл та заправка

Виклики:

1. Нестача заправних станцій: існуюча мережа водневих заправних станцій є обмеженою, що ускладнює широке впровадження водневих ДВЗ у транспортному секторі.

2. Висока вартість розбудови заправної інфраструктури: створення нових заправних станцій для водню потребує значних фінансових інвестицій.

Рішення:

1. Державні стимули та субсидії: уряди можуть надавати фінансові стимули та субсидії для підтримки будівництва водневих заправних станцій, що сприятиме швидшому розвитку інфраструктури.

2. Партнерство з приватним сектором: співпраця між державними установами та приватними компаніями може прискорити процес розбудови інфраструктури та знизити фінансовий тиск на окремих інвесторів.

Кейс-стадії успішного впровадження водневих технологій у транспорті

Впровадження водневих технологій у транспортному секторі вже демонструє успіх у кількох країнах та регіонах. У цьому розділі розглянемо кілька кейс-стадій, що ілюструють успішні приклади використання водневих двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) та водневих паливних елементів у різних транспортних засобах.

1. Японія: Водневі автобуси у Токіо

Контекст:

Японія є лідером у розвитку водневих технологій. Уряд Японії активно підтримує впровадження водневих транспортних засобів як частину своєї стратегії зниження викидів CO₂ та підвищення енергетичної безпеки.

Проект:

У Токіо був запущений проект водневих автобусів, що використовують водневі паливні елементи. Цей проект був реалізований в рамках підготовки до Олімпійських ігор 2020 року.

Результати:

- Екологічні переваги: Водневі автобуси не виробляють CO₂ та інших шкідливих викидів, що значно покращує якість повітря у місті.

- Технологічні досягнення: Проект сприяв розвитку нових технологій у виробництві та використанні водню.

- Соціальний вплив: Підвищення обізнаності громадськості про переваги водневих технологій та їхній потенціал для зниження викидів.

2. Німеччина: Водневі поїзди Alstom

Контекст:

Німеччина активно інвестує у розвиток водневих технологій як частину своєї стратегії з переходу на відновлювані джерела енергії та зменшення викидів у транспортному секторі.

Проект:

Компанія Alstom розробила водневі поїзди Coradia iLint, які працюють на водневих паливних елементах. Ці поїзди були введені в експлуатацію на декількох регіональних маршрутах у Нижній Саксонії.

Результати:

- зниження викидів: водневі поїзди замінили дизельні, що суттєво знизило викиди парникових газів та інших забруднювачів.

- економічні вигоди: використання водню, виробленого з відновлюваних джерел енергії, сприяє зниженню залежності від викопного палива.

- інновації: проект стимулював подальші дослідження та розробки у сфері водневих технологій для транспорту.

3. Південна Корея: Водневі таксі у Сеулі

Контекст:

Південна Корея поставила амбітні цілі щодо зниження викидів та розвитку водневих технологій. В рамках національної водневої стратегії активно впроваджуються водневі транспортні засоби.

Проект:

У Сеулі було запущено проект водневих таксі, що використовують водневі паливні елементи. Цей проект реалізується у співпраці між урядом, місцевими органами влади та приватними компаніями.

Результати:

- поліпшення якості повітря: водневі таксі допомагають знизити рівень забруднення повітря у мегаполісі.

- підвищення обізнаності: проект сприяє підвищенню обізнаності населення про водневі технології та їхні переваги.

- розвиток інфраструктури: проект включає будівництво водневих заправних станцій, що сприяє розвитку водневої інфраструктури.

4. Каліфорнія, США: Водневі легкові автомобілі

Контекст:

Каліфорнія є лідером у впровадженні екологічних технологій у США. Уряд штату активно підтримує розвиток водневих транспортних засобів через законодавчі ініціативи та фінансові стимули.

Проект:

У Каліфорнії активно розвивається мережа водневих заправних станцій для підтримки експлуатації водневих легкових автомобілів, таких як Toyota Mirai та Hyundai Nexo.

Результати:

- екологічний вплив: водневі автомобілі допомагають знизити викиди парникових газів та покращити якість повітря.

- стимулювання ринку: фінансові стимули та субсидії для покупців водневих автомобілів сприяють зростанню їхньої популярності.

- розвиток інфраструктури: активне будівництво водневих заправних станцій забезпечує зручний доступ до водню для автовласників.

Висновки. Використання водню в ДВЗ є перспективним напрямком у розвитку транспортних технологій, що сприяє зниженню екологічного навантаження та підвищенню енергетичної ефективності. Основні технічні рішення, такі як пряме впорскування водню, контрольоване запалювання, зниження температури згоряння, використання легких матеріалів та антикорозійних покриттів, а також удосконалення систем управління двигуном, відкривають шлях до створення потужних та надійних водневих ДВЗ.

Екологічні переваги водневих ДВЗ включають відсутність викидів CO₂, зниження викидів NO_x за допомогою EGR та каталітичних нейтралізаторів, а також зменшення викидів інших забруднювачів. Це сприяє покращенню якості повітря та здоров'я населення, особливо у міських районах. Крім того, виробництво водню з відновлюваних джерел енергії може забезпечити замкнений цикл використання ресурсів, що є ключовим для сталого розвитку.

Технічні інновації, такі як турбонаддув, суперчарджинг, інтеграція з гібридними системами та рекуперация енергії, відкривають нові можливості для підвищення продуктивності та ефективності водневих ДВЗ. Ці рішення дозволяють водневим ДВЗ конкурувати з традиційними двигунами, пропонуючи екологічно чисту альтернативу без компромісів у потужності та ефективності.

Водневі технології у транспортних ДВЗ мають потенціал стати важливою частиною екологічно сталого майбутнього. Інтеграція передових технічних рішень та екологічних ініціатив може сприяти розвитку транспорту, який буде не лише ефективним, але й відповідальним до навколишнього середовища.

Список літератури

1. Gomes Antunes J.M, Mikalsen R., Roskilly A.P. An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. Vol. 34, Issue 15, P. 6516-6522.
2. Szwaja S, Grab-Rogalinski K. Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2009. Volume 34, Issue 10. Pages 4413-4421 doi: 10.1016/2009.03.020.
3. Shalapko, D. An experimental study of the wave effect in fuel equipment using hydrogen additives to diesel fuel. *Technology audit and production reserves*. 2018. № 6/1 (44). С. 36–40.
4. Шалапко, Д.О. Дослідження ефектів хвильових коливань в паливній апаратурі дизельного двигуна із застосуванням водневих добавок *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2021. № 3 (486). С. 40-47.
5. Jayarabakar, J., Arunkumar, T., Rangasamy, G., Parthipan, J., Anish, M., Varshini, G., & Kumar, B. K. (2024). Prospectus of hydrogen enrichment in internal combustion engines: Methodological insights on its production, injection, properties, performance and emissions. *Fuel*, 363, Article 131034. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131034>
6. Zhuang, S., Wu, P., Li, W., Xuan, T., He, Z., Wang, Q., Xu, Q., & Zhang, L. (2024). An experimental study on in-cylinder soot formation and flame oscillation of renewable fuel blends in an optical engine. *Fuel*, 369, Article 131801. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131801>
7. Шалапко, Д.О. Непрямі методи дослідження ефекту використання малих домішок водню до основного палива. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2018. № 6 (150). С. 44–51.
8. Shalapko D. 'Optical-graphic studies of hydrogen additives' effects on diesel fuel atomization parameters', *Transport Problems*. 2023. No 18(4), pp. 135–146. doi:10.20858/tp.2023.18.4.11.

9. Shalapko D. et al. Advanced fuel system with gaseous hydrogen additives. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. 2024. No 72(2), pp. 148837–148837. doi:10.24425/bpasts.2024.148837.
10. Shalapko D.O. ‘Investigation of the influence of the use of small hydrogen impurities to the main fuel on injection spraying. *Collection of Scientific Publications NUS*. 2021. No4. pp. 14–19. doi:10.15589/znp2021.4(487).3.

References

1. Gomes Antunes, J. M., Mikalsen, R. & Roskilly, A. P. (2009). An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(15), 6516-6522.
2. Szwaja, S., & Grab-Rogalinski, K. (2009). Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(10), 4421-4428. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.03.020>
3. Shalapko, D. (2018). An experimental study of the wave effect in fuel equipment using hydrogen additives to diesel fuel. *Technology Audit and Production Reserves*, 6(1), 36–40.
4. Shalapko, D. O. (2021). Doslidzhennia efektyv khvyly'ovykh kolyvan' v palyvnyj aparaturi dyzel'noho dvyhuna iz zastosuvanniam vodnevnykh dobavok [Investigation of wave oscillation effects in the fuel equipment of a diesel engine using hydrogen additives]. *Zbirnyk naukovykh prats' Natsional'noho universytetu korablebuduvannia imeni admiral'a Makarova - Collection of Scientific Works of the National University of Shipbuilding Named after Admiral Makarov*, 3(486), 40-47 [in Ukrainian].
5. Jayaprabakar, J., Arunkumar, T., Rangasamy, G., Parthipan, J., Anish, M., Varshini, G., & Kumar, B. K. (2024). Prospectus of hydrogen enrichment in internal combustion engines: Methodological insights on its production, injection, properties, performance and emissions. *Fuel*, 363, Article 131034. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131034>
6. Zhuang, S., Wu, P., Li, W., Xuan, T., He, Z., Wang, Q., Xu, Q., & Zhang, L. (2024). An experimental study on in-cylinder soot formation and flame oscillation of renewable fuel blends in an optical engine. *Fuel*, 369, Article 131801. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131801>
7. Shalapko, D. O. (2018). Nepriami metody doslidzhennia efektu vykorystannia malykh domishok vodniu do osnovnoho palyva [Indirect methods for investigating the effect of using small hydrogen admixtures to the base fuel]. *Avyatsyonno-kosmycheskaia tekhnika y tekhnolohiya - Aviation and Space Technology and Technology*, 6(150), 44–51 [in Ukrainian].
8. Shalapko, D. (2023). Optical-graphic studies of hydrogen additives’ effects on diesel fuel atomization parameters. *Transport Problems*, 18(4), 135–146. <https://doi.org/10.20858/tp.2023.18.4.11>
9. Shalapko, D., et al. (2024). Advanced fuel system with gaseous hydrogen additives. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 72(2), Article 148837. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.148837>
10. Shalapko, D. O. (2021). Investigation of the influence of the use of small hydrogen impurities to the main fuel on injection spraying. *Collection of Scientific Publications NUS*, (4), 14–19. [https://doi.org/10.15589/znp2021.4\(487\).3](https://doi.org/10.15589/znp2021.4(487).3)

Olexandr Kukhareno, student, **Denys Shalapko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine

Lyudmila Tarandushka, Prof., DSc.

Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

Hydrogen internal combustion engines in transport: enhancing efficiency and overcoming infrastructure challenges

This article delves into the promising realm of hydrogen technologies in the transportation sector, highlighting their potential to significantly reduce harmful emissions and promote sustainable development. The discussion begins with a comprehensive review of current hydrogen internal combustion engine (ICE) technologies, examining the advancements that have been made and the technical solutions available to enhance the efficiency of these engines. It underscores the environmental benefits of hydrogen ICEs, such as the reduction of greenhouse gases and pollutants, and explores the economic advantages, including decreased dependency on fossil fuels and the creation of new job opportunities.

Furthermore, the article discusses the social benefits of adopting hydrogen technologies, such as improved public health and the potential for innovation-driven economic growth. It also addresses the significant infrastructural challenges associated with the production, storage, transportation, and distribution of hydrogen.

Potential solutions to these challenges are proposed, including investments in new technologies, expansion of production capacities, and the development of specialized infrastructure.

The article provides detailed case studies of successful hydrogen technology implementations in various countries. In Japan, hydrogen-powered buses in Tokyo demonstrate the environmental and technological advancements achieved. Germany's hydrogen trains by Alstom illustrate the transition from diesel to hydrogen in public transportation, showcasing economic and ecological benefits. South Korea's hydrogen taxis in Seoul highlight the social impact and infrastructural development necessary for widespread adoption. Lastly, California's extensive network of hydrogen fueling stations supports the growing number of hydrogen cars, reflecting a successful model of public-private partnership and government incentives.

Through these case studies, the article emphasizes the transformative potential of hydrogen technologies in creating a sustainable and clean future for transportation. It calls for continued investments in technology, infrastructure, and collaboration between governments and the private sector to overcome existing challenges and fully realize the benefits of hydrogen as a key energy source in the transportation sector.

hydrogen technologies, transportation sector, hydrogen internal combustion engines, fuel cells, engine efficiency

Одержано (Received) 15.04.2024

Прорецензовано (Reviewed) 13.05.2024

Прийнято до друку (Approved) 26.06.2024

УДК 519.86:656

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).2.174-181](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).2.174-181)

К.М. Березька, доц., канд. техн. наук, **О.С. Шевчук**, доц., канд. техн. наук, **Н.М. Фалович**, доц., канд. екон. наук

Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна

e-mail: k.berezka@wuni.edu.ua, oksana_shevchuk84@ukr.net, n.falovych@gmail.com

Ю. Р. Бубняк, асп.

Тернопільський національний педагогічний університет ім. В. Гнатюка, Тернопіль, Україна, e-mail: Yra6511@gmail.com

Аналіз проблем і математичних методів для їх вирішення в транспортній логістиці

У статті розглядається важливість транспорту для економічного розвитку країни в глобалізованому світі. Транспорт є основою ланцюгів постачання, забезпечуючи ефективне переміщення товарів, матеріалів та людей, що сприяє глобальній торгівлі, економічному зростанню, культурному обміну та соціальній інтеграції. Ефективність транспортних технологій є ключовим фактором успішної логістики, де важливу роль відіграють математичні методи. Метою статті є аналіз сучасних проблем у транспортній логістиці та застосування математичних методів для їх вирішення. Розглядаються такі проблеми: оптимізація маршрутів, моделювання ланцюга постачання, прогнозування попиту, впровадження інновацій у транспортні технології, ефективне складування та інвентаризація. Застосування методів лінійного та динамічного програмування, симуляційного моделювання, евристичних методів, генетичних алгоритмів та методів машинного навчання є ключовими для підвищення продуктивності та оптимізації логістичних процесів.

математичні методи, транспортна логістика, транспортні технології, прогнозування попиту, ланцюг постачання, оптимізація маршрутів, інновації в транспортних технологіях

Постановка проблеми. В глобальному світі транспорт є невід'ємною частиною економічного розвитку країни [1]. Транспорт є основою для функціонування ланцюжків