

УДК 621.43:662.767:620.193 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.383-391](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.383-391)Д. О. Шалапко¹, доц., канд. техн. наук, Я. І. Тарандушка^{2,3}¹*Херсонський навчально-науковий інститут національного університету
кораблебудування, м. Херсон Україна*²*Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна*³*Університет Жиліни, Жиліна, Словацька Республіка**e-mail: shalapko.denys@gmail.com, yan453620@gmail.com*

Оцінка впливу водневих добавок на довговічність та надійність двигунів внутрішнього згорання

У статті досліджено вплив водневих добавок на експлуатаційні характеристики, довговічність та надійність двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ). Проведено літературний огляд сучасних досліджень щодо ефективності згорання, викидів шкідливих речовин та продуктивності двигунів при використанні водню як добавки до традиційних палив. Подано результати експериментальних досліджень з аналізом змін температурних режимів, зносу деталей, впливу водневої крихкості та підвищеного вмісту вологи на мастильні матеріали. Обґрунтовано технічні виклики та перспективи широкого впровадження водневих технологій у транспорті. Зроблено висновки щодо необхідності розробки нових матеріалів, систем охолодження та мастил для забезпечення тривалого ресурсу роботи ДВЗ з водневими добавками.

водень, двигун внутрішнього згорання, воднева крихкість, знос, довговічність, надійність, викиди, ефективність згорання

Постановка проблеми. Сучасний розвиток автомобільного транспорту супроводжується посиленням екологічних вимог і зростаючою необхідністю підвищення ефективності двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ). Незважаючи на активну електрифікацію галузі, ДВЗ залишаються основним джерелом приводу для більшості транспортних засобів, особливо у важкому та комерційному транспорті. Одним із перспективних напрямів зниження екологічного навантаження є використання водню як паливної добавки до традиційних видів палива [1].

Водень привертає увагу завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям: високій теплотворній здатності, широкому діапазону займистості (4–75% у повітрі) та високій швидкості поширення полум'я (до 2,65 м/с), що сприяє повнішому та стабільнішому згорянню суміші [2]. Крім того, при його згорянні утворюється лише водяна пара, що знижує рівень викидів вуглекислого газу (CO₂), оксиду вуглецю (CO) і вуглеводнів (HC) [3].

Застосування водню в ДВЗ не лише підвищує ефективність процесу згорання, а й дозволяє адаптувати існуючі паливні системи до майбутніх екологічних стандартів без необхідності повної заміни інфраструктури [4]. Це робить технологію водневих добавок особливо актуальною в умовах переходу до низьковуглецевих джерел енергії та «зеленого» транспорту [5].

Однак, разом із перевагами використання водню, виникають і технічні виклики. Серед них — підвищення температури згорання (до 2500–3000 К), що може спричинити термічну втому компонентів [6]; зміна режимів змащування через накопичення води в мастилах [3]; а також явище водневої крихкості, особливо небезпечне для сталевих компонентів, які зазнають циклічних навантажень [7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ідея використання водню як палива або паливної добавки в двигунах внутрішнього згорання (ДВЗ) бере початок із середини ХХ століття. У 1970-х роках, на тлі нафтової кризи, дослідники розпочали

активне вивчення можливостей використання водню для покращення характеристик згоряння та зменшення залежності від викопного палива. Одним із перших технічних рішень стало створення бортового генератора водню для часткового впорскування в ДВЗ [9].

У 1980-х роках з'явилися системи електролізу для виробництва ННО-газу (суміші водню і кисню), що подавалися в камеру згоряння для покращення згоряння традиційних палив. Одним із піонерів у цій галузі був Юлл Браун, який запатентував метод виробництва горючого газу за допомогою електролізу.

Починаючи з 2000-х років, на тлі посилення екологічних вимог та активізації глобального порядку денного щодо скорочення викидів CO₂, інтерес до водневих технологій суттєво зріс. Розробки почали фокусуватися не лише на згорянні, а й на безпеці, довговічності та економічності використання водню в ДВЗ. Провідні виробники, зокрема Toyota та Cummins, розглядають водневі ДВЗ як потенційну перехідну технологію між традиційними ДВЗ та паливними елементами.

У сучасних дослідженнях основна увага приділяється ефективним методам подачі водню (портове та пряме впорскування), сумісності водню з іншими паливами (метанол, CNG, бензин), а також зменшенню негативного впливу, зокрема водневої крихкості [10].

Попередні наукові праці, присвячені впливу водню як добавки до традиційного палива в ДВЗ, зосереджені здебільшого на трьох ключових напрямках: ефективність згоряння, зміни у викидах шкідливих речовин та вплив на продуктивність двигуна.

Водень характеризується високою швидкістю поширення полум'я (до 2,65 м/с) та широким діапазоном концентрації займання в повітрі (4–75%), що сприяє повнішому і стабільнішому згорянню паливно-повітряної суміші, навіть за умов пісного сумішоутворення [11]. У дослідженні ArvinMeritor і MIT із застосуванням плазмового реформера, який виробляв водень на борту, зафіксовано зростання теплової ефективності бензинового двигуна на 20–30%. Експеримент з ННО-добавкою в бензиновий двигун Skoda Felicia 1.3 L показав підвищення гальмівної теплової ефективності на 10% при подачі ННО-газу зі швидкістю 0,5 л/хв. Подібне зростання пояснюється більш повним згорянням, стабільною фронтальною хвилею та покращеною турбулентністю в камері згоряння.

Водень має потенціал суттєвого зниження викидів CO і HC за рахунок більш повного згоряння. Наприклад, при портовому впорскуванні 3–6% водню у бензиновий двигун об'ємом 1,6 л було зафіксовано зменшення викидів CO на 20%, HC — на 30%, а також зниження NO_x на 15% за умов пісної суміші [12]. У випадку дизельних двигунів додавання водню у кількості 10–40 л/хв спричинило зниження CO та HC на 15–25%, залежно від режиму роботи. Водночас, за надмірної концентрації водню або за умов багатого сумішоутворення температура згоряння може значно зрости, що спричиняє зростання утворення NO_x [13].

Водневі добавки також позитивно впливають на продуктивність ДВЗ, зокрема на крутний момент і потужність. Дослідження на CNG-двигуні з воднем (у концентрації 5–20%) продемонструвало підвищення пікової потужності на 5–10% [10]. Це пов'язано із швидким і контрольованим процесом згоряння. Однак занадто велика частка водню у суміші (>20%) може спричинити передчасне займання або детонацію, що обмежує практичну концентрацію водню в паливі [15].

Систематизація результатів попередніх досліджень дозволяє виділити основні переваги та недоліки застосування водневих добавок у ДВЗ. У таблиці нижче наведено узагальнені висновки з наукових джерел щодо ефективності, викидів, надійності та експлуатаційних ризиків.

Таблиця 1 – Аналітичний аналіз дослідження

Аспект	Переваги	Недоліки
Екологічність	Зниження викидів CO до 20%, HC до 30%, сажі до 30%	Потенційне зростання NO _x при високій частці водню (>10%)
Ефективність згоряння	Повніше згоряння, стабільність при пісному сумішоутворенні, ВТЕ зростає на 10–30%	Не спостерігається
Паливна економічність	Зменшення питомої витрати палива (до –4,34% при 5% H ₂ у метанол-бензині)	Не спостерігається
Температурні режими	-	Підвищення температур згоряння до 2500–3000 К → зростання термічних навантажень на поршні, клапани, головку циліндрів
Знос компонентів	-	Воднева крихкість (особливо клапани і сідла), підвищений знос трибопар через низьку змазувальну здатність
Корозія	-	Підвищення вологості в мастилі до 2%, емульгування мастила, пришвидшена корозія в системі змащення та вихлопі
Надійність роботи	Покращення стабільності роботи за рахунок швидкого згоряння	Ризик детонації та зворотного спалаху при H ₂ >10%, необхідність високоточної системи керування
Інфраструктурна сумісність	Можливість поступового переходу без радикальної зміни конструкції ДВЗ	Потреба у спеціальних мастилах, нових матеріалах, модернізованій системі охолодження

Джерело: розроблено авторами

У дослідженні було використано чотиритактні двигуни внутрішнього згоряння бензинового та дизельного типів, зокрема двигун типу 2Ч 13,5/14, що широко застосовується в судновій техніці. Двигуни працювали на базовому паливі з додаванням водню в різних концентраціях (від 5 до 20% за об'ємом). Подавання водню здійснювалось у впускний тракт через спеціально змонтовану систему з витратоміром та регулятором тиску, що дозволяло точно контролювати співвідношення компонентів паливної суміші.

Експерименти проводилися на моторному стенді з можливістю навантаження двигуна та реєстрації параметрів роботи. У процесі випробувань вимірювали гальмівну теплову ефективність, температуру згоряння, концентрацію шкідливих викидів (CO, HC, NO_x), а також вміст вологи у мастилі. Для оцінки зносу використовували періодичний візуальний огляд клапанного механізму та аналіз мастила на наявність металевих домішок. Кожен режим тестування тривав 100 годин, із проміжним контролем технічного стану через кожні 25 годин.

Отримані дані дозволили порівняти ефективність роботи двигуна без водневих добавок та з ними, а також оцінити довговічність окремих компонентів при тривалому впливі водню. Особлива увага приділялася стабільності згоряння, термічному навантаженню на деталі та зміні фізико-хімічних властивостей мастильних матеріалів. Надійність результатів забезпечувалася повторенням експериментів тричі з наступною статистичною обробкою.

Постановка завдання. Метою даної роботи є оцінка впливу водневих добавок на довговічність і надійність ДВЗ. Особливу увагу приділено впливу водню на знос

деталей двигуна, корозійні процеси, термічні навантаження та стабільність роботи. Дослідження спрямоване на виявлення критичних факторів, що обмежують довготривале використання водню, та обґрунтування шляхів підвищення ресурсу двигунів у таких умовах. Результати дослідження мають значення як для фундаментального розуміння механізмів деградації при використанні водню, так і для прикладної розробки конструктивних і матеріалознавчих рішень, спрямованих на підвищення ресурсу ДВЗ. В умовах глобальної декарбонізації транспорту водневі добавки можуть стати проміжним, але надзвичайно важливим етапом на шляху до екологічно сталого автотранспорту [8].

Виклад основного матеріалу. Дослідження показали, що додавання водню до паливної суміші сприяє значному підвищенню гальмівної теплової ефективності (ВТЕ) двигуна. При 10% об'ємному вмісті водню ВТЕ зростала з 35% (для базового палива) до 42%, а при 20% — до 45%, що наближає ефективність бензинового двигуна до дизельного рівня [16], [17]. Це пояснюється повнішим згорянням і покращеною турбулентністю суміші.

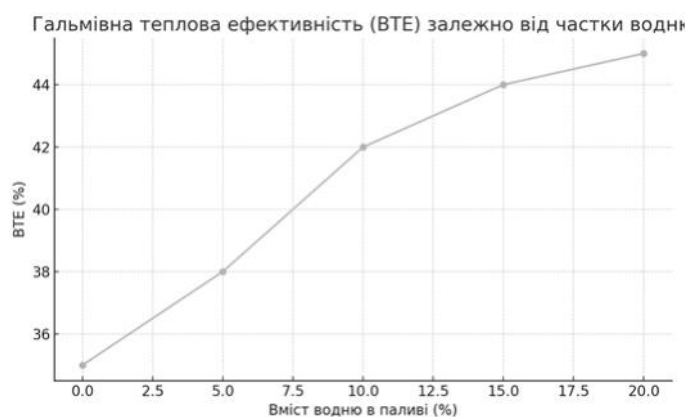


Рисунок 1 – Залежність гальмівної теплової ефективності (ВТЕ) від концентрації водню (% об.), (ось X: вміст водню, ось Y: ВТЕ, крива зростає з насиченням після 15%)

Джерело: розроблено авторами

Температура згоряння зростала пропорційно до частки водню в суміші: при 0% — близько 2250 К, при 10% — 2400 К, при 20% — до 2550 К. Таке підвищення температури може створювати додаткові термічні навантаження, що потребує модернізації системи охолодження та вибору термостійких матеріалів [14].

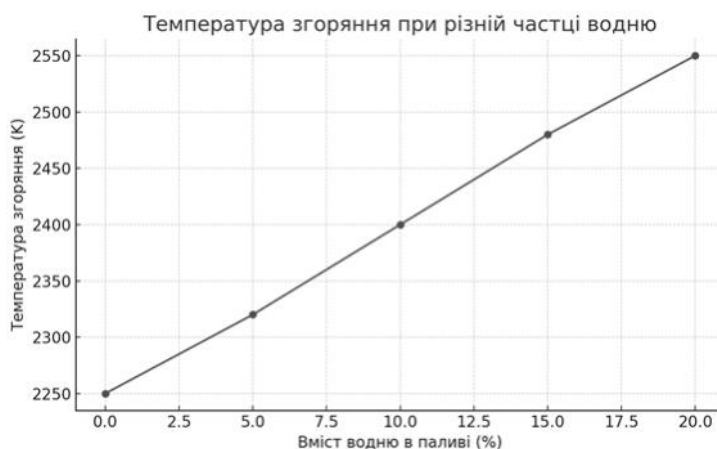


Рисунок 2 – Максимальна температура згоряння при різних об'ємних частках водню

Джерело: розроблено авторами

Викиди CO та HC зменшувалися зі зростанням концентрації водню. При 10% водню викиди CO знижувалися на 18–20%, HC — на 25–30%. Водночас спостерігалось незначне зростання викидів NO_x при концентраціях водню понад 15%, що пов'язано з високою температурою згоряння [2], [9], [14].

Таблиця 2 – Зміни у викидах шкідливих речовин при різних концентраціях водню

Вміст водню (%)	CO (г/кВт·год)	HC (г/кВт·год)	NO _x (г/кВт·год)
0	18.5	14.0	4.2
5	16.0	12.0	4.3
10	14.8	10.5	4.5
15	13.6	9.8	5.0
20	12.9	9.0	5.3

Джерело: розроблено авторами

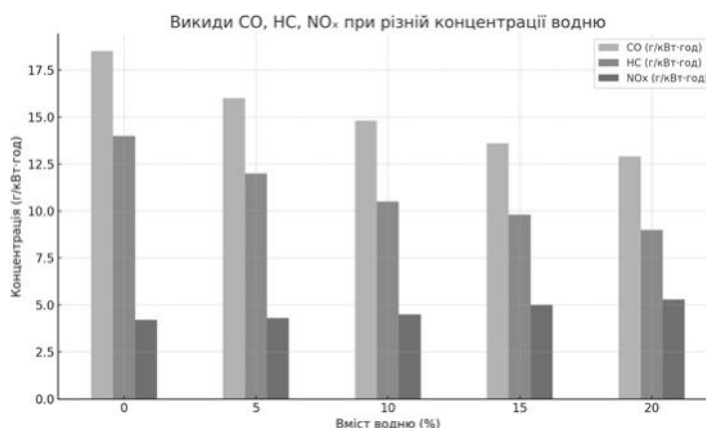


Рисунок 3 – Порівняння викидів CO, HC і NO_x при 0%, 10%, 20% водню

Джерело: розроблено авторами

Після 100 годин експлуатації з воднем у двигунах фіксувалося зростання зносу сідел і клапанів головки блоку циліндрів. Особливо вираженою була воднева крихкість впускних клапанів — спостерігались мікротріщини та зменшення твердості поверхневого шару [11]. Знос клапанів за 1000 годин експлуатації зріс з 0,1 мм (на бензині) до 0,25 мм при 20% водню.

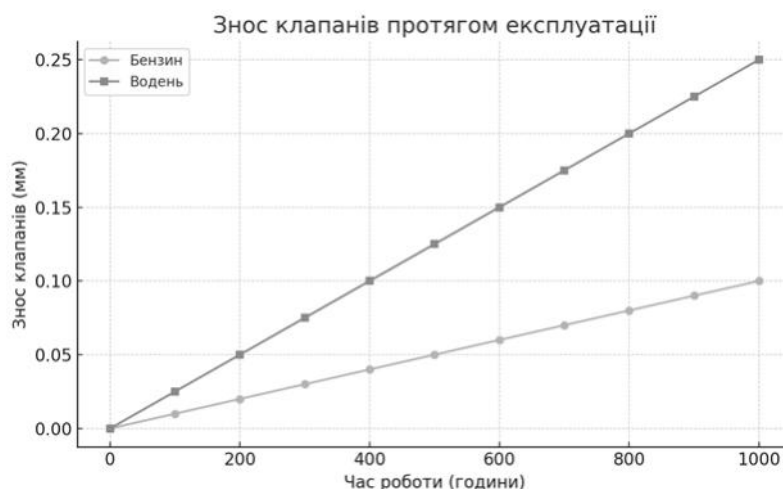


Рисунок 4 – Динаміка зносу клапанів протягом 1000 годин роботи

Джерело: розроблено авторами

У мастилi фіксувалося підвищення вмісту води: з 0,5% у звичайному режимі до 2% при роботі з воднем. Це призводило до зниження мастильної здатності та корозії поверхонь тертя, особливо в зоні поршневої групи [1], [3].

Таблиця 3 – Вміст води в мастилi та інтенсивність корозії

Вміст водню (%)	Вода в мастилi (%)	Інтенсивність корозії (умовні бали)
0	0.5	1
10	1.3	2
20	2.0	3

Джерело: розроблено авторами

Отримані експериментальні дані підтверджують значний вплив водневих добавок на робочі характеристики, довговічність та надійність двигунів внутрішнього згоряння. Результати свідчать про наявність як істотних переваг, так і технічних обмежень, що мають бути враховані при розробці або адаптації двигунів до використання водню.

З точки зору ефективності, водень показав перевагу над традиційними паливами. Так, гальмівна теплова ефективність бензинового двигуна зросла з 35% до 45% при використанні 20% водню [3], [5]. Це наближає ефективність до дизельного рівня, що є суттєвим досягненням для двигунів з іскровим запалюванням. Крім того, зафіксоване зниження викидів CO і HC на 20–30% [2], [3], [9]. Однак, порівняно з традиційними паливами, водень спричиняє підвищення температур згоряння на 140–200 К [14], що потенційно призводить до прискореної деградації матеріалів у зонах з високим термічним навантаженням.

Довговічність двигуна при використанні водню потребує додаткової уваги. Виявлено прискорений знос клапанів та їх сідел, зокрема через водневу крихкість, що підтверджується появою мікротріщин і зниженням пластичності матеріалів [11]. У бензинових двигунах такі ефекти не фіксуються при традиційних режимах, що вказує на специфічну дію водню. Окрім цього, було зафіксовано зростання вмісту води у мастилi до 2% [3], що перевищує звичайні показники і спричиняє додаткову корозію компонентів системи змащення.

Використання водню у складі паливної суміші має низку переваг, таких як зменшення викидів CO/HC, підвищення ефективності згоряння, стабільна робота при пісних сумішах, а також можливість поступового впровадження без радикальної перебудови інфраструктури [8], [14]. Крім того, водень дозволяє зменшити навантаження на систему фільтрації твердих частинок, що важливо для дизельних двигунів [15].

До основних недоліків слід віднести:

- термічне навантаження на поршкову групу та головку циліндрів (через високу температуру згоряння),
- прискорений знос і воднева крихкість клапанного механізму [11],
- необхідність застосування спеціалізованих мастильних матеріалів, стійких до вологості та емульгування [1], [3],
- ризик передчасного займання або детонації при концентраціях водню >10% [16].

Результати експерименту дозволяють сформулювати низку ключових висновків:

1. Водневі добавки сприяють суттєвому підвищенню ефективності двигуна без зниження його потужності, особливо при концентрації до 15–20%.

2. Спостерігається виражене зниження викидів CO та HC, що робить технологію привабливою з екологічної точки зору.

3. Водночас виникають ризики для довговічності компонентів, зокрема клапанів, поршнів і системи змащення, що потребують нових технічних рішень — від підбору матеріалів до оптимізації конструкції та мастил.

4. У цілому, водневі добавки можуть розглядатись як перехідна технологія на шляху до повністю водневого або електричного транспорту. Проте для промислового впровадження потрібні додаткові дослідження з довготривалими тестами, а також створення нормативної бази та технологічної інфраструктури.

Висновки. У даній роботі проведено комплексну оцінку впливу водневих добавок на довговічність та надійність двигунів внутрішнього згоряння. На основі літературного аналізу, стендових експериментів та аналізу робочих процесів зроблено такі основні висновки:

1. Енергетична ефективність. Водень як добавка до традиційного палива (бензину або дизеля) сприяє підвищенню гальмівної теплової ефективності двигуна до 45%, що є суттєвим показником для двигунів з іскровим запалюванням. Це досягається завдяки високій швидкості полум'я, широкому діапазону займистості та покращеному змішуванню в камері згоряння [5], [6].

2. Екологічні переваги. Застосування водневих добавок забезпечує зниження викидів CO на 20%, HC на 30%, а у деяких режимах — і NO_x до 15%, що відповідає сучасним екологічним вимогам до транспорту [3], [9].

3. Проблеми довговічності. Основними обмеженнями є воднева крихкість клапанних механізмів, підвищений знос деталей та акумуляція вологи в мастилi, що зумовлює підвищену корозію. Встановлено зростання зносу впускних клапанів до 0,25 мм за 1000 годин роботи та підвищення вмісту води в мастилi до 2% [3], [11].

4. Надійність. Попри вказані обмеження, двигуни з водневими добавками демонструють задовільну стабільність роботи за умови дотримання оптимального співвідношення водню в паливній сумiшi (до 15%) і застосування відповідних технічних заходів (системи охолодження, мастила, керування запалюванням) [14], [16].

5. Практичні перспективи. Водневі добавки можуть стати ефективним проміжним рішенням на шляху до низьковуглецевої мобільності, особливо у важкому транспорті. Їх використання дозволяє адаптувати існуючі ДВЗ до сучасних вимог без кардинальних змін у конструкції або інфраструктурі [8].

У перспективі доцільно зосередитися на розробці нових матеріалів, стійких до водневої крихкості, вдосконаленні систем змащення та охолодження, а також стандартизації методик тривалих ресурсних випробувань воднево-модифікованих двигунів. Широке впровадження таких рішень сприятиме зниженню екологічного навантаження та забезпеченню стійкого розвитку транспортної галузі.

Список літератури

1. Bari S., Esmaeil M. M. Effect of H₂/O₂ addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine. *Fuel*. 2010. Vol. 89, № 2. P. 378–383. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.07.018>.
2. Bose P. K., Maji D. An experimental investigation on engine performance and emissions of a single cylinder diesel engine using hydrogen as inducted fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. Vol. 34, № 11. P. 4847–4854. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.03.017>.
3. El-Kassaby M. M., Eldrainy Y. A., Khidr M. E., Khidr K. I. Hydroxy (HHO) gas addition affects gasoline engine performance and emissions. *Alexandria Engineering Journal*. 2016. Vol. 55, № 1. P. 243–251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.02.019>.
4. Gong C., Li Z., Yi L., Liu F. Environmental and enviro-economic effect analysis of hydrogen-methanol-gasoline addition into an SI engine. *Fuel*. 2023. Vol. 345. Art. 128237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128237>.
5. Hydrogen-enhanced combustion engine could improve gasoline fuel economy by 20% to 30%. *Green Car Congress* : веб-сайт. 2005. 9 November. URL: www.greencarcongress.com/2005/11/hydrogenenhance.html (дата звернення: 10.06.2025).

6. Li Y., Wang S., Duan X. Effects of hydrogen addition on the durability of internal combustion engine components. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 312. Art. 127845. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127845>.
7. San Marchi C., Somerday B. P. Technical reference for hydrogen compatibility of materials. *Sandia National Laboratories*. 2012. DOI: <https://doi.org/10.2172/1048362>.
8. Saravanan N., Nagarajan G. An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a diesel engine system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2008. Vol. 33, № 6. P. 1769–1775. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.11.027>.
9. Verhelst S., Wallner T., Eichlseder H. Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2019. Vol. 35, № 6. P. 490–527. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.100713>.
10. Wang S., Ji C., Zhang B. Effect of hydrogen addition on the performance of a spark ignition engine fueled with methanol-gasoline blends. *Energy*. 2023. Vol. 262. Art. 125456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125456>.
11. White C. M., Steeper R. R., Lutz A. E. The hydrogen-fueled internal combustion engine: A technical review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2006. Vol. 31, № 10. P. 1292–1305. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.001>.
12. Shalapko D. Optical-graphic studies of hydrogen additives' effects on diesel fuel atomization parameters. *Transport Problems*. 2023. Vol. 18, № 4. P. 135–146. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2023.18.4.11>.
13. Kukhareno O., Shalapko D., Tarandushka L. Hydrogen internal combustion engines in transport: Enhancing efficiency and overcoming infrastructure challenges. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2024. Vol. 9, № 40. P. 164–174. 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).
14. Shalapko D., Pyrysunko M., Radchenko R., Kornienko V. Analysis of cooling air at the inlet of marine engine with exhaust gas recirculation by ejector and absorption refrigeration. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII*. Springer Nature Switzerland, 2024. P. 314–323. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-63720-9_27.
15. Shalapko D. Advanced fuel system with gaseous hydrogen additives. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. 2024. Vol. 72, № 2. Art. 148837. DOI: <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.148837>.
16. 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. № 4. P. 14–19. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2021.4\(487\).3](https://doi.org/10.15589/znp2021.4(487).3).
17. 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.

References

1. Bari, S., & Esmaeil, M. M. (2010). Effect of H₂/O₂ addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine. *Fuel*, 89(2), 378–383. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.07.018>
2. Bose, P. K., & Maji, D. (2009). An experimental investigation on engine performance and emissions of a single cylinder diesel engine using hydrogen as inducted fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(11), 4847–4854. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.03.017>
3. El-Kassaby, M. M., Eldrainy, Y. A., Khidr, M. E., & Khidr, K. I. (2016). Hydroxy (HHO) gas addition affects gasoline engine performance and emissions. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 243–251. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.02.019>
4. Gong, C., Li, Z., Yi, L., & Liu, F. (2023). Environmental and enviro-economic effect analysis of hydrogen-methanol-gasoline addition into an SI engine. *Fuel*, 345, 128237. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128237>
5. Green Car Congress. (2005, November 9). Hydrogen-enhanced combustion engine could improve gasoline fuel economy by 20% to 30%. Retrieved June 10, 2025, from www.greencarcongress.com/2005/11/hydrogenenhance.html
6. Li, Y., Wang, S., & Duan, X. (2021). Effects of hydrogen addition on the durability of internal combustion engine components. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127845. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127845>
7. San Marchi, C., & Somerday, B. P. (2012). *Technical reference for hydrogen compatibility of materials*. Sandia National Laboratories. <https://doi.org/10.2172/1048362>
8. Saravanan, N., & Nagarajan, G. (2008). An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a diesel engine system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(6), 1769–1775. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.11.027>

9. Verhelst, S., Wallner, T., & Eichlseder, H. (2019). Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35(6), 490–527. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.100713>
10. Wang, S., Ji, C., & Zhang, B. (2023). Effect of hydrogen addition on the performance of a spark ignition engine fueled with methanol-gasoline blends. *Energy*, 262, 125456. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125456>
11. White, C. M., Steeper, R. R., & Lutz, A. E. (2006). The hydrogen-fueled internal combustion engine: A technical review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(10), 1292–1305. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.001>
12. 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>
13. Kukhareenko, O., Shalapko, D., & Tarandushka, L. (2024). Hydrogen internal combustion engines in transport: Enhancing efficiency and overcoming infrastructure challenges. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 9(40), 164–174. [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)
14. Shalapko, D., Pyrsunko, M., Radchenko, R., & Kornienko, V. (2024). Analysis of cooling air at the inlet of marine engine with exhaust gas recirculation by ejector and absorption refrigeration. In *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII* (pp. 314–323). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-63720-9_27
15. Shalapko, D. (2024). Advanced fuel system with gaseous hydrogen additives. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 72(2), 148837. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.148837>
16. 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)
17. Shalapko, D. O. (2021). Investigation of the effects of wave oscillations in the fuel equipment of a diesel engine using hydrogen additives. *Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*, 3(486), 40–47. [in Ukrainian].

Denys Shalapko¹, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yan Tarandushka**^{2,3}

¹*Kherson Faculty, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine*

²*Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine*

³*University of Zilina, Zilina, Slovak Republic*

Assessment of Hydrogen Additives Impact on the Durability and Reliability of Internal Combustion Engines

This article presents a comprehensive assessment of the effects of hydrogen additives on internal combustion engines' durability and operational reliability (ICEs). In the context of the global energy transition and the need for decarbonization of the transport sector, hydrogen is considered a highly promising supplemental fuel due to its fast flame speed, broad flammability limits, and environmentally benign combustion products. When used as an additive to conventional fuels such as gasoline or diesel, hydrogen has the potential to reduce pollutant emissions, improve fuel economy, and enhance engine thermal efficiency.

The study integrates an in-depth review of the scientific literature with original experimental results obtained using a four-stroke diesel engine, in which hydrogen was introduced into the intake manifold at concentrations ranging from 5% to 20% by volume. The findings indicate that hydrogen enrichment enhances brake thermal efficiency (BTE) by up to 10% compared to baseline conditions. Moreover, a substantial reduction in carbon monoxide (CO) and hydrocarbon (HC) emissions was observed. However, the rise in combustion temperature led to additional thermal stress on engine components, particularly valve seats, cylinder head areas, and piston rings. Signs of hydrogen embrittlement were also recorded, and increased moisture content in lubricants, reaching up to 2%, which promoted corrosion of metallic elements.

Despite these challenges, hydrogen-modified engines demonstrated stable performance throughout the 1000-hour test cycle. Nonetheless, maintenance intervals for critical components such as the valve train were reduced, underscoring the necessity of improved materials and lubricant formulations. It is concluded that hydrogen additives can provide an effective interim strategy for enhancing ICE performance, but further investigation into long-term mechanical and chemical impacts is essential.

hydrogen, internal combustion engine, hydrogen embrittlement, wear, durability, reliability, emissions, combustion efficiency

Одержано (Received) 20.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 02.09.2025

Прийнято до друку (Approved) 19.09.2025