

УДК 621.43.05:629.5

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2026.2\(505\).13](https://doi.org/10.15589/znп2026.2(505).13)

INFLUENCE OF HYDROGEN ADDITIVES TO DIESEL FUEL ON THE ENVIRO-ENERGETIC PERFORMANCE OF A MARINE DIESEL ENGINE UNDER VARIABLE OPERATING CONDITIONS

ВПЛИВ ВОДНЕВИХ ДОБАВОК ДО ОСНОВНОГО ПАЛИВА НА ЕКОЛОГО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ СУДНОВОГО ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА В ЗМІННИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Denys O. Shalapko

ORCID: 0000-0002-4311-3908

Shalapko.denys@gmail.com

Nataliia B. Andrieieva

ORCID: 0009-0007-8427-3207

nataliia.andrieieva@nuos.edu.ua

Oleh I. Solomyentsev

ORCID: 0000-0002-5106-6486

oleh.solomentsev@nuos.edu.ua

Д. О. Шалапко,

доцент, канд. техн. наук

Н. Б. Андрєєва,

канд. пед. наук, доц.

О. І. Соломенцев,

докт. техн. наук, проф.

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

Анотація. Сучасні вимоги Міжнародної морської організації (ІМО) до енергоефективності та екологічної безпеки морського транспорту зумовлюють потребу в пошуку рішень, які дозволяють підвищити паливну економічність і знизити токсичність відпрацьованих газів існуючих судових дизельних двигунів без радикальної зміни їх конструкції. Особливо гостро проблема збереження ефективності постає в тропічних умовах експлуатації, де підвищені температури охолоджувальної води та впускного (наддувного) повітря призводять до погіршення наповнення циліндрів, зростання теплових навантажень і погіршення екологічних показників. У роботі виконано аналітичне узагальнення відомих експериментальних даних із літератури та власних досліджень авторів щодо використання малих домішок водню до дизельного палива в судових і транспортних дизельних двигунах. Запропоновано нормований підхід до аналізу енергетичних, екологічних та індикаторних показників у відносних координатах, побудовано узагальнені залежності відносної зміни ефективної питомої витрати палива, димності, викидів СО і НС, максимального тиску в циліндрі та жорсткості згоряння від частки Н₂ за енергією для помірних і тропічних умов. Показано, що в діапазоні малих часток Н₂ (приблизно 2–3 % за енергією) водневе підживлення здатне частково компенсувати втрати ефективності, зумовлені підвищеними температурами охолодження та наддуву, і знизити димність та викиди СО/НС до рівнів, близьких до дизельної роботи в помірному кліматі. Водночас відзначено зростання максимального тиску й жорсткості згоряння, що обмежує допустимий діапазон часток Н₂ і вимагає оптимізації параметрів упорскування та контролю теплового стану судової енергетичної установки.

Ключові слова: судовий дизельний двигун; водень; мале водневе підживлення; тропічні умови експлуатації; паливна економічність; токсичність відпрацьованих газів; індикаторні параметри; максимальний тиск.

Abstract. The current requirements of the International Maritime Organization for the energy efficiency and environmental performance of shipping are driving the development of solutions that enhance fuel economy and reduce exhaust emissions from existing marine diesel engines without necessitating radical changes to their design. The problem becomes especially critical under tropical operating conditions, where elevated temperatures of cooling water and intake (boosted) air lead to deterioration of cylinder charging, an increase in thermal loads, and degradation of environmental indicators. This paper presents an analytical generalization of experimental data from the literature and the author's own studies on the use of small hydrogen additives to diesel fuel for marine and transport diesel engines. A normalized approach to the analysis of energetic, environmental, and indicator parameters in relative coordinates is proposed; generalized dependences are constructed for the relative changes in brake specific fuel consumption, smoke opacity, CO and HC emissions, maximum in-cylinder pressure, and combustion harshness as functions of the hydrogen share in the fuel energy for moderate and tropical conditions. It is shown that in the range of small hydrogen

shares (about 2–3 % by energy), hydrogen enrichment can partially compensate for the efficiency losses caused by increased cooling water and boost air temperatures and reduce smoke and CO/HC emissions down to levels close to those of conventional diesel operation in a moderate climate. At the same time, an increase in maximum pressure and combustion harshness is observed, which limits the permissible hydrogen fraction and requires optimization of injection parameters and careful control of the thermal state of the marine power plant.

Key words: marine diesel engine; hydrogen; small hydrogen enrichment; tropical operating conditions; fuel economy; exhaust emissions; indicator parameters; maximum cylinder pressure.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасна політика декарбонізації морського транспорту (документи ІМО, вимоги EEDI/EEEXI та CII) орієнтується на поетапне зниження питомих викидів CO_2 , NO_x , SO_x і твердих частинок, що для існуючого флоту зумовлює переважно модернізацію та оптимізацію суднових дизельних двигунів із використанням альтернативних палив і їх домішок, а не відмову від ДВЗ [1]. В тропічних акваторіях підвищені температури повітря й морської води ведуть до зростання температур охолоджувальної води та повітря наддуву, зниження густини заряду й надлишку повітря α , погіршення наповнення циліндрів і підвищення теплових напружень, що підтверджується польовими даними й числовим моделюванням у вигляді зростання питомої витрати палива, температур вихлопу, NO_x , димності та викидів незгорілих вуглеводнів, а також необхідності зниження навантаження чи посилення охолодження [2–4].

Одним із перспективних шляхів часткової компенсації цих негативних ефектів розглядається використання малих домішок водню до дизельного палива: завдяки високій швидкості поширення полум'я, широкому діапазону горючості та сприятливій стехіометрії водень інтенсифікує горіння, скорочує затримку займання, покращує повноту вигорання, знижує димність, CO та HC і в ряді режимів зменшує ефективну питому витрату палива, хоча водночас підвищує пікові тиски, температури та NO_x [5–7]. Більшість наявних досліджень виконано на автомобільних і стаціонарних дизелях у помірному кліматі; для морських ДД або аналізується вплив параметрів навколишнього середовища без водню, або розглядаються загальні H_2 -концепції без деталізації тропічних режимів [8], а українські роботи майже не враховують специфіку суднових двигунів у тропіках [9–11]. У результаті поєднання підвищених температур охолоджувальної води та впускного повітря з малими домішками водню до дизельного палива залишається малодослідженою багатофакторною задачею: відсутні обґрунтовані діапазони температур і часток H_2 , що забезпечують покращення чи хоча б збереження енергетичних та екологічних показників суднових дизелів за умов надійності й довговічності, а також рекомендації щодо адаптації систем охолодження, наддуву та паливopодачі; це й зумовлює потребу аналітичного дослідження впливу малих домішок водню в тропічних режимах роботи суднових двигунів [12–14].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Вплив параметрів навколишнього середовища та систем охолодження на роботу поршневих ДВЗ досліджено для автомобільних, стаціонарних і суднових дизелів. Показано, що підвищення температури впускного/наддувного повітря зменшує його густину, коефіцієнт наповнення й надлишок повітря, що призводить до падіння індикаторної та ефективної потужності або зростання ефективної питомої витрати палива за фіксованого навантаження [15, 16]. Паралельне підвищення температури охолоджувальної рідини зменшує температурний перепад «газ–стінка», знижує інтенсивність тепловідведення та підвищує стаціонарні температури в критичних зонах (днище поршня, камера згоряння, впускні клапани, верх циліндрових гільз), що зменшує запас міцності й прискорює термічні пошкодження; для морських дизелів показано, що перехід до тропічних умов ($\approx 35\text{--}45^\circ\text{C}$) погіршує паливну економічність, підвищує температуру вихлопу та рівні NO_x , змушуючи виробників обмежувати навантаження або посилювати охолодження [17, 18].

Окремий, стрімко зростаючий напрям стосується використання водню як палива або компонента паливної суміші. У численних оглядах і експериментальних роботах проаналізовано застосування H_2 як основного палива в двигунах із запалюванням від іскри та у двопаливних (dual-fuel) системах із дизельним паливом і природним газом [19]. Для дизельних двигунів показано, що введення малих домішок H_2 (порядку одиниць % за енергією) у впускний тракт або через паливну апаратуру змінює структуру згоряння: скорочується затримка займання, фаза основного тепловиділення зміщується до менших кутів, зростає швидкість наростання тиску, покращується повнота згоряння й, відповідно, знижуються димність, CO та HC, особливо на часткових навантаженнях [20]. Водночас унаслідок інтенсифікації згоряння підвищуються максимальний тиск і температура в камері згоряння та з'являється тенденція до зростання NO_x без коригування фаз упорскування, EGR чи додаткового охолодження наддувного повітря [21, 22].

Власні дослідження авторів й українських наукових шкіл підтверджують ці тенденції, доповнюючи їх у частині хвильових процесів у паливopоводах високого тиску, впливу H_2 на миттєвий тиск перед форсункою й якість розпилу, а також оптико-цифрових

характеристик факела (зменшення середнього розміру крапель, звуження струменя, зменшення грубодисперсної фракції), що потенційно знижує сажотворення [23]. На прикладі суднових енергетичних установок показано можливість інтеграції водневих присадок без радикальної зміни конструкції двигуна при потенційному покращенні економічності та екологічних показників [24].

Однак більшість наведених робіт має обмеження щодо предмета цієї статті. Переважна частина експериментів виконана на автомобільних і стаціонарних дизелях у помірному кліматі; морські двигуни розглядаються здебільшого або без залучення водню, або в рамках загальних концепцій H_2 -енергетики без детального аналізу тропічних умов [25, 26]. Практично відсутні системні оцінки того, як малі домішки водню впливають на індикаторні параметри, економічність, викиди та теплові навантаження суднових дизелів саме при комбінованій дії підвищених температур охолоджувальної води/впускного повітря й інтенсифікованого згоряння з воднем. Це й зумовлює необхідність подальших цілеспрямованих досліджень, орієнтованих на суднові дизельні двигуни в тропічних режимах із використанням малих домішок H_2 як потенційного засобу часткової компенсації негативного впливу кліматичних факторів.

МЕТА, ЗАВДАННЯ, ОБ'ЄКТ, ПРЕДМЕТ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета роботи – аналітично оцінити та узагальнити експериментальні дані щодо впливу малих домішок водню до дизельного палива на енергетичні (ефективний ККД, g_e , ІМЕР, p_{max}) екологічні (димність, NO_x , CO , HC) показники суднового дизельного двигуна за підвищених температур охолоджувальної води та впускного повітря, характерних для тропічних умов. Для цього передбачено: дослідити дію підвищених температур охолодження та наддуву на базовий дизельний режим; оцінити зміну параметрів циклу, питомої витрати палива й токсичності ВГ при введенні малих домішок H_2 за помірних і «тропічних» температур; визначити діапазони температур і часток водню, за яких водневе підживлення покращує економічність та екологічні показники без надмірного зростання p_{max} і жорсткості згоряння; сформулювати рекомендації щодо налаштувань систем охолодження, наддуву та подачі H_2 для суднових дизелів. Об'єкт дослідження – судновий дизельний двигун на випробувальному стенді з регулюванням температур охолоджувальної води та впускного повітря; предмет – зміна його енергетичних та екологічних показників при введенні малих домішок водню за різних температурних умов. Методика базується на серії випробувань за матрицею режимів (кілька рівнів навантаження, помірні й «тропічні» температури, робота без H_2 та з малою часткою H_2), з вимірюванням потужності, витрати палива, індикаторних діаграм, димності

й складу ВГ та подальшим аналізом у відносних координатах відносно базового дизельного режиму.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Узагальнення експериментальних і розрахункових даних свідчить, що підвищення температур охолоджувальної води та впускного (наддувного) повітря до рівнів, характерних для тропічних акваторій, помітно погіршує енергетичні й екологічні показники суднових дизелів без водневих домішок [27, 28]. Зростання температури повітря зменшує його густину, коефіцієнт наповнення та надлишок повітря (α), унаслідок чого ІМЕР та ефективна потужність падають, а спроби «утримати» потужність за рахунок збільшення подачі палива неминуче ведуть до зростання питомої витрати та токсичності. Індикаторні діаграми вказують: хоча вища початкова температура заряду скорочує затримку займання, на фоні зменшеного (α) розтягується дифузійна фаза згоряння, подовжується високотемпературний інтервал і підвищується теплове навантаження на елементи камери згоряння [21–23]. Додаткове підвищення температури охолоджувальної води зменшує перепад температур між газами та стінками, знижує ефективність тепловідведення, підвищує середні температури у критичних зонах (днище поршня, камера згоряння, випускні клапани, верх гільз) і змушує виробників обмежувати тривалу роботу за високих температур охолоджувального контуру [29]. У підсумку закономірно зростають ефективна питома витрата палива, димність, рівні NO_x та незгорілих вуглеводнів – формується «негативний фон», на якому оцінюється потенціал водневого підживлення.

За помірних температур охолодження та впуску (близьких до номінальних) введення малих домішок водню до дизельного палива в більшості робіт показує протилежну тенденцію: покращення енергетичних та екологічних характеристик [9–11]. Індикаторні діаграми двопаливних режимів демонструють скорочення затримки займання, зміщення CA_{10} та CA_{50} у бік менших кутів і зростання пікової швидкості тепловиділення; за коректного коригування фаз упорскування це зміщує основну масу тепловиділення в термодинамічно вигіднішу область і підвищує індикаторний ККД [14–16]. Найвиразніший ефект спостерігається на часткових навантаженнях, де базовий дизельний режим має підвищену димність та викиди CO і HC [18]. За рахунок відсутності вуглецю у водні, його високої реакційної здатності та дифузійності, а також покращення структури факела (менший середній розмір крапель, менша грубодисперсна фракція), димність і концентрації CO/HC помітно знижуються [3]. Натомість поведінка NO_x залишається компромісною: посилення горіння й підвищення пікових температур без оптимізації кутів упорскування та EGR часто веде до приросту NO_x , тоді як за дуже малих часток H_2 можливе локальне їх зниження [10].

Коли ці два фактори поєднуються – тропічні температури та малі домішки водню – накладаються протилежно спрямовані ефекти. Підвищені температури скорочують затримку займання й частково зміщують тепловиділення до ранніх кутів, але одночасно погіршують наповнення й зменшують (α) [25]. Додавання H_2 ще більше інтенсифікує згоряння, підвищуючи швидкість поширення полум'я та пікову швидкість тепловиділення, що дозволяє частково «відіграти» втрати ККД, але підсилює теплові та механічні навантаження [10, 19]. У межах малих «оптимальних» часток H_2 , визначених для помірного клімату, в тропіках картина залишається якісно подібною, проте кількісно жорсткішою: через уже підвищений температурний рівень деталей і гірше наповнення застосування тих самих часток водню часто призводить до небажаного росту ($p_{\max}$ жорсткості згоряння, тому допустимий діапазон комбінацій «температура – частка H_2 » звужується [21–23]. Порівняння режимів показує, що в тропіках водневе підживлення здатне знизити ефективну питому витрату палива, димність та викиди CO/HC відносно базового тропічного дизельного режиму без H_2 і в окремих випадках наблизити їх до рівня помірного дизеля [13–16], але за умови, що приріст ($p_{\max}$) показника жорсткості згоряння залишається в межах, сумісних із вимогами надійності. Саме ці «компромісні» області режимів є найбільш перспективними для подальшої експериментальної перевірки та практичної реалізації з обов'язковою адаптацією систем охолодження, наддуву й керування згорянням.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Отримані (та узагальнені за даними літератури) результати показують, що мале водневе підживлення в діапазоні близько 2–4 % H_2 за енергією може розглядатися як дієвий інструмент підвищення ефективності суднових дизельних двигунів, які експлуатуються в тропічних умовах. Якщо для помірних температур ($t_w \approx 70^\circ\text{C}$, $t_{a.in} \approx 25^\circ\text{C}$) характерне

зниження ефективної питомої витрати палива g_e на порядку 3–5 % і скорочення димності на 20–40 % при домішці H_2 , то в тропічних умовах ($t_w \approx 85\text{--}90^\circ\text{C}$, $t_{a.in} \approx 40\text{--}45^\circ\text{C}$) водневе підживлення, за узагальненими оцінками, дозволяє частково компенсувати 2–4 % з тих 5–8 % втрат ККД, що виникають тільки через підвищення температур охолоджувальної води та впускного повітря [25]. Інакше кажучи, якщо перехід до тропіків без водню збільшує g_e умовно на +5–8 %, то введення 2–3 % H_2 здатне зменшити цей приріст до рівня близько +1–3 % відносно помірних умов.

Слід зазначити, що наведені на рис. 5, 6 залежності мають характер узагальнених розрахунково-аналітичних трендів. Вони отримані шляхом нормування та апроксимації відомих експериментальних даних з літератури [1–4, 9–16] і власних досліджень авторів, а також їхньої подальшої інтерполяції у діапазоні малих часток H_2 (до 4 % за енергією). Зазначені криві не належать до одного конкретного двигуна, а відображають типову зміну енергетичних, екологічних та індикаторних показників суднових дизельних двигунів при введенні малих домішок водню в помірних і тропічних умовах експлуатації.

На рис. 1 подано узагальнені залежності відносної зміни основних показників роботи двигуна від частки водню за енергією (ξ_{H_2}) у діапазоні 0–4 %: по осі абсцис відкладається (ξ_{H_2}), %, по осі ординат – відносна зміна показників, (ΔX), %.

Для помірних умов (номінальні температури охолоджувальної води та повітря наддуву) крива (Δg_e) є монотонно спадною: при ($\xi_{H_2} = 0$) маємо базовий дизельний режим ($\Delta g_e = 0$), при 1–2 % H_2 відносне зниження ефективної питомої витрати палива становить орієнтовно 1,5–3 %, а при 3–4 % H_2 – до 4–5 %. Криві (Δ димн.) та ($\Delta(\text{CO} + \text{HC})$) спадають ще різкіше: приблизно –25 % димності й –20 % CO + HC на рівні 2 % H_2 та до –35...–40 % димності і –30...–35 % CO+HC при 3–4 %, що відображає класичний

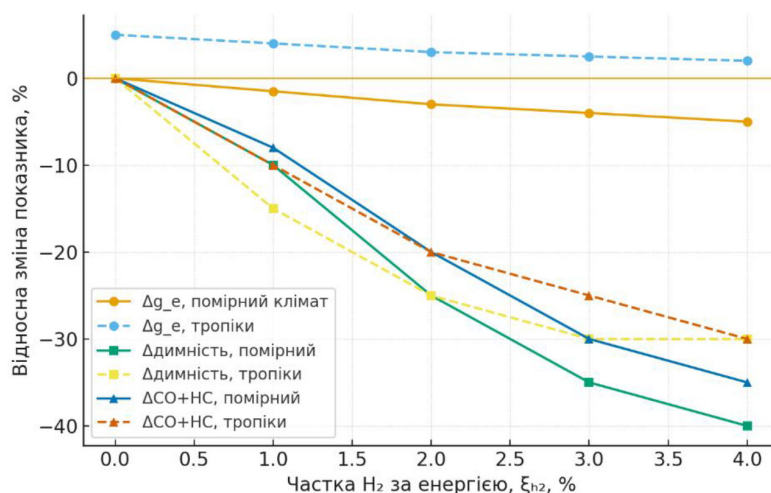


Рис. 1. Вплив добавки водню на паливну економічність та викиди для помірних і тропічних умов

«позитивний» ефект водневого підживлення за відсутності обмежень наповнення.

Для тропічних умов на кривій (Δg_e) враховано, що вже при ($\xi_{H_2} = 0$) (без водню) має місце погіршення економічності приблизно на +5 % відносно помірного клімату (точка 0; +5). Зі збільшенням (ξ_{H_2}) до 2–3 % цей «штраф» зменшується до близько +3...+2,5 %, а при 4 % H_2 – орієнтовно до +2 %, тобто водень частково компенсує втрати економічності, але повністю їх не усуває. Криві (Δ димн.) та ($\Delta(CO + HC)$) для тропіків стартують з 0 % (базовий тропічний дизель) і при 2 % H_2 показують орієнтовно –25 % димності та –20 % $CO + HC$, а при 3–4 % – близько –30 % димності та –25...–30 % $CO + HC$ відносно тропічного режиму без підживлення, що свідчить про суттєве покращення екологічних характеристик навіть у несприятливих температурних умовах.

Зіставлення пар кривих для помірних і тропічних умов показує, що за димністю та викидами CO/HC тропічний режим з часткою ($\xi_{H_2} \approx 2-3$) виходить орієнтовно на рівень помірного дизеля без водню (а інколи й трохи краще), тоді як за (g_e) тропіки з H_2 залишаються дещо гіршими, але відставання скорочується з ≈ 5 до $\approx 2-3$ %. Отже, рис. 1 фактично фіксує зміну ролі водню: у помірному кліматі він виступає переважно як засіб додаткового підвищення економічності та зниження токсичності, тоді як у тропіках – як інструмент часткової компенсації впливу високих температур, що «повертає» (g_e), димність і CO/HC до прийнятного рівня. З графіків випливає, що спільно для обох кліматичних сценаріїв доцільно орієнтуватися на область ($\xi_{H_2} \approx 2-3$): подальше збільшення частки H_2 дає вже невеликий додатковий виграв за (g_e) та токсичністю, але, як видно з рис. 2, супроводжується помітним ростом індикаторних навантажень.

На рис. 2 показано залежність індикаторних навантажень від частки водню: (Δp_{max}), %

(відносна зміна максимального тиску в циліндрі) та ($\Delta(dp/df)_{max}$), % (зміна показника жорсткості згоряння). Для помірних умов (Δp_{max}) зростає до $\approx +1,5...3$ % при 1–2 % H_2 і до $+4...5$ % при 3–4 %, а ($\Delta(dp/df)_{max}$) – від 0 до $\approx +5...10$ % у зоні 1–2 % H_2 та до $\approx +13...15$ % за 3–4 %, що зазвичай залишається в межах конструктивно допустимого. У тропічних умовах ці прирости стають жорсткішими: (Δp_{max}) сягає близько +3 % вже при 1 % H_2 , +5 % при 2 % і $+6,5...7$ % при 3–4 %, тоді як ($\Delta(dp/df)_{max}$) зростає до $\approx +8$ % (1 % H_2), $\approx +14$ % (2 % H_2) та $\approx +18...20$ % при 3–4 %. Це підкреслює, що у тропіках верхню межу частки H_2 слід вибирати обережніше, орієнтуючись на баланс між економічним ефектом і ресурсом двигуна.

У тропічних умовах базовий тепловий фон двигуна вже підвищений: деталі камери згоряння, масляна плівка та елементи ГБЦ працюють ближче до граничних температур, тому додатковий приріст (p_{max}) на 5–7 % і жорсткості згоряння на 18–20 % може стати критичним для довговічності випускних клапанів, сидел, поршнів, гільз і головки. Порівняння даних рис. 1 і 2 показує, що за критеріями економічності та екології найдоцільніший діапазон ($\xi_{H_2} \approx 2-3\%$): саме тут досягається помітне зниження (g_e), димності й CO/HC при ще прийнятних приростах (p_{max}) та ($\Delta(dp/df)_{max}$). З боку міцності та ресурсу бажано, щоб приріст максимального тиску не перевищував приблизно 5 %, а показника жорсткості – 15 %, що й обмежує робочий діапазон водню в тропіках; тому рис. 2 фактично виконує роль «карти обмежень», наочно показуючи, що збільшення частки H_2 понад 3–4 % веде до неприйнятного росту індикаторних навантажень навіть без явної детонації. У сукупності рис. 1 і 2 дають змогу кількісно оцінити компроміс між вигралом в економічності/токсичності та зростанням навантажень і обґрунтувати

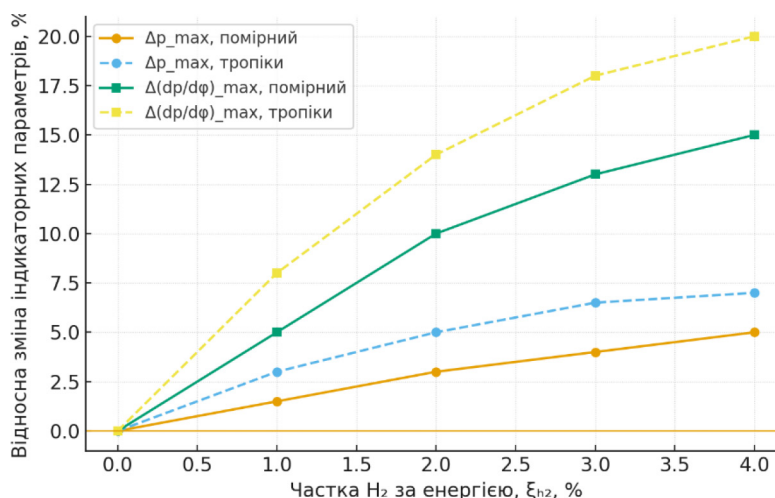


Рис. 2. Вплив водневої добавки на P_{max} та швидкості наростання тиску для помірних та тропічних умов

раціональний діапазон ($\xi_{H_2} \approx 2-3\%$) для тропіків, де (g_e), димність і СО/НС зменшуються відносно базового тропічного дизеля, а прирости $p_{\max}$ і $((dp/d\varphi)_{\max})$ залишаються у межах, прийнятних для суднового двигуна.

За екологічними показниками тропічний дизель без водню зазвичай демонструє збільшення димності на 15–30 % і СО/НС на 10–25 % порівняно з «прохолодними» умовами через зниження густини повітря та погіршення наповнення циліндрів [21–23]. Додавання 2–4 % H_2 за енергією, згідно з літературними й власними даними, дозволяє зменшити димність приблизно на 20–50 % і СО/НС на 15–40 % відносно базового тропічного режиму без H_2 , тобто фактично повернути ці показники до рівня помірного клімату [19]. Для NO_x ситуація складніша: перехід до тропічних температур без водню сам по собі додає близько 5–15 % до рівня NO_x [25], а введення 2–4 % H_2 , залежно від режиму й налаштування упорскування, або майже не змінює їх (0...+5 %), або підвищує ще на 5–10 % за відсутності корекції фаз чи EGR [27–29], тож економічний та димовий вигравш супроводжується збереженням «тропічного» рівня NO_x або його помірним зростанням. За індикаторними параметрами малі домішки H_2 (2–3 % за енергією) дають приріст $p_{\max}$ у середньому на 3–7 % і $(dp/d\varphi)_{\max}$ на 10–20 % щодо базового режиму [14, 19]; у помірному кліматі це вкладається в запас міцності, тоді як у тропіках, де температурний стан деталей уже близький до граничного, такі прирости суттєво обмежують верхню межу частки водню.

У підсумку мале водневе підживлення в тропічних умовах доцільно розглядати як компенсуючий інструмент у діапазоні 2–3 % H_2 за енергією: воно повертає 2–4 відсоткові пункти ефективності, зменшує димність та СО/НС на 20–40 %, утримуючи приріст ($p_{\max}$) у межах 3–5 %, а $((dp/d\varphi)_{\max})$ – до 15–20 %, за умови адаптації частки H_2 до навантаження й реальних температур, невеликого запізнення початку упорскування та розширеного моніторингу температурних режимів; остаточне підтвердження цих меж має бути отримане на стендових та експлуатаційних випробуваннях для конкретного двигуна.

ВИСНОВКИ

Підвищені температури охолоджувальної води та впускного повітря, характерні для тропічних умов експлуатації ($t_w \approx 85-90^\circ\text{C}$, $t_{a.in} \approx 40-45^\circ\text{C}$), призводять до зменшення коефіцієнта наповнення, погіршення паливної економічності (до 5 %) та збільшення димності суднового дизельного двигуна при роботі без водню, що підтверджується зміною індикаторних параметрів робочого циклу. Крім того, спостерігається зменшення ІМЕР і підвищення теплового навантаження елементів камери згоряння.

Введення малих домішок водню ($\xi_{H_2} \approx 2-3\%$) до дизельного палива за помірних температур охолодження та впуску забезпечує інтенсифікацію процесу згоряння, скорочення затримки займання, зниження ефективної питомої витрати палива на 2–5 %, та зменшення димності на 25–40 %, й викидів СО і НС на 20–35 %, при контрольованій зміні рівня NO_x .

У тропічних умовах експлуатації додавання малих водневих добавок частково компенсує негативний вплив підвищених температур охолоджувальної води та впускного повітря на енергетичні та екологічні показники суднового дизельного двигуна. Так «штраф» по експлуатаційній витраті палива, який без водню становить близько 5 %, зменшується до 2–3 %, а димність і викиди СО/НС скорочуються на 20–40 % у порівнянні з тропічним режимом роботи без водню й наближаються до показників помірного клімату. Викиди NO_x у цьому випадку, залежно від налаштувань параметрів впорскування палива й EGR (SCR), залишаються на рівні «тропічної бази» або зростають не більше ніж на 5–10 %.

У той же час додавання 2–3 % водню у тропіках супроводжується зростанням максимального тиску на 3–7 % і $(dp/d\varphi)_{\max}$ 15–20 % порівняно з тропічним режимом без водню, що обмежує верхню межу частки водню. Раціональним діапазоном для суднових дизелів у тропіках можна вважати обмеження у ($\xi_{H_2} = 2-3\%$). Отримані дані можуть слугувати основою для подальшої стендової та експлуатаційної валідації систем малого водневого підживлення на суднових енергетичних установках.

REFERENCES

- [1] Shalapko, D. (2018). An experimental study of the wave effect in fuel equipment using hydrogen additives to diesel fuel. *Technological Audit and Production Reserves*, 6(1), 36–41. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.152063>
- [2] Tkach, M. R., Tymoshevskyy, B. G., Shalapko, D. O., Proskurin, A. Yu., & Mitrophanov, O. M. (2018). Methods to improve the performance of diesel engines by adding hydrogen into the high-pressure line. *Shipbuilding & Marine Infrastructure*, 1(9), 87–91. <https://doi.org/10.15589/SMI.2018.01.12>
- [3] Shalapko, D. O. (2021). Investigation of the influence of the use of small hydrogen impurities to the main fuel on injection spraying. *Zbirnyk naukovykh prats NUK*, 4(487), 14–19. [https://doi.org/10.15589/znp2021.4\(487\).3](https://doi.org/10.15589/znp2021.4(487).3) [in Ukrainian].
- [4] Shalapko, D. O. (2021). Doslidzhennia efektyv khvylovykh kolyvan v palyvni apparatury dyzelnoho dvyhuna iz zastosuvanniam vodnevyykh dobavok [Investigation of the effects of wave oscillations in the fuel equipment of a diesel engine using hydrogen additives]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK*, 3(486), 40–47. [https://doi.org/10.15589/znp2021.3\(486\).6](https://doi.org/10.15589/znp2021.3(486).6) [in Ukrainian].
- [5] Shalapko, D. O. (2022). Pokrashchennia ekspluatatsiynykh pokaznykiv sudnovoi enerhetychnoi ustanovky tankera proiektu RST27 za rakhunok vykorystannia vodnevyykh prysadok [Improving operational performance of the power plant of tanker RST27 by using hydrogen additives].

- project RST27 by using hydrogen additives]. *Rozvytok transportu*, 1(12), 75–84. <https://doi.org/10.33082/td.2022.1-12.07> [in Ukrainian].
- [6] 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>
 - [7] Shalapko, D. O., & Tarandushka, Ya. I. (2025). Otsinka vplyvu vodneykh dobavok na dovhovichnist ta nadiinist dvyhunyv vnutrishnoho zghoriannia [Assessment of hydrogen additives impact on the durability and reliability of internal combustion engines]. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 1(12(43)), 383–391. [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) [in Ukrainian].
 - [8] Shalapko, D., Radchenko, M., Pavlenko, A., Radchenko, R., Radchenko, A., & Pyrysunko, M. (2024). Advanced fuel system with gaseous hydrogen additives. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 72(2). <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.148837>
 - [9] 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>
 - [10] Akal, D., Öztuna, S., & Büyükkakın, M. K. (2020). A review of hydrogen usage in internal combustion engines (gasoline–LPG–diesel) from combustion performance aspect. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(60), 35257–35268. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.001>
 - [11] Long Huynh, D. N., Nguyen, T. H., Nguyen, D. C., Vo, A. V., Nguyen, D. T., Nguyen, V. Q., & Le, H. C. (2024). Using hydrogen as potential fuel for internal combustion engines: A comprehensive assessment. *International Journal of Renewable Energy Development*, 14(1), 83–103. <https://doi.org/10.61435/ijred.2025.60707>
 - [12] Guo, H., Hosseini, V., Neill, W. S., Chippior, W. L., & Dumitrescu, C. E. (2011). An experimental study on the effect of hydrogen enrichment on diesel fueled HCCI combustion. *Journal of Hydrogen Energy*, 36(21), 13820–13830. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.07.143>
 - [13] Duraisamy, B., Varuvel, E. G., Palanichamy, S., Subramanian, B., Stanley, M. J., & Madheswaran, D. K. (2024). Impact of hydrogen addition on diesel engine performance, emissions, combustion, and vibration characteristics using a Prosopis Juliflora methyl ester–decanol blend as pilot fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 75, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.047>
 - [14] Saaïdia, R., Hamdi, F., Krotli, M., Bouabidi, A., Cuce, E., Kotten, H., & Miraoui, I. (2025). Performance and emission characteristics of hydrogen-enriched CNG in a dual fuel diesel engine: An experimental and numerical research. *Renewable Energy*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122387>
 - [15] Feng, Z., Zhang, J., Yang, K., Yang, Z., Jin, Y., Tian, X., Qi, H., & He, Z. (2025). Experimental study on the effect of micro-addition hydrogen on diesel ignition and combustion characteristics in an external heating constant volume combustion chamber. *Journal of Engine Research*. <https://doi.org/10.1177/14680874251385856>
 - [16] Ben Abdelwahed, S., Hamdi, F., Gassoumi, M., Yahya, I., Moussa, N., Alrasheedi, N. H., Ennetta, R., & Louhichi, B. (2025). Enhancing diesel engine performance through hydrogen addition. *Fire*, 8(5), 206. <https://doi.org/10.3390/fire8050206>
 - [17] Xu, Y., Cheng, S., Tu, Z., & Li, J. (2024). Effects of hydrogen addition in intake air on combustion and emission of diesel engines. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 46(1), 1831–1842. <https://doi.org/10.1080/15567036.2024.2303388>
 - [18] Qin, Z., Yang, Z., Jia, C., Duan, J., & Wang, L. (2020). Experimental study on combustion characteristics of diesel–hydrogen dual-fuel engine. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 142, 1483–1491. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-09147-y>
 - [19] Zhou, J. H., Cheung, C. S., Zhao, W. Z., & Leung, C. W. (2016). Diesel–hydrogen dual-fuel combustion and its impact on unregulated gaseous emissions and particulate emissions under different engine loads and engine speeds. *Energy*, 94, 110–123. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.105>
 - [20] Kukhareenko, O. O., Shalapko, D. O., & Tarandushka, L. A. (2025). Intehratsiia vodneykh tekhnolohii u transportni dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia: analiz vplyvu na efektyvnist ta ekolohichnist [Hydrogen internal combustion engines in transport: Enhancing efficiency and overcoming infrastructure challenges]. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 9(40), Part II, 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) [in Ukrainian].
 - [21] Teoh, Y. H., Huspi, H. A., How, H. G., Sher, F., Din, Z. U., Le, T. D., & Nguyen, H. T. (2021). Effect of intake air temperature and premixed ratio on combustion and exhaust emissions in a partial HCCI–DI diesel engine. *Sustainability*, 13(15), 8593. <https://doi.org/10.3390/su13158593>
 - [22] Waheb, J. (2015). Study on effect of heating inlet air temperature on emissions and performance of diesel engine. *Journal of Applied Sciences Research*, 11(5), 28–33. <https://www.researchgate.net/publication/303565149>
 - [23] Zhu, S., Feng, J., Tang, Y., Bai, S., & Deng, K. (2023). Influence of ambient conditions on the marine two-stroke engine integrated with a bottoming Rankine cycle system: Energy and exergy analyses. *Applied Thermal Engineering*, 219, 119601. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119601>
 - [24] Zhao, R., Xu, L., Su, X., Feng, S., Li, C., Tan, Q., & Wang, Z. (2020). A numerical and experimental study of marine hydrogen–natural gas–diesel tri-fuel engines. *Polish Maritime Research*, 27(4), 80–90. <https://doi.org/10.2478/pomr-2020-0068>
 - [25] Li, B., Zhao, Y., & Sun, P. (2006). The study on the influence of ambient condition on the performance of marine diesel engine. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/298244349>
 - [26] MAN Energy Solutions. (2023). Influence of ambient temperature conditions. Copenhagen, Denmark. Retrieved from <https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/5510-0074-03.pdf>

- [27] MAN Engines. (2023). MAN dual fuel marine engine: Sustainable hydrogen–diesel solution. MAN Truck & Bus SE. Retrieved from <https://media.man.eu/is/content/MAN/Marine-DualFuel-EN~1pdf>
- [28] BEH2YDRO. (2023). BEHydro 6DZD H2 dual-fuel hydrogen engine for marine propulsion: Product specification. Retrieved from <https://www.behydro.com/engines/6-dzd-h2>
- [29] Tymoshevskiy, B. H., & Tkach, M. R. (2024). Pidvyshchennia efektyvnosti sudnovykh dvyhuniiv, yaki pratsiuiut na vazhkomu palyvi, zbahachenomu vodnem [Increasing the efficiency of marine engines which operate on heavy hydrogen-enriched fuel]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu*, 1(104), 75–80. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.104.1.75> [in Ukrainian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Shalapko, D. (2018). An experimental study of the wave effect in fuel equipment using hydrogen additives to diesel fuel. *Technological Audit and Production Reserves*, 6(1), 36–41. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.152063>
- [2] Tkach, M. R., Tymoshevskyy, B. G., Shalapko, D. O., Proskurin, A. Yu., & Mitrophanov, O. M. (2018). Methods to improve the performance of diesel engines by adding hydrogen into the high-pressure line. *Shipbuilding & Marine Infrastructure*, 1(9), 87–91. <https://doi.org/10.15589/SMI.2018.01.12>
- [3] Shalapko, D. O. (2021). Investigation of the influence of the use of small hydrogen impurities to the main fuel on injection spraying. *Збірник наукових праць НУК*, 4(487), 14–19. [https://doi.org/10.15589/znp2021.4\(487\).3](https://doi.org/10.15589/znp2021.4(487).3)
- [4] Шалапко, Д. О. (2021). Дослідження ефектів хвильових коливань в паливній апаратурі дизельного двигуна із застосуванням водневих добавок *Збірник наукових праць НУК*, 3(486), 40–47. [https://doi.org/10.15589/znp2021.3\(486\).6](https://doi.org/10.15589/znp2021.3(486).6)
- [5] Шалапко, Д. О. (2022). Покращення експлуатаційних показників суднової енергетичної установки танкера проєкту RST27 за рахунок використання водневих присадок. *Розвиток транспорту*, 1(12), 75–84. <https://doi.org/10.33082/tid.2022.1-12.07>
- [6] 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>
- [7] Шалапко, Д. О., Тарандушка, Я. І. (2025). Оцінка впливу водневих добавок на довговічність та надійність двигунів внутрішнього згоряння. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*, 1(12(43)), 383–391. [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)
- [8] Shalapko, D., Radchenko, M., Pavlenko, A., Radchenko, R., Radchenko, A., & Pyrysunko, M. (2024). Advanced fuel system with gaseous hydrogen additives. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 72(2). <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.148837>
- [9] 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>
- [10] Akal, D., Öztuna, S., Büyükkakın, M. K. (2020). A review of hydrogen usage in internal combustion engines (gasoline-Lpg-diesel) from combustion performance aspect. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(60), 35257–35268. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.001>
- [11] Long Huynh, D. N., Nguyen, T. H., Nguyen, D. C., Vo, A. V., Nguyen, D. T., Nguyen, V. Q., & Le, H. C. (2024). Using hydrogen as potential fuel for internal combustion engines: A comprehensive assessment. *International Journal of Renewable Energy Development*, 14(1), 83–103. <https://doi.org/10.61435/ijred.2025.60707>
- [12] Guo, H., Hosseini, V., Neill, W. S., Chippior, W. L., & Dumitrescu, C. E. (2011). An experimental study on the effect of hydrogen enrichment on diesel fueled HCCI combustion. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(21), 13820–13830. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.07.143>
- [13] Duraisamy, B., Varuvel, E. G., Palanichamy, S., Subramanian, B., Stanley, M. J., & Madheswaran, D. K. (2024). Impact of hydrogen addition on diesel engine performance, emissions, combustion, and vibration characteristics using a Prosopis Juliflora methyl ester-decanol blend as pilot fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 75, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.047>
- [14] Saaidia, R., Hamdi, F., Krotli, M., Bouabidi, A., Cuce, E., Koten, H., & Miraoui, I. (2025). Performance and emission characteristics of hydrogen-enriched CNG in a dual fuel diesel engine: An experimental and numerical research. *Renewable Energy*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122387>
- [15] Feng, Z., Zhang, J., Yang, K., Yang, Z., Jin, Y., Tian, X., Qi, H., & He, Z. (2025). Experimental study on the effect of micro-addition hydrogen on diesel ignition and combustion characteristics in an external heating constant volume combustion chamber. *International Journal of Engine Research*. <https://doi.org/10.1177/14680874251385856>
- [16] Ben Abdelwahed, S., Hamdi, F., Gassoumi, M., Yahya, I., Moussa, N., Alrasheedi, N. H., Ennetta, R., & Louhichi, B. (2025). Enhancing Diesel Engine Performance Through Hydrogen Addition. *Fire*, 8(5), 206. <https://doi.org/10.3390/fire8050206>
- [17] Xu, Y., Cheng, S., Tu, Z., & Li, J. (2024). Effects of hydrogen addition in intake air on combustion and emission of diesel engines. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 46(1), 1831–1842. <https://doi.org/10.1080/15567036.2024.2303388>
- [18] Qin, Z., Yang, Z., Jia, C., Duan, J., & Wang, L. (2020). Experimental study on combustion characteristics of diesel–hydrogen dual-fuel engine. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 142, 1483–1491. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-09147-y>
- [19] Zhou, J. H., Cheunget, C. S., Zhao, W. Z., & Leung, C. W. (2016). Diesel–hydrogen dual-fuel combustion and its impact on unregulated gaseous emissions and particulate emissions under different engine loads and engine speeds. *Energy*, 94, 110–123. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.105>

- [20] Кухаренко, О. О., Шалапко, Д. О., Тарандушка, Л. А. (2025). Інтеграція водневих технологій у транспортні двигуни внутрішнього згоряння: аналіз впливу на ефективність та екологічність. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*, 9(40), ч. II, 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)
- [21] Teoh, Y. H., Huspi, H. A., How, H. G., Sher, F., Din, Z. U., Le, T. D., & Nguyen, H. T. (2021). Effect of Intake Air Temperature and Premixed Ratio on Combustion and Exhaust Emissions in a Partial HCCI-DI Diesel Engine. *Sustainability*, 13(15), Article 8593. <https://doi.org/10.3390/su13158593>
- [22] Waheb, J. (2015). Study on Effect of Heating Inlet Air Temperature on Emissions and Performance of Diesel Engine. *Journal of Applied Sciences Research*, 11(5), 28–33. <https://www.researchgate.net/publication/303565149>
- [23] Zhu, S., Feng, J., Tang, Y., Bai, S., & Deng, K. (2023). Influence of ambient conditions on the marine two-stroke engine integrated with a bottoming Rankine cycle system: Energy and exergy analyses. *Applied Thermal Engineering*, 219, Part B. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119601>
- [24] Zhao, R., Xu, L., Su, X., Feng, S., Li, C., Tan, Q., & Wang, Z. (2020). A numerical and experimental study of marine hydrogen–natural gas–diesel tri–fuel engines. *Polish Maritime Research*, 27(4), 80–90. <https://doi.org/10.2478/pomr-2020-0068>
- [25] Li, B., Zhao, Y., Sun, P. (2006). The study on the influence of ambient condition on the performance of marine diesel engine. <https://www.researchgate.net/publication/298244349>
- [26] MAN Energy Solutions (2023). *Influence of ambient temperature conditions*. Copenhagen SV, Denmark. https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/5510-0074-03.pdf?sfvrsn=fa9e1cee_6
- [27] MAN Engines. (2023). *MAN dual fuel marine engine. Sustainable hydrogen-diesel solution*. MAN Truck & Bus SE, Vogelweiherstrasse 33, 90441, Nürnberg, Germany. <https://media.man.eu/is/content/MAN/Marine-DualFuel-EN~1pdf>
- [28] BEH₂YDRO (2023). *BEHydro 6DZD H₂ dual-fuel hydrogen engine for marine propulsion: Product specification*. Wiedauwkaai 43, 9000, Gent, Belgium. <https://www.behydro.com/engines/6-dzd-h2>
- [29] Тимошевський, Б. Г., Ткач, М. Р. (2024). Підвищення ефективності суднових двигунів, які працюють на важкому паливі, збагаченому воднем. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*, 1(104), 75–80. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.104.1.75>

© Шалапко Д. О., Андрєєва Н. Б., Соломенцев О. І.

Дата першого надходження статті до видання: 08.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 03.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)