

**ВПЛИВ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ
ГОЛОВНОГО ДВИГУНА 9L48/60В ТАНКЕРА ВИКОРИСТАННЯ
ВОДНЕВИХ ДОБАВОК ДО ОСНОВНОГО ПАЛИВА**

Д.О. Шалапко¹, А.А. Андрєєв², М.А. Пирисунько³

¹к.т.н., доцент кафедри суднового машинобудування та енергетики,
Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4311-3908

²к.т.н., професор, завідувач кафедри суднового машинобудування та енергетики,
Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-1095-0398

³к.т.н., доцент кафедри суднового машинобудування та енергетики,
Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-3928-7112

Анотація

Вступ. На сьогодні розвиток двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) досяг таких значень ККД, що кожен наступний відсоток збільшення ефективності потребує значних зусиль та наукових результатів. Для суднових ДВЗ стає дедалі актуальніше використання утилізації вторинних енергоресурсів, альтернативних палив та паливних каталізаторів.

Мета. Провести моделювання модернізації паливної системи головного двигуна 9L48/60DB судна танкера з використанням водневих каталітичних добавок до основного палива для покращення експлуатаційних показників двигуна.

Результати. Для отримання позитивних результатів запропоновано використання системи подачі водневих добавок, що не перевищують 0,1% від циклової порції палива (за масою). Водень на судні можливо зберігати у вигляді металогідридного акумулятора, або в зрідженому стані. Виконано моделювання використання даної технології на двигуні MAN 9L48/60B. В результаті проведення розрахунків отримано зменшення питомої ефективної витрати палива двигуном на 1,5...3,5% залежно від режиму роботи двигуна, причому найбільші значення зменшення витрати палива досягається на часткових режимах роботи. Також варто відмітити збільшення потужності двигуна до 3% відповідно до експлуатаційного режиму роботи установки. При цьому ефект досягається за рахунок покращення сумішоутворення в двигуні. Використовуючи дану технологію, можна запобігти значному переобладнанню двигуна та паливної системи в цілому. При цьому отримання водню можливе як при бункеруванні судна, так і на режимах малого навантаження дизель-генераторів шляхом електролізу води. **Висновки.** Впровадження давнього науково-технічного рішення дозволить покращити експлуатаційні та економічні показники енергетичної установки судна танкера

з головним двигуном MAN 9L48/60B, збільшивши потужність та зменшивши витрату палива установкою. Проведення розрахунків по умовній рейсовій лінії протяжністю 5000 морських миль дозволяє говорити про економічний ефект в розмірі до 15...16 тис. у.о. за рейс з урахуванням витрат на водень.

Ключові слова: експлуатація СЕУ, двигун внутрішнього згоряння, водень, альтернативне паливо, металогідридний акумулятор.

INFLUENCE OF HYDROGEN ADDITIVES TO THE PRINCIPAL FUEL ON THE PERFORMANCE OF THE MAIN ENGINE OF THE 9L48/60B TANKER

D.O. Shalapko¹, A.A. Andreiev², M.A. Pyrysunko³

¹Ph.D. (Engineering), Associate Professor at the Department of Ship Engineering and Power Engineering,

Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-4311-3908

²Ph.D. (Engineering), Professor, Head of the Department of Ship Engineering and Power Engineering,

Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-1095-0398

³Ph.D. (Engineering), Associate Professor at the Department of Ship Engineering and Power Engineering,

Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-3928-7112

Summary

Introduction. To date, the development of internal combustion engines (ICE) has reached such values of efficiency that each subsequent percentage increase in efficiency requires significant efforts and scientific results. The utilization of secondary energy resources, alternative fuels and fuel catalysts is becoming more and more relevant for marine ICE.

Goal. To carry out modeling of the modernization of the fuel system of the main engine 9L48/60DB of the tanker vessel using hydrogen catalytic additives to the main fuel to improve the performance of the engine.

The results. In order to obtain positive results, it is proposed to use a system for supplying hydrogen additives, which do not exceed 0.1% of the cyclic portion of fuel (by mass). Hydrogen can be stored on board in the form of a metal hydride battery or in a liquid state. Simulation of the use of this technology on the MAN 9L48/60B engine was carried out. As a result of the calculations, a decrease in the specific effective fuel consumption of the engine by 1.5...3.5% was obtained, depending on the mode of operation of the engine, with the largest values of the reduction of fuel consumption being achieved in partial modes of operation. It is also worth noting the increase in engine power up to 3%, according to the operating mode of the installation. At the same time, the effect is achieved due to the improvement of mixture formation in the engine. Using this technology, it is possible to prevent a significant conversion of the engine and the fuel system as a whole. At the same time, obtaining hydrogen is possible both during ship bunkering and during low load modes of diesel generators by electrolysis of water.

Conclusions. *The implementation of an ancient scientific and technical solution will improve the operational and economic indicators of the energy installation of a tanker with a MAN 9L48/60B main engine, increasing the power and reducing the fuel consumption of the installation. Carrying out calculations along a conventional route with a length of 5,000 nautical miles allows us to talk about an economic effect in the amount of up to 15...16 thousand USD per trip including hydrogen costs.*

Key words: *ship power plant operation, internal combustion engine, hydrogen, alternative fuel, metal hydride battery.*

Вступ. Нафтові палива є невідновлюваним ресурсом, і, отже, є обмеженими. Прогнозована вичерпність нафтових запасів залежить від різних факторів, таких як технологічні зміни, витрати на розвідку та видобуток, а також споживання нафтових палив у світі.

Згідно з оцінками Міжнародної енергетичної агентства (МЕА), світові запаси нафти на початок 2021 року становили близько 1,7 трильйонів барелів. Проте швидкість видобутку нафти у світі продовжує зростати, а це може привести до того, що запаси будуть вичерпані у найближчі десятиліття.

З огляду на зростання світового населення та економіки попит на нафтові палива продовжує зростати. Тому уряди багатьох країн розвивають стратегії енергетичної безпеки, щоб забезпечити стале та безпечне забезпечення енергією. Ці стратегії включають розвиток альтернативних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія, а також використання енергоефективних технологій та енергозберігаючих заходів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тому вичерпність нафтових запасів є серйозною проблемою, яка потребує пошуку альтернативних джерел енергії та розробки нових технологій для забезпечення сталого та безпечного забезпечення енергією [1].

Передумови використання альтернативних палив у судових ДВЗР можуть бути різними і залежать від багатьох факторів [2]. Основні передумови можуть включати:

Екологічні вимоги: у зв'язку з ростом світового населення та збільшенням числа транспортних засобів, в тому числі і суден, зростає обсяг викидів забруднюючих речовин в атмосферу, що негативно впливає на довкілля. Використання альтернативних палив може зменшити викиди шкідливих речовин і сприяти збереженню довкілля.

Економічні фактори: залежно від ринкової кон'юнктури вартість різних видів палива може змінюватись. Використання альтернативних палив може бути вигіднішим з економічної точки зору в деяких обставинах, зокрема при зростанні цін на нафту.

Політичні фактори: деякі держави можуть сприяти використанню альтернативних палив, надаючи пільги чи знижуючи податки на такі види палива. Такі заходи можуть стимулювати розвиток виробництва та використання альтернативних палив.

Технологічні можливості: розвиток технологій дозволяє виробляти більш ефективні і екологічно чисті види альтернативних палив, що може стимулювати їх використання.

Соціальні фактори: зростаюча увага до екології та проблем забруднення навколишнього середовища може сприяти зростанню попиту на екологічно чисті види палива, в тому числі і для суден.

Існує багато альтернативних палив для двигунів, які можуть замінити нафтові палива та зменшити залежність від них. Ось кілька прикладів:

Біодизель: виготовляється з рослинної олії, такої як соя, рапс, пальмова олія, або відходів переробки жирів та олійних культур. Біодизель може використовуватися у дизельних двигунах без будь-яких модифікацій.

Етанол: виготовляється з різних джерел, таких як цукровий тростник, кукурудза та інші зернові культури. Етанол можна додавати до бензину у різних співвідношеннях.

Водень: може використовуватися як паливо для транспорту, особливо для великих транспортних засобів. При згорянні водень утворюється тільки вода, що робить його дуже чистим паливом [3].

Електрика: електромобілі стають все популярнішими, особливо з розвитком технологій батарей та зарядних станцій. Вони не потребують споживання нафти або інших палив, а їхні емісії є значно меншими порівняно з двигунами з внутрішнього згоряння.

Газ: природний газ, скраплений нафтовий газ та стиснутий природний газ можуть використовуватися як паливо для двигунів.

Біогаз: отримується з різних відходів, таких як органічні відходи, гноївка та інші відходи, які перероблюються в паливо.

Отже, існує багато альтернативних палив для двигунів, які можуть замінити нафтові палива та зменшити залежність від них.

Одним зі способів покращення експлуатаційних показників суднових двигунів виступають паливні добавки.

Паливні добавки для суднових двигунів можуть покращити якість палива та забезпечити більш ефективну роботу двигуна [4]. Ось кілька прикладів паливних добавок для суднових двигунів.

Додавання антифрикційних добавок: це може покращити мастильні властивості палива та захистити двигун від зношення. Такі добавки зменшують тертя між деталями двигуна та забезпечують більш тривалий термін експлуатації двигуна.

Додавання стабілізаторів: це може допомогти зберегти якість палива та запобігти його розкладу протягом тривалого зберігання. Такі добавки забезпечують стабільну якість палива під час його зберігання на судні.

Додавання антиоксидантів: це може допомогти запобігти розкладу палива від тепла та світла. Антиоксиданти допомагають зберігати якість палива та забезпечують більш тривалий термін його зберігання.

Додавання депозит-контролюючих добавок: це може допомогти запобігти утворенню накипу та інших відкладень у двигуні. Такі добавки забезпечують більш ефективну роботу двигуна та запобігають зменшенню його потужності [5].

Додавання антифрикційних добавок: це може покращити коефіцієнт тертя між деталями двигуна та забезпечити більш тривалий термін експлуатації двигуна. Антифрикційні добавки допомагають забезпечити більш ефективну роботу двигуна та зменшити зношення його деталей.

Ці паливні добавки можуть бути використані окремо або в комбінації одна з одною, залежно від необхідності [6].

Постановка проблеми. Якщо сумістити вищевказані пункти, серед альтернативних палив варто відзначити водень.

Використання водню в суднових двигунах є одним з можливих варіантів зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу та зменшення залежності від нафтових палив.

Основні переваги використання водню в суднових двигунах:

- 1) не викидає шкідливих речовин в атмосферу: водень при згорянні утворює водяну пару, тому його використання не викидає в атмосферу шкідливих газів, таких як вуглекислий газ та оксиди азоту;
- 2) екологічно чистий: водень відноситься до відновлюваних джерел енергії, тому його використання є екологічно чистим;
- 3) висока ефективність: водень має високу енергетичну щільність та може бути спалений з високою ефективністю, що дозволяє отримувати більше енергії з меншої кількості палива.

Однак використання водню в суднових ДВЗ також має свої виклики та обмеження:

- висока вартість: виробництво та зберігання водню потребують значних інвестицій та вартість водню є вищою в порівнянні з нафтовими паливами;
- складність зберігання: водень має дуже низьку густину та вимагає особливих умов зберігання та транспортування, що може бути складним та витратним;
- обмежена інфраструктура: інфраструктура для виробництва, зберігання та транспортування водню є обмеженою, що ускладнює його використання в суднових двигунах.

Виклад основного матеріалу. Проте водневі добавки можна використовувати в якості паливної домішки для покращення згоряння основного палива, що призводить до зменшення витрати палива та покращення експлуатаційних показників суднового двигуна, особливо на часткових та перехідних режимах.

Проведено дослідження використання водневих домішок до основного палива судна танкера ІМО: 9384447 (рис. 1) з двигуном MAN 9L48/60 [8].



а)

б)

Рис. 1. Загальний вигляд (а) судна та його машинне відділення (б)

Дане судно призначено для коротких переходів (3...5 тис. км) з транспортування нафтопродуктів. Розраховано експлуатаційний режим роботи двигуна з використанням добавки водню до основного палива в розмірі 0,1% за масою, тиском подачі водню 7 МПа.

Спираючись на уточнені розрахунки характеристик згоряння палива та враховуючи показники тепловиділення двигуна за уточненою математичною моделлю, отримано залежності витрати палива даного двигуна при використанні малих домішок водню. За рахунок подрібнення крапель розпиленого палива, при вивільненні молекулярного водню відбувається покращення сумішоутворення, а отже, збільшується повнота згоряння палива. Це призводить до зменшення питомої ефективної витрати палива на 3...5% залежно від режиму роботи та кількості додаваного водню.

Водночас, як показано на рис. 3, відбувається збільшення ефективної потужності двигуна. Для двигуна 9L48/60 (рис. 2) отримано значення ефективної потужності 10950 кВт, що більше на 1,5% від базового варіанту.

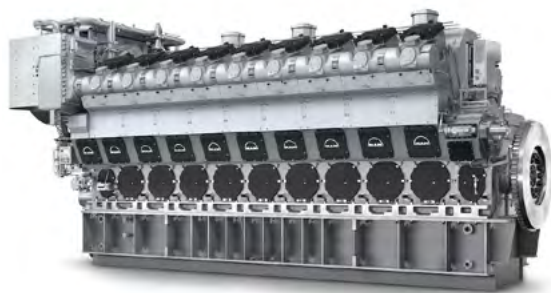


Рис. 2. Загальний вигляд двигуна 9L48/60

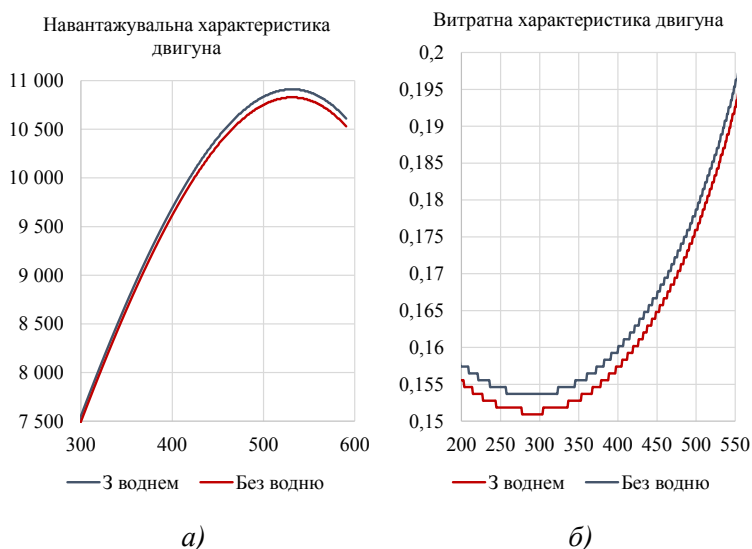


Рис. 3. Ефективні показники роботи двигуна 6L20 при зміні кількості домішки водню

Значення питомої ефективної витрати палива на номінальній частоті обертання 514 хв⁻¹ складають 0,177 кг/(кВт · год), що на 3 г менше ніж номінальна витрата палива на даному режимі. Зменшення питомої ефективної витрати палива складають 1,5...4% залежно від режиму роботи двигуна, з тенденцією до збільшення на часткових та перехідних режимах роботи двигуна (рис. 3).

Дані значення актуальні при коригуванні кута випередження впорскування в бік зменшення та сталих значеннях інших налаштувань роботи двигуна.

Висновки. Головний двигун 9L48/60B судна проекту 214 судноверфі «Factorias Vulcan» працює на дизельному паливі за стандартом ISO 8217, категорія ISO-F-DMB, і використовує 1,74 т/годину або 41,7 т палива на добу при 0,85 Ne. При вартості цього палива станом на 07.03.23 900 доларів США за тону щоденна вартість палива становитиме 37 350 доларів США.

При використанні водневої добавки в обсязі 0,1% за масою, за методикою розробленою в Херсонському ННІ НУК, добова витрата водню складатиме не більше 42 кг.

Розрахунки, проведені на основі математичного моделювання з урахуванням експериментальних даних за методикою економічного розрахунку, розробленою в ХННІ НУК, показують, що у разі добавки 0,1% водню його витрата становитиме 42 кг на добу. Якщо вартість водню, отриманого газовим реформінгом, становить 2,4 доларів за кг, щоденна вартість водню становитиме ~ 100 доларів США.

Таким чином, добова економія палива, враховуючи вартість водню і зниження витрати палива на ~ 3%, складатиме 1,25 т, що коштуватиме 1000 дол. США.

У разі транспортування нафти з портів ближнього сходу до України із середньою довжиною рейсової лінії 5000 миль і середньою швидкістю 14 вузлів економія за використання водневої добавки складе ~ 16 тис. у.о. за перехід.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тимошевський Б.Г., Ткач М.Р., Шалапко Д.О. Поліпшення робочих характеристик дизельних двигунів за допомогою додавання водню. *Водний транспорт*. 2018. № 1(27). С. 24–28. URL: doi.org/10.33298/226-8553/2018.1.27.03.
2. Шалапко Д.О. Дослідження впливу параметрів налаштування паливної апаратури при використанні малих домішок водню на робочий процес та ефективні показники двигуна 6ЧН20/28. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : XII Міжнародна науково-технічна конференція : матеріали. Миколаїв : НУК, 2021. С. 276–280.
3. Тимошевський Б.Г., Ткач М.Р., Шалапко Д.О. Основні положення математичної моделі додавання водню на лінії високого тиску паливної апаратури. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2017. Т. 1., № 3(62). С. 233–237.
4. Шалапко Д.О. An experimental study of the wave effect in fuel equipment using hydrogen additives to diesel fuel. *Technology audit and production reserves*. 2018. Vol 6/1, (44). С. 36–40. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.152063.

5. Tkach M.R., Tymoshevskyy B.G., Shalapko D.O. Methods to improve the performance of diesel engines by adding hydrogen into high pressure line. *Shipbuilding & marine infrastructure*. 2018. Vol. 9., № 1. С. 82–86. DOI 10.15589/SMI. 2018.01.12.
6. Шалапко Д.О. Непрямі методи дослідження ефекту використання малих домішок водню до основного палива. *Авіакосмічна техніка та технологія*. 2018. № 6(150). С. 44–51. doi: 10.32620/aktt.2018.6.07.
7. Правила технічної експлуатації морських та річкових суден. Дизелі. ККД 31.2.002.02-96: Нормативний документ морського транспорту України. Київ, 1997. 64 с.
8. 48/60B Project Guide – Marine Four-stroke diesel engines compliant with IMO Tier II. Wartsila, November 2011. 520 p. (www.mandieselturbo.com).
9. HySTAT® HYDROGEN GENERATORS. 2017. Oevel, Belgium. 16 с. (режим доступа www.hydrogenics.com).

REFERENCES

1. Timoshevsky BG, Tkach MR, Shalapko DO Improving the performance of diesel engines by adding hydrogen [Polipshennya robochykh kharakterystyk dyzel'nykh dvyhuniv za dopomohoyu dodavannya vodnyu]. *Water Transport*. 2018. № 1 (27). С. 24–28. <https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/14> [in Ukrainian].
2. Shalapko D.O. Study of the influence of fuel equipment setting parameters when using small hydrogen impurities on the work process and effective indicators of the 6ChN20/28 engine [Doslidzhennya vplyvu parametriv nalashuvannya palyvnoyi aparatury pry vykorystanni malykh domishok vodnyu na robochyy protses ta efektyvni pokaznyky dvyhuna 6CHN20/28]/ D.O. Shalapko // Innovations in shipbuilding and ocean engineering: XII International scientific and technical conference: materials. Mykolaiv : NUK, 2021. P. 276-280. [in Ukrainian].
3. Timoshevsky BG, Tkach MR, Shalapko DO The main provisions of the mathematical model of hydrogen addition on the high pressure line of fuel equipment [Osnovni polozhennya matematychnoyi modeli dodavannya vodnyu na liniyi vysokoho tysku palyvnoyi aparatury]. *Bulletin of the Kherson National Technical University*. 2017. T. 1, № 3 (62). С. 233–237 [in Ukrainian].
4. Shalapko D.O. An experimental study of the wave effect in fuel equipment using hydrogen additives to diesel fuel. *Technology audit and production reserves*. 2018. Vol 6/1, (44). Pp. 36–40. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.152063
5. Tkach M.R., Tymoshevskyy B.G., Shalapko D.O., Proskurin A.Y., Mitrophanov O.M. Methods to improve the performance of diesel engines by adding hydrogen into high pressure line. *Shipbuilding & marine infrastructure*. 2018. Vol.9., № 1. P. 82–86. DOI 10.15589/SMI. 2018.01.12
6. Shalapko D.O. Indirect methods for studying the effect of the use of small impurities of hydrogen in the main fuel [Nepryami metody doslidzhennya

- efektu vykorystannya malykh domishok vodnyu do osnovnoho palyva]. Aerospace Engineering and Technology. 2018. № 6 (150). Pp. 44–51. doi: 10.32620/aktt.2018.6.07 [in Ukrainian].
7. Rules of technical operation of sea and river vessels. Diesels. Efficiency 31.2.002.02-96: Normative document of maritime transport of Ukraine. K., 1997. 64 p.
 8. 48/60B Project Guide – Marine Four-stroke diesel engines compliant with IMO Tier II. Wartsila, November 2011. 520 p. (www.mandieselturbo.com)
 9. HySTAT® HYDROGEN GENERATORS. 2017. Oevel, Belgium. 16 p. (access mode www.hydrogenics.com)