

УДК 666.983

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.104.0.75

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ НА ВАЖКОМУ ПАЛИВІ, ЗБАГАЧЕНОМУ ВОДНЕМ

Тимошевський Б. Г., Ткач М. Р.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Анотація. Однією з найважливіших сучасних проблем морського транспорту є зниження вартості перевезень та забруднення навколишнього середовища. Малооборотні та середньооборотні дизелі будуть використовуватися як основні й допоміжні джерела енергії на транспортному флоті тепер і в найближчому майбутньому. У зв'язку з постійним зростанням вартості паливно-енергетичних ресурсів гостро постає питання зниження витрат на транспортування суден, яке безпосередньо пов'язане з вартістю палива. Тому зрозумілим та закономірним є перехід на використання важких залишкових, більш дешевих видів палива. Однак застосування таких палив пов'язане з погіршенням процесу роботи в двигунах і, відповідно, показників економічності та екологічності. Ефективним способом розв'язання цієї проблеми є використання водню як додаткового каталізатора робочого процесу. Основною метою цієї науково-дослідної роботи є визначення ефективного методу насичення важкого палива воднем та виявлення впливу водню на процес роботи дизеля. Одним із можливих методичних способів удосконалення процесу роботи двигуна внутрішнього згоряння є використання збагачення паливно-повітряної суміші воднем. Незважаючи на значну кількість досліджень щодо використання водню для вдосконалення робочого процесу двигунів внутрішнього згоряння, залишається чимало невирішених проблем. У роботі визначено оригінальну технологію збагачення паливно-повітряної суміші воднем та виокремлено основні показники роботи двигуна внутрішнього згоряння у використанні важкого палива. Показано ефективність застосування водню як каталізатора робочого процесу в дизельному двигуні. Невеликий рівень насиченості важкого палива воднем у діапазоні 0,07...0,106 % дозволяє знизити питому витрату палива на 0,9 % та, відповідно, забруднення азотом приблизно на 10 %. Упровадження запропонованого рішення дає змогу істотно знизити загальну витрату палива судновими енергетичними дизелями. На цей момент загальне зниження витрати палива дизельного двигуна MAN B&W 12G90ME-C10.5-LPSCR з MCR потужністю 74,88 МВт становить 2,8 т/добу або прибуток може досягати приблизно \$1300/добу.

Ключові слова: малооборотні двигуни внутрішнього згоряння, важке паливо, водень, паливо-повітряна суміш, робочий процес.

Вступ

Дизельні двигуни у складі суднових енергетичних установок на морському транспорті мають домінуючі позиції та, за оцінками фахівців у цій сфері, утримуватимуть ці позиції тривалий час. Незважаючи на досягнуті високі показники економічності та екологічності, зберігається тенденція на зменшення споживання палива цими двигунами, а також покращення їх екологічних показників. До цього спонукають також керівні документи міжнародної морської організації ІМО, яка з кожним роком встановлює все жорсткіші обмеження на викиди оксидів вуглецю, азоту, сірки тощо. З іншого боку, для зменшення витрат на паливо судновласники віддають перевагу використанню важких дизельних нафтових палив, спираючись на відносну дешевизну таких енергоресурсів. Відомо, що технологія спалення важких палив у дизелях суттєво впливає на робочий процес, погіршу-

ючи його параметри щодо термодинаміки, а також спричиняє збільшення утворення нагару та його відкладенню на елементах циліндро-поршневої групи, турбін наддувного агрегату та випускного тракту двигуна.

Одним з ефективних способів покращення робочого процесу у ДВЗ у використанні важких палив є збагачення воднем паливо-повітряної суміші, що дозволяє підвищити повноту згоряння, обрати раціональну максимальну температуру згоряння та зменшити викиди оксидів вуглецю та азоту в навколишнє середовище. Широко відомі дослідження вітчизняних та іноземних науковців у галузі застосування водню як малих добавок до паливо-повітряних сумішей, зокрема [1, 2, 3, 4, 5].

Однією з важливіших проблем є визначення раціонального способу подачі водню до циліндра або палива. Найбільш простим способом є додавання водню в повітря за компресором турбонаддувного агрегату або напрямую

у впускний тракт двигуна. Але згадане технічне рішення не є ефективним через небажані явища у вигляді запалення воднево-повітряної суміші у впускному колекторі, запалення в момент подачі водню в циліндр, зворотні спалахи у впускний колектор, передчасне запалення, яке може супроводжуватися зворотним ударом тощо. Більш доцільним є застосування внутрішнього сумішоутворення з подачею водню безпосередньо в циліндр двигуна, що унеможливує виникнення зазначених вище явищ. Подачу водню раціонально здійснювати наприкінці такту стиснення, але не досягаючи моменту самозапалення. Такий спосіб, на наш погляд, також має певні недоліки, пов'язані з достатньою складністю системи подачі та дозування водню, і його використання може бути доцільним за умови додавання значної кількості водню.

Нині використання водню в значних кількостях як додаткове паливо суднових ДВЗ не розглядається як доцільне. Це пов'язано, по-перше, з достатньо великою вартістю водню, а по-друге, зі складністю зберігання або виробництва водню на борту судна в значних кількостях. Більш доцільним є використання водню як малих добавок у кількості 0,05...1,0 % від маси основного палива. У цьому разі основним є не теплоспроможність водню, а його каталітичний вплив на процеси сумішоутворення та згорання. Тоді виробництво водню може бути здійснене на борту судна без великих обсягів системи виробництва та зберігання.

Одним з ефективних методів додавання таких малих кількостей водню, на наш погляд, є насичення ним палива в окремому пристрої, що встановлюється після насоса або акумулятора високого тиску безпосередньо перед паливною форсункою [1]. Зазначене технічне рішення є можливим завдяки певній розчинності водню в нафтовому паливі за умови достатньо великого тиску додавання водню. Особливо добре така система працює на малооборотних ДВЗ, коли час подачі палива є достатньо тривалим, що дає змогу водню розчинитися в паливі.

Мета та постановка завдання

Мета роботи – аналіз ефективності суднового малооборотного ДВЗ у разі використання важкого палива, насиченого воднем. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

– визначити раціональний метод насичення воднем важкого нафтового палива;

– встановити доцільну кількість водню, необхідну для поліпшення робочого процесу;

– виконати експериментальні дослідження та встановити основні показники робочого процесу у ДВЗ під час роботи на важкому паливі, насиченому воднем у незначних обсягах;

– визначити вплив насичення воднем дизельного палива на викиди оксидів азоту.

Матеріали й методи досліджень

З метою дослідження впливу збагачення воднем важкого дизельного палива на показники робочого процесу в ДВЗ був доопрацьований експериментальний стенд, схема якого зображена на рис. 1.

Для насичення воднем дизельного палива був використаний модернізований клапан керованого тиску (сатуратор) з подвійним запиранням потоку водню.

Клапан виконаний таким чином, що дозволяє подачу водню в магістраль високого тиску тільки під час руху клапана в бік відкриття або в бік закриття (тобто тільки в разі часткового відкриття клапана). Принципово водень подається в пристрій після насоса високого тиску перед форсункою. Процес подачі та часткове насичення воднем важкого дизельного палива здійснюється на хвилі низького тиску, а остаточна сатурація палива воднем відбувається за умови високого тиску в системі. У такий спосіб дизельне паливо насичується воднем та надходить у форсунку й далі впорскується в циліндр двигуна.

Після впорскування палива в циліндр розчинений водень виділяється, що сприяє подальшому подрібненню крапель, та швидко змішується з паливо-повітряною сумішшю в об'ємі циліндра. Кількість водню, що подається в клапан регульованого тиску для насичення дизельного палива, визначається величиною тиску водню на вході в сатуратор.

В експериментальних дослідженнях об'єм водню, що додавався для насичення палива, коливався в межах 0,05–0,12 % від маси рідкого палива, а тиск подачі водню до клапана керованого тиску – у межах 5,0–100 МПа. Така незначна кількість водню була обрана для того, щоб отримати помітний позитивний ефект від каталітичного впливу водню на сумішоутворення і згорання та загалом на робочий процес.

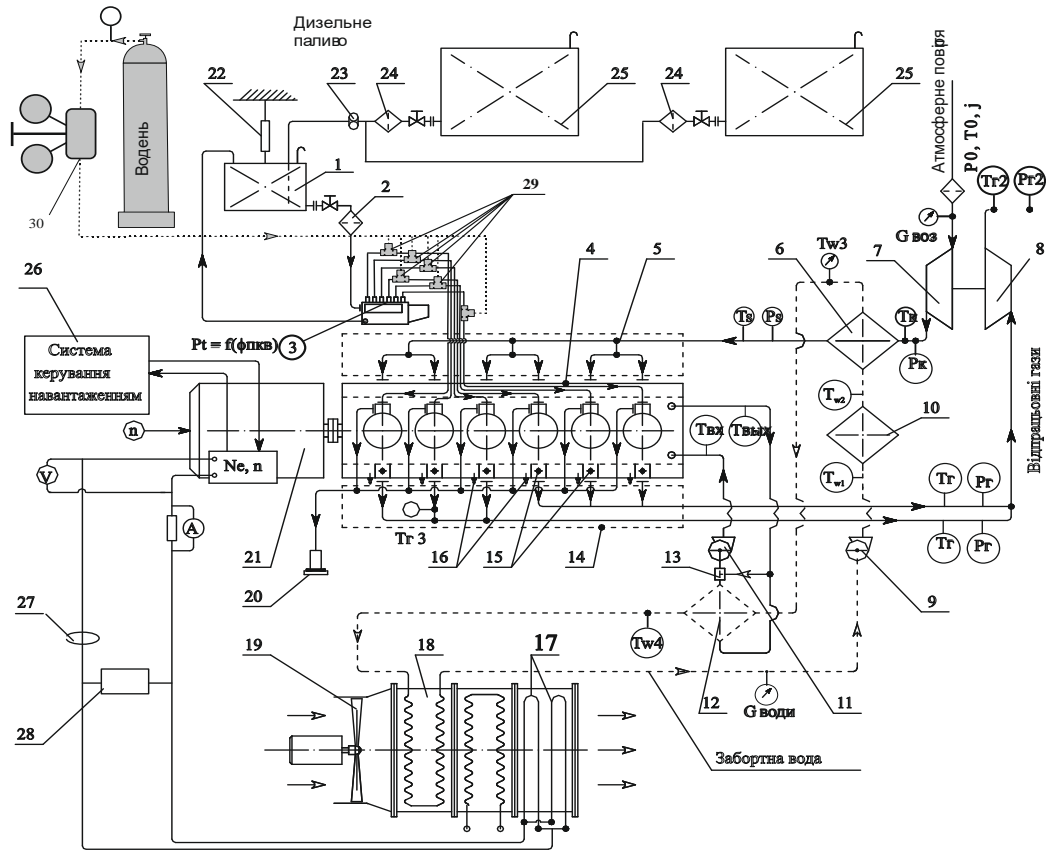


Рис. 1. Принципова схема експериментального стенда:

1 – витратна паливна цистерна, 2 – фільтр грубого очищення, 3 – паливний насос високого тиску, 4 – двигун 6ЧН12/14, 5 – впускний трубопровід, 6 – охолоджувач надувного повітря, 7 – компресор ТНА, 8 – турбіна ТНА, 9 – циркуляційний насос системи охолодження, 10 – охолоджувач масла, 11 – циркуляційний насос, 12 – водо-водяний теплообмінник, 13 – термостат, 14 – випускний трубопровід, 15, 16 – датчики температури, 17 – навантаження, 18 – водо-повітряний теплообмінник, 19 – осьовий вентилятор, 20 – електронні ваги, 21 – електрогенератор, 22 – датчик сили, 23 – підкачувальний насос, 24 – фільтр, 25 – паливна цистерна, 26 – система керування навантаженням, 27 – датчик струму, 28 – вольтметр, 29 – клапани керованого тиску, 30 – водневий редуктор

Для досліджень важким дизельним паливом було обрано згідно зі стандартом ISO 8217:2017 залишкове паливо RMK 500 з в'язкістю за умови 50 °C 500 мм²/с, густиною, якщо 15 °C, 991 кг/м³, коксовим залишком 18 %, зольністю 0,1 %, вмістом ванадію 350 мг/кг, індекс вуглеводневої ароматизації 870, температура застигання 30 °C, температура спалаху 60 °C, кислотне число 2,5 мгКОН/г, вміст сірководню 2,0. Вибір палива RMK 500 пов'язаний з тим, що воно широко застосовується для судових малооборотних та середньо-оборотних ДВЗ та його згорання в циліндрах двигунів має певні складнощі.

Принципова схема експериментального стенда показана на рис. 1. Стенд обладнаний необхідними приладами для вимірювання, фіксації та оброблення всіх параметрів двигуна. Для отримання індикаторних діаграм та параметрів у магістралі високого тиску використовувалися датчики динамічного тиску *Optrand AutoPSI-S* та *Optrand AutoPSI-S2000* відпо-

відно. Такі сенсори забезпечують інструментальну похибку та гістерезис у межах $\pm 1,0$ % та забезпечують зазначену точність за температури до 600 K, що дозволяє досягати досить надійних результатів. Сенсори *Optrand* – це оптоволоконний датчик, що складається з трьох основних компонентів: сенсорної головки з металевою діафрагмою, що безпосередньо піддається відповідного отвору в кришці двигуна для контролю тиску, кабелю, який містить два багатофункціональних волокна, та оптико-електронного перетворювача сигналу, що містить усі оптичні та електронні компоненти.

Оброблення результатів здійснюється за допомогою автоматизованої системи, яка базується на пакеті прикладних програм, розроблених на кафедрі «Двигуни внутрішнього згорання, установки та технічна експлуатація». Автори не мають за мету розглядати роботу всієї установки, а звертають увагу тільки

на елементи, пов'язані з насиченням дизельного палива воднем та його подачею до циліндрів ДВЗ.

Так, водень з балона через редуктор 30 подається до клапанів керованого тиску 29, у ці самі пристрої надходить важке дизельне паливо після насоса високого тиску 3. Насичене паливо подається до форсунок та далі впорскується в циліндри двигуна. Отримані індикаторні діаграми осереднювалися та подавалися в розгорнутому вигляді.

Результати досліджень

На рис. 2 зображені деякі результати дослідження впливу на індикаторну діаграму рівня насичення воднем важкого палива. Аналіз цих діаграм дає змогу стверджувати, що зазначений рівень насичення воднем палива

0,07...0,106 % не викликає суттєвих змін індикаторної діаграми. Незважаючи на численні повторення експериментів, не вдалося зафіксувати відхилень індикаторного тиску та температури більше ніж на 3 %, що мало помітно на графіках.

Підвищити рівень насиченості воднем важкого палива на цьому етапі досліджень не планувалося у зв'язку з обмеженою спроможністю клапана керованого тиску цієї конструкції.

Однак аналіз результатів щодо впливу рівня насиченості воднем важкого палива на питому його витрату показав значно помітніший вплив на показники економічності та екологічності. Результати вимірювання питомої витрати палива та оксидів азоту подані на рис. 3 та 4.

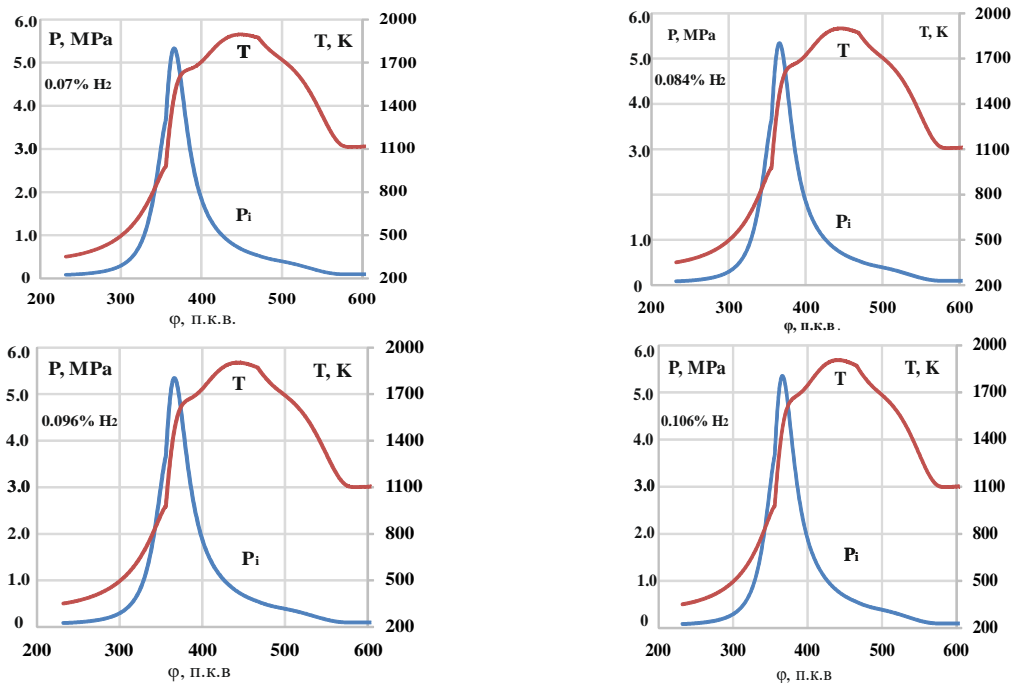


Рис. 2. Вплив кількості водню, доданого до важкого дизельного палива, на індикаторний тиск та температуру в циліндрі двигуна

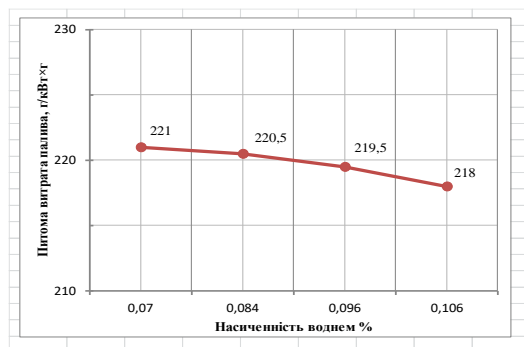


Рис. 3. Питома витрата палива

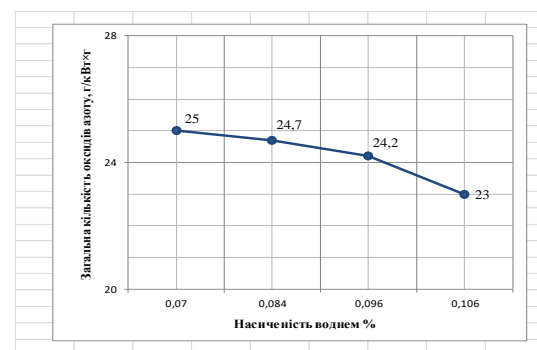


Рис. 4. Загальна питома кількість викидів оксидів азоту

У дослідженні більшу увагу приділено покращенню екологічних показників за умови насичення палива воднем. Тому під час використання водню коефіцієнт надлишку повітря був збільшений приблизно на 5 %, що дозволило знизити максимальну температуру згоряння до 1900 К. Зі свого боку це дало змогу зменшити викиди оксидів азоту, але водночас це призвело й до певного зменшення термодинамічного ККД циклу, що пояснює незначне покращення питомої витрати палива.

Висновки

У роботі досягнуто поставлену мету – проаналізовано ефективність використання важкого дизельного палива, насиченого воднем, як палива для ДВЗ.

Дослідження показано, що найбільш раціональним способом використання малої кількості водню для покращення робочого процесу є насичення воднем палива за допомогою клапана керованого тиску, встановленого безпосередньо перед форсункою двигуна.

Експериментально визначено раціональну кількість водню, якою можна наситити важке паливо за допомогою зазначеного пристрою. Встановлено також, що сатурація воднем важкого дизельного палива не призводить до значного впливу на індикаторну діаграму таких двигунів. Водночас питома витрата палива зменшилася приблизно на 0,9 %.

З'ясовано, що завдяки вибору раціонального надлишку повітря максимальні температура та тиск не відрізнялися від контрольного зразка більш ніж на 3 %. У разі, якщо був би незмінним надлишок повітря, можливо було б досягнути зменшення питомої витрати палива на 1,2 %, але в цьому разі максимальна температура циклу зростає до 2010 К, а максимальний тиск – до 5,75 МПа, що було продемонстровано в попередніх дослідженнях.

Доведено, що завдяки раціональному збільшенню надлишку повітря на 5 % та сатурації палива на рівні 0,106 % зменшення викидів оксидів азоту досягнуто на рівні 10 %. Таке неочікуване підвищення екологічності можна пояснити не стільки впливом водню, скільки тим, що в експериментальних дослідженнях використовувався не найсучасніший двигун. Більш реальним можна вважати покращення цього показника приблизно в межах 5...7 %, що також було отримано в наших дослідженнях, але на більш сучасному двигуні.

Досягнуті результати дають змогу сподіватися, що збагачення воднем важких дизельних палив є одним із перспективних способів

підвищення ефективності ДВЗ. Тому вважаємо за доцільне продовжувати дослідження в цьому напрямі та модернізувати конструкції клапана регульованого тиску з метою підвищення сатурації палива до максимально можливих щодо розчинності водню в такому паливі.

Література

1. 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. С. 82–86.
2. Шалапко Д.О. Непрямі методи дослідження ефекту використання малих домішок водню до основного палива // *Авіакосмічна техніка та технологія*. 2018. № 6 (150). С. 44–51.
3. Gomes Antunes J.M., Mikalsen R., Roskilly A.P. An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine // *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 34, Issue 15, August 2009, P. 6516–6522.
4. Szwaja S., Grab-Rogalinski K. Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine. *Int. J. Hydrogen Energy* (2009), doi: 10.1016/2009.03.020.
5. 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). С 36–40.
6. Kanth S., Debbarma S. Comparative performance analysis of diesel engine fuelled with hydrogen enriched edible and non-edible biodiesel. *International Journal of Hydrogen Energy* 2021;46(17):10478–10493. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.10.173.
7. Pedro Bancillon Ventin Muniz, Felipe Andrade Torres, Ednildo Andrade Torres. The Use of Hydrogen in the Production of Fuels and Additives for Internal Combustion Engines. *Journal of Bioengineering Technologies and Health* · July 2023 DOI: 10.34178/jbth.v6i2.303.

References

1. 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. С. 82–86.
2. Шалапко Д.О. Непрямі методи дослідження ефекту використання малих домішок водню до основного палива // *Авіакосмічна техніка та технологія*. 2018. № 6 (150). С. 44–51.
3. Gomes Antunes J.M., Mikalsen R., Roskilly A.P. An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine // *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 34, Issue 15, August 2009, P. 6516–6522.
4. Szwaja S., Grab-Rogalinski K. Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine. *Int. J.*

- Hydrogen Energy (2009), doi: 10.1016/2009.03.020.
5. 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). С 36–40.
 6. Kanth S., Debbarma S. Comparative performance analysis of diesel engine fuelled with hydrogen enriched edible and non-edible biodiesel. International Journal of Hydrogen Energy 2021;46(17):10478–10493. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.10.173.
 7. Pedro Bancillon Ventin Muniz, Felipe Andrade Torres, Ednildo Andrade Torres. The Use of Hydrogen in the Production of Fuels and Additives for Internal Combustion Engines. Journal of Bioengineering Technologies and Health · July 2023 DOI: 10.34178/jbth.v6i2.303.

Тимошевський Борис Георгійович, д-р техн. наук, професор кафедри двигунів внутрішнього згоряння, установок та технічної експлуатації, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,

borys.tymoshevskiy@nuos.edu.ua, +380509482222,

Ткач Михайло Романович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,

mykhaylo.tkach@nuos.edu.ua, +380505219380.

Increasing the efficiency of marine engines, which operate on heavy hydrogen-enriched fuel

Abstract. At present one of the most important issues of marine transport are decreasing transportation costs and pollutions into the environment. Low-speed and medium-speed diesel engines will be used as the main and auxiliary energy sources in the transport fleet now and in the near future. In connection with the constant increase in the cost of fuel and energy resources, the issue of reducing costs for the transport of ships, which is directly related to the cost of fuel, is acute. Therefore, the transition to the use of heavy residual, cheaper fuels is understandable and natural.

However, the use of such fuels is associated with certain deterioration of the work process in engines and, accordingly, indicators of economy and environmental friendliness. The hydrogen implementation as additional catalyst of operation process is the effective way for solving this problem. The main goals of this research and development are the following: to obtain the effective method of heavy fuel hydrogen saturation and identify the hydrogen influence on diesel engine operation process. One of the possible methodological ways to improve the operation process in the internal combustion engine is the use of hydrogen enrichment of the fuel-air mixture. Despite a considerable amount of research in the direction of using hydrogen to improve the working process of internal combustion engines, there are still many unsolved problems. In the paper, the original technology of hydrogen enrichment of the fuel-air mixture is determined and the main indicators of the internal combustion engine when using heavy fuel are established. The effectiveness of using hydrogen as a catalyst for the working process in the diesel engine is shown. A small level of heavy fuel saturation in a range of 0.07...0.106 % allow to decrease specific fuel consumption up to 0.9 % and nitrogen pollutions on 10 %, approximately. Implementation of proposed solution allows to significantly decrease the total fuel consumption of marine power diesel engines. For instant practically, decreasing total fuel consumption of diesel engine MAN B&W 12G90ME-C10.5-LPSCR with MCR power of 74.88 MW is 2,8 t/day or the profit may be approximately as big as \$1.300/day.

Key words: low-speed internal combustion engine, heavy fuel, hydrogen, air-fuel mixture, operation process.

Tymoshevskiy Borys, Dr. Tech. Sciences, professor of the Department of Internal Combustion Engines, Installations and Technical Operation, Admiral Makarov National Shipbuilding University,

borys.tymoshevskiy@nuos.edu.ua, +380509482222,

Tkach Mykhailo, Dr. Tech. Sciences, professor, head of the Department of Engineering Mechanics and Engineering Technology, Admiral Makarov National Shipbuilding University,

mykhaylo.tkach@nuos.edu.ua, +380505219380.