

ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ НИЗЬКОГО ТИСКУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

С.В. Сагін¹, О.А. Куропятник²

¹ д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри суднових енергетичних установок,
Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-8742-2836

² д-р філософії, докторант кафедри суднових енергетичних установок,
Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна,
ORCID ID: 0009-0008-2565-5771

Анотація

Вступ. Ефективність експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту визначається не лише отриманням економічного прибутку від транспортування вантажів або забезпечення відпочинку пасажирів, але й рівнем негативного впливу з боку суден та їх енергетичних установок на довкілля. Одним із найбільш забруднювальних компонентів, що потрапляють від теплових двигунів суднових енергетичних установок до довкілля, є випускні гази. До складу випускних газів суднових дизелів разом із нейтральними та небезпечними складовими входять токсичні речовини, у тому числі оксиди азоту, емісія яких регламентується відповідно до вимог Додатка VI MARPOL. З метою зниження емісії оксидів азоту використовуються різні методи, найпоширенішим з яких є рециркуляція випускних газів. **Мета** дослідження полягала у визначенні впливу рециркуляції випускних газів на екологічні показники судового дизеля. **Результати.** Розглянуто питання щодо забезпечення екологічних показників суднових дизелів шляхом використання систем рециркуляції випускних газів низького тиску. Висвітлено особливості систем рециркуляції випускних газів низького тиску, що встановлюються на суднових малообертових дизелях високої потужності. Саме в цих системах деяка частина випускних газів після газотурбокомпресора повертається в циліндр судового дизеля, сприяє через це зменшенню температури під час згоряння палива. Наведені результати досліджень, що виконувалися на судовому малообертовому дизелі 7UEC60LS фірми Mitsubishi, обладнаному системою рециркуляції випускних газів низького тиску зі ступенем рециркуляції 5...20 %. При цьому визначався вплив ступеню рециркуляції на емісію оксидів азоту та температуру випускних газів дизеля. **Висновки.** Експериментально встановлено, що зміна ступеня рециркуляції випускних газів у діапазоні 5...20 % забезпечує зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах на 3,8...30,7 % залежно від навантаження дизеля. Також виявлено, що використання системи рециркуляції випускних газів низького тиску призводить до підвищення температурних навантажень на циліндрову групу та газовипускную систему судового дизеля.

Ключові слова: екологічні показники, емісія оксидів азоту, морський транспорт, система рециркуляції випускних газів низького тиску, судовий дизель, температурне навантаження.

USING A LOW-PRESSURE EXHAUST GAS RECIRCULATION SYSTEM TO
ENSURE THE ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF MARINE DIESEL
ENGINES

S.V. Sagin¹, O.A. Kuropyatnyk²

¹ Dr. of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Ship Power Plants,
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-8742-2836

² PhD, Doctoral Student of the Department of Ship Power Plants,
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0008-2565-5771

Summary

Introduction. The efficiency of operation of sea and inland waterway vessels is determined not only by obtaining economic profit from transporting goods or providing recreation for passengers, but also by the level of negative impact of vessels and their power plants on the environment. One of the most polluting components that enter the environment from thermal engines of ship power plants is exhaust gases. The exhaust gases of ship diesel engines, along with neutral and hazardous components, include toxic substances, including nitrogen oxides, the emission of which is regulated in accordance with the requirements of Annex VI of MARPOL. In order to reduce the emission of nitrogen oxides, various methods are used, the most common of which is exhaust gas recirculation. **The purpose** of the study was to determine the impact of exhaust gas recirculation on the environmental performance of ship diesel engines. **Results.** To consider the issue of ensuring the environmental performance of ship diesel engines by using low-pressure exhaust gas recirculation systems. The features of low-pressure exhaust gas recirculation systems installed on high-power low-speed marine diesel engines are highlighted. It is in these systems that some of the exhaust gases after the gas turbocharger are returned to the cylinder of the marine diesel engine, thereby contributing to a decrease in temperature during fuel combustion. The results of research carried out on a low-speed marine diesel engine 7UEC60LS from Mitsubishi, equipped with a low-pressure exhaust gas recirculation system with a recirculation degree of 5...20 %, are presented. The influence of the recirculation degree on the emission of nitrogen oxides and the temperature of diesel exhaust gases was determined. **Conclusions.** It was experimentally established that changing the degree of exhaust gas recirculation in the range of 5...20 % provides a decrease in the concentration of nitrogen oxides in exhaust gases by 3.8...30.7 %, respectively, depending on the load of the diesel engine. It was also found that the use of a low-pressure exhaust gas recirculation system leads to an increase in temperature loads on the cylinder group and exhaust system of a marine diesel engine.

Key words: environmental performance, low-pressure exhaust gas recirculation system, marine diesel engine, maritime transport, nitrogen oxide emissions, temperature load.

Вступ. Морський і внутрішній водний транспорт є суттєвою складовою економіки будь-якої країни, територія якої з'єднується з іншими водними шляхами. Корисна транспортна робота, яка забезпечується під час перевезення вантажу або пасажирів, пов'язана з неминучим утворенням шкідливих викидів із випускними газами теплових двигунів (насамперед дизелів як найпоширеніших генераторів механічної енергії, що встановлюються на судах морського та внутрішнього водного транспорту) [1–3]. Ефективність експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту визначається не лише отриманням економічного прибутку від транспортування вантажів або забезпечення відпочинку пасажирів, але й рівнем негативного впливу з боку суден та їх енергетичних установок на довкілля. Одним із найбільш забруднювальних компонентів, що потрапляють від теплових двигунів суднових енергетичних установок до довкілля, є випускні гази. До складу випускних газів суднових дизелів разом із нейтральними та небезпечними складовими входять токсичні речовини, у тому числі оксиди азоту, які в атмосфері перетворюються в азотну кислоту та повертаються на водну або земну поверхню у вигляді кислотних дощів.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Важливість розв'язання завдань щодо забезпечення екологічних показників суден морського та внутрішнього водного транспорту під час експлуатації двигунів внутрішнього згоряння визначається вимогами Додатка VI MARPOL, яким (у тому числі) обмежуються рівень емісії оксидів азоту з випускними газами. Зниження емісії оксидів азоту забезпечується первинними та вторинними методами [4–6]. Первинні впливають на процес утворення оксидів азоту в циліндрі дизеля, вторинні забезпечують очищення випускних газів від оксидів азоту. Основною метою первинних методів є зниження температури в циліндрі дизеля під час згоряння палива менш за 1500 °C – саме за цієї температури відбувається ланцюгова та некерована реакція утворення оксидів азоту. Будь-який із способів підтримання екологічних показників роботи суднових дизелів (щодо емісії оксидів азоту) не може бути визначено аналітично. Це пов'язано з різними характеристиками суднових дизелів, різноманітністю їх експлуатаційних режимів, а також різним структурним і фракційним складом палива, що в них використовується. Тому найбільш ефективним способом визначення оптимального режиму систем, що забезпечують підтримання екологічних показників суднових дизелів, є проведення експериментальних досліджень

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із способів підтримання емісії NO_x у межах, що відповідають цим вимогам, є використання систем керування випускними газами, яке (у більшості випадків) виконується шляхом їх рециркуляції, під час якої частину випускних газів повертають до циліндру дизеля [7; 8]. При цьому у випадку, коли випускні гази спрямовують до циліндра після газотурбонагнітача (тобто коли вони втратили більшу частину енергії та тиску на лопатках газової турбіни), системи рециркуляції називають системами низького тиску [9; 10]. У разі, коли випускні гази повертають до циліндра ще до їхнього потрапляння на лопатки газотурбонагнітача (тобто коли вони ще характеризуються тиском, з яким виходять із випускного колектора), системи

рециркуляції називають системами високого тиску [11; 12]. Обидві системи використовуються на дизелях суден морського транспорту та встановлюються незалежно від призначення або потужності дизеля [13; 14].

Переваги системи рециркуляції низького тиску:

- проста конструкція газоходів і скрубера, зважаючи на порівняно низький тиск і низьку температуру випускних газів (порівняно із системою рециркуляції високого тиску) [15–17];
- низька потужність додаткового газового нагнітача з огляду на те, що випускні гази під час рециркуляції спрямовуються не в продувний ресивер дизеля (як у системі рециркуляції високого тиску), а в компресор газотурбонагнітача [18–20].

При цьому компоненти системи низького тиску мають більші геометричні розміри, ніж у системі високого тиску (у зв'язку з тим, що за умови низького тиску випускних газів пропорційно збільшується їх об'єм).

Система рециркуляції високого тиску (порівняно із системою низького тиску) відрізняється більшою компактністю – високий тиск сприяє меншому питомому об'єму випускних газів [21; 22]. Однак з огляду як на високий тиск, так і на високу температуру газів, скрубер, що забезпечує їх очищення, зазнає великі температурні й гідравлічні навантаження, тому має більш складну конструкцію. Крім того, оскільки в системі рециркуляції високого тиску випускні гази надходять безпосередньо в ресивер продувного повітря, потужність газового нагнітача повинна забезпечувати такий самий високий тиск, як і основний повітряний компресор газотурбонагнітача [23; 24]. Також потрібно зазначити, що висока температура випускних газів зобов'язує використовувати додатковий охолоджувач, це ускладнює конструкцію системи рециркуляції високого тиску [25; 26].

У системах рециркуляції низького й високого тиску кількість випускних газів, що повертаються до циліндра дизеля, може досягати 25...30 % від їх загального обсягу [27; 28].

Формулювання цілей статті. У зв'язку з вищевикладеним метою дослідження було визначення впливу системи рециркуляції випускних газів низького тиску на основні експлуатаційні показники роботи судових дизелів та визначення її найбільш раціональних режимів експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Дослідження виконувалися на судовому малообертовому дизелі 7UEC60LS фірми Mitsubishi, обладнаному системою рециркуляції випускних газів низького тиску. Дизелебудівна корпорація Mitsubishi Heavy Industries Ltd. є однією з перших світових фірм, які почали встановлювати системи рециркуляції випускних газів на морські судна.

Принципову схему дизеля 7UEC60LS фірми Mitsubishi із системою рециркуляції випускних газів низького тиску (Low pressure Exhaust Gas Recirculation – LP-EGR) показано на рис. 1.

Функціонування системи рециркуляції відбувається таким чином. Випускні гази із циліндрів дизеля 10 надходять у загальний випускний колектор 2 і далі до газотурбонагнетачів 1 і 5, після чого через газовипускну трубу видаляються в атмосферу. Газотурбонагнітачі 1 і 5 забирають повітря з машинного відділення і після стиснення спрямовують його через охолоджувачі 12 і 9 у повітряний

(продувний) ресивер 11. При цьому газотурбонагнетач 5 обладнаний системою рециркуляції випускних газів низького тиску, яка складається з керуючого клапана 3, скрубера очищення газів 4, газового нагнітача 8, водяної цистерни 7 і водяного насоса 6. У разі використання системи рециркуляції випускних газів їх кількість регулюється клапаном 3. Випускні гази очищуються й попередньо охолоджуються в скрубєрі 4, після чого додатковим нагнітачем 8 спрямовуються до охолоджувача 9 та разом зі свіжим повітрям надходять до повітряного ресивера 11 і далі в циліндри дизеля 10.

Експериментальні дослідження з визначення емісії NO_x у випускних газах виконувалися відповідно до вимог Технічного кодексу з контролю за викидами окислів азоту із суднових дизельних двигунів, згідно з яким дослідження проводилися за випробувальним циклом Е3 (що застосовується до головних і допоміжних двигунів, які працюють за гвинтовою характеристикою) [29–31]. Режим роботи дизеля задавалися частотою обертання колінчастого вала, яка визначалася положенням паливної рейки.

Експерименти виконувалися за умови стабілізації зовнішніх збурень і навантажень для швидкісних режимів роботи, що відповідали значенням відносної потужності дизеля: $0,6N_{\text{еном}}$, $0,7N_{\text{еном}}$, $0,8N_{\text{еном}}$ і $0,9N_{\text{еном}}$, де $N_{\text{еном}}$ – номінальна тривала потужність дизеля.

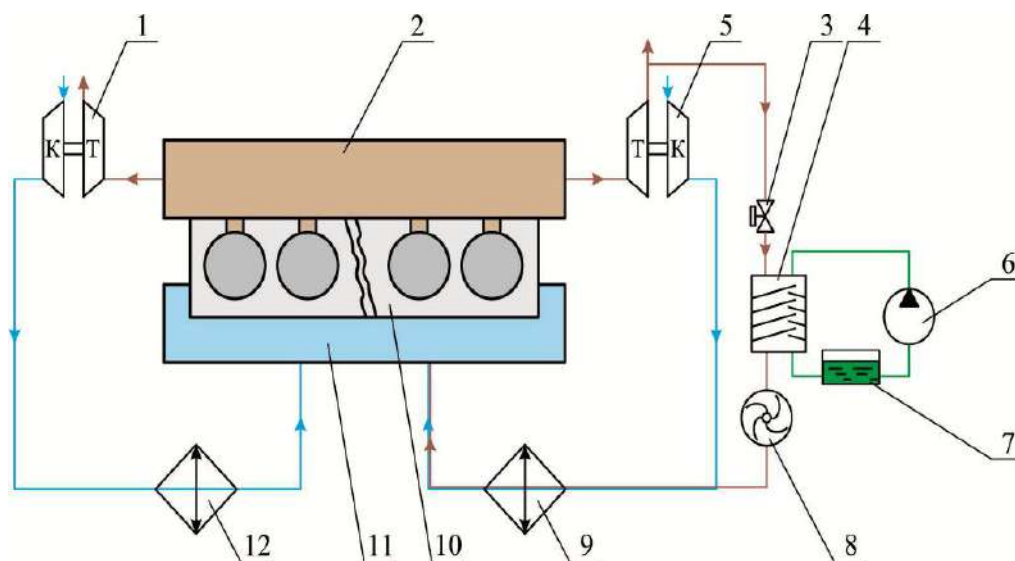


Рис. 1. Принципова схема системи рециркуляції випускних газів низького тиску суднового малообертового дизеля 7UEC60LS фірми Mitsubishi:

- 1, 5 – газотурбонагнітач; 2 – випускний колектор; 3 – керуючий клапан системи рециркуляції випускних газів високого тиску; 4 – скрубєр;
6 – насос подачі прісної води в систему очищення й охолодження випускних газів;
7 – цистерна прісної води системи очищення й охолодження випускних газів;
8 – допоміжний газовий нагнітач з електричним приводом; 9, 12 – охолоджувач наддувального повітря; 10 – судновий дизель; 11 – продувний ресивер;
Т, К – газова турбіна та повітряний компресор газотурбонагнітачів

Випробування проводилися під час зниження потужності дизеля, починаючи з максимально можливої за умови чистого корпусу судна. Зниження частоти обертання здійснювалося приблизно на один оберт кожні п'ять хвилин, що забезпечувало рівномірну зміну теплового режиму роботи дизеля. При цьому на кожному з досліджуваних режимів дизель попередньо працював протягом 30...45 хвилин, що гарантувало рівномірний розподіл теплових і масових потоків, після чого виконувалася фіксація необхідних параметрів. Під час досліджень дизель працював на тому самому сорті палива й циліндрового мастила. Також постійними підтримувалися значення охолоджувальних середовищ на вході / виході дизеля (води та циркуляційного мастила). Результати досліджень відображені на рис. 2.

Відносне зменшення емісії оксидів азоту NO_x на кожному з режимів визначалося за виразом

$$\Delta \text{NO}_x = \frac{\text{NO}_x^0 - \text{NO}_x^i}{\text{NO}_x^0} \cdot 100, \%,$$

де NO_x^0 – концентрація оксидів азоту у випадку, коли $\text{EGR} = 0 \%$;

NO_x^i – концентрація оксидів азоту для інших значень ступеня рециркуляції EGR (5, 10, 15, 20 %).

Відносне зменшення емісії оксидів азоту з випускними газами під час використання системи HP-EGR наведено на рис. 3.

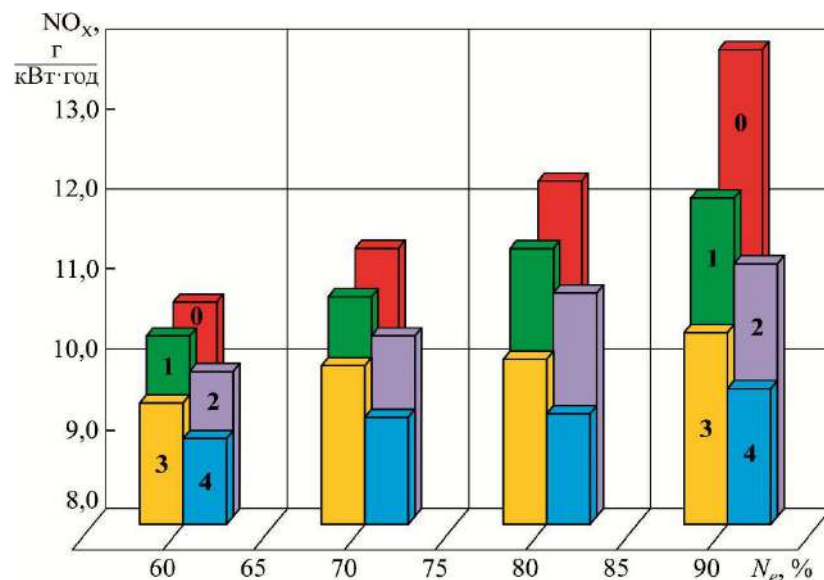


Рис. 2. Зміна концентрації оксидів азоту NO_x , г/(кВт · год), у випускних газах дизеля 7UEC60LS Mitsubishi для різного ступеня рециркуляції:

0 – робота без рециркуляції, $\text{EGR} = 0 \%$; 1 – $\text{EGR} = 5 \%$; 2 – $\text{EGR} = 10 \%$;
3 – $\text{EGR} = 15 \%$; 4 – $\text{EGR} = 20 \%$

Одним із негативних факторів, що пов'язані з використанням системи рециркуляції газів, є збільшення температури газів на виході з циліндрів. Це обумовлюється погіршенням якості процесу згоряння (через зменшення кисню в газоповітряній суміші) та збільшенням питомої витрати палива під час використання рециркуляції газів. Підтвердженням цього є діаграми, що наведені на рис. 4.

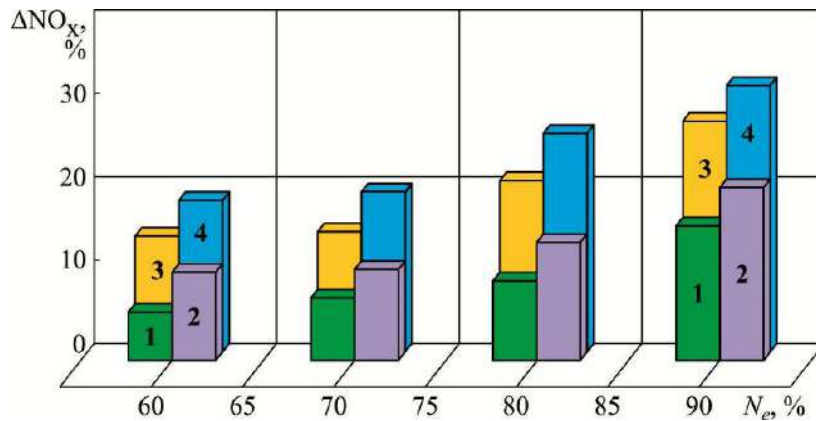


Рис. 3. Відносне зменшення емісії оксидів азоту NO_x з випускними газами дизеля 7UEC60LS Mitsubishi для різного ступеня рециркуляції:
1 – EGR = 5 %; 2 – EGR = 10 %; 3 – EGR = 15 %; 4 – EGR = 20 %

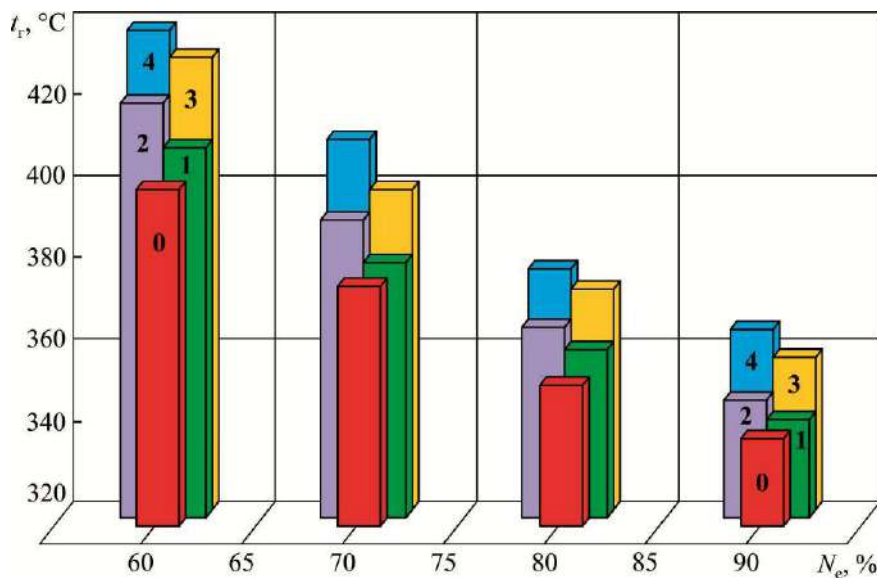


Рис. 4. Зміна температури випускних газів t_г, °C, дизеля 7UEC60LS Mitsubishi для різного ступеня рециркуляції, %:
0 – робота без рециркуляції, EGR = 0 %; 1 – EGR = 5 %; 2 – EGR = 10 %;
3 – EGR = 15 %; 4 – EGR = 20 %

Висновки. Одним із варіантів забезпечення екологічних параметрів роботи суднових дизелів (зокрема, емісії NO_x з випускними газами) є комплектація суднових дизелів системами рециркуляції випускних газів низького тиску LP-EGR, що забезпечують примусове повернення до циліндрів частини випускних газів із газовипускної системи.

Під час проведення експериментів на судовому малообертовому дизелі 7UEC60LS Mitsubishi встановлено, що зміна ступеня рециркуляції випускних газів у діапазоні 5...20 % забезпечує зниження концентрації оксидів азоту NO_x у випускних газах на 3,8...30,7 % залежно від навантаження дизеля, яке в експериментах змінювалося в інтервалі $N_e = (0,6...0,9)N_{e\text{ном}}$. Причому найбільші значення зниження концентрації оксидів азоту NO_x у випускних газах відповідають інтервалу навантажень $(0,8...0,9)N_{e\text{ном}}$, тобто найпоширенішим з експлуатаційних режимів роботи дизелів, що використовуються як головні.

Використання системи рециркуляції випускних газів високого тиску призводить до підвищення температури випускних газів, яке зумовлюється погіршенням якості процесу згоряння та збільшенням питомої витрати палива. У зв'язку із цим під час вибору експлуатаційних режимів роботи судового дизеля, що оснащений системою рециркуляції випускних газів, потрібно враховувати не лише екологічну ефективність, але й зміни температурних навантажень на циліндрову групу та газовипускну систему дизеля.

ЛІТЕРАТУРА

1. Varbanets R., Shumylo O., Marchenko A., Minchev D., Kyrnats V., Zalozh V., Aleksandrovska N., Brusnyk R., Volovyk K. Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. *Polish maritime research*. 2022. № 29 (4). P. 88–96. <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
2. Petrychenko O., Levynskyi M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects. *Transport Systems and Technologies*. 2023. № 41. P. 96–106.
3. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines. *Technology Audit and Production Reserves*. 2023. № 5 (1(73)). P. 37–43. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.
4. Сагін С. В., Куропятник О. А. Використання системи рециркуляції випускних газів низького тиску для забезпечення екологічних показників суднових дизелів : матеріали VI міжнародної морської науково-практичної конференції кафедри СЕУ і ТЕ ОНМУ “Marine Power Plants & Operation MPP&O-2025”. 2025. <https://2025.depas.od.ua>.
5. Sagin S., Kuropyatnyk O., Matieiko O., Razinkin R., Stoliaryk T., Volkov O. Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12. 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.

6. Petrychenko O., Levinskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport. *Sustainability*. 2025. Vol. 17. P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
7. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2021. No. 7–8. P. 36–43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
8. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2022. Вип. 45. С. 5–16. DOI: 10.31653/smf45.2022.5-16.
9. Varbanets R., Fomin O., Pištěk V., Klymenko V., Minchev D., Khrulev A., Zalozh V., Kučera P. Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9 (3). P. 321. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
10. Kuropyatnyk O.A. Reduction of NO_x emission in the exhaust gases of low-speed marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Vienna-2018*. No. 7–8. P. 37–42. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-37-42.
11. Sagin A.S., Zablotskyi Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. 2021. No. 7–8. P. 14–17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
12. Побережний Р. В., Сагін С. В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 41. С. 5–9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
13. Neumann S., Varbanets R., Minchev D., Malchevsky V., Zalozh V. Vibrodiagnostics of marine diesel engines in IMES GmbH systems. *Ships and Offshore Structures*. 2022. No. 18 (11). P. 1535–1546. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2128558>.
14. Сагін С. В., Побережний Р. В. Аналіз основних способів зниження емісії оксидів азоту дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2022. Вип. 44. С. 132–141. DOI: 10.31653/smf44.2022.132-141.
15. Руснак Д. Ю., Сагін С. В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 40. С. 49–54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
16. Petrychenko O., Levinskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport. *Transport Systems and Technologies*. 2024. Vol. 43. P. 21–36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.

17. Зверьков Д. О., Сагін С. В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 41. С. 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
18. Марченко О. О., Сагін С. В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 41. С. 10–14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
19. Заблоцький Ю. В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок. *Вісник Одеського національного морського університету : зб. наук. праць.* 2020. № 2 (62). С. 106–119. DOI: 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.
20. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences.* 2021. No. 7–8. P. 36–43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
21. Сагін С. В., Сагін А. С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту. *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник.* 2023. Вип. 46. С. 118–131. DOI: 10.31653/smf46.2023.118-131.
22. Сагін С. В., Мадей В. В., Сагін А. С. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі. *Автоматизація суднових технічних засобів : наук.-техн. зб.* 2021. Вип. 27. С. 93–107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.
23. Сагін С. В., Бондар С. А. Метод попередження аварійних ситуацій під час експлуатації суднових дизелів за аналізом потоку відмов його основних вузлів. *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник.* 2023. Вип. 46. С. 101–109. DOI: 10.31653/smf46.2023.101-109.
24. Заблоцький Ю. В. Підвищення економічності роботи суднових дизелів. *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 40. С. 12–16. DOI: 10.31653/smf340.2020.12-16.
25. Petrychenko O. Levinskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport. *Transport Systems and Technologies.* 2024. No. 43. P. 21–36.
26. Сагін С. С., Сагін С. В. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден. *Водний транспорт : зб. наук. праць.* 2024. Вип. 1 (39). С. 215–225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
27. Zablotskyi Yu.V., Sagin A.S. Applying of fuel additives in marine diesel engines. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2021. Вип. 43. С. 5–17. DOI: 10.31653/smf343.2021. 5-17.
28. Сагін С. В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2018. Вип. 38. С. 132–142.
29. Сагін С. В., Суворов П. С., Бондар С. А. Розробка методу оцінки ризиків виникнення аварійних подій під час експлуатації дизелів

морських суден. *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. 2023. Вип. 47. С. 122–130. DOI: 10.31653/smf47.2023.122-130.

30. Сагін С. В., Столярик Т. О. Динаміка суднових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками. *Автоматизація суднових технічних засобів : наук.-техн. зб.* 2021. Вип. 27. С. 108–119.
31. Сагін С. В., Мадей В. В., Сагін С. С., Чимшир В. І., Разінкін Р. О. Аналіз екологічної стійкості та енергетичної ефективності використання скрубберного очищення випускних газів дизелів суден морського транспорту. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2023. Вип. 47. С. 157–171.

REFERENCES

1. Varbanets, R., Shumylo, O., Marchenko, A., Minchev, D., Kyrnats, V., Zalozh, V., Aleksandrovska, N., Brusnyk, R., Volovyk, K. (2022). Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. *Polish maritime research*, 29 (4), 88–96. <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
2. Petrychenko, O., Levinskyi, M., Prytula, D., Vynohradova, A. (2023). Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects. *Transport Systems and Technologies*, 41, 96–106.
3. Sagin, S., Sagin, A. (2023). Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines. *Technology Audit and Production Reserves*, 5 (1(73)), 37–43. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.
4. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2025). Використання системи рециркуляції випускних газів низького тиску для забезпечення екологічних показників суднових дизелів. Materials of the International Conference “Marine Power Plants & Operation MPP&O-2025”. <https://2025.depas.od.ua>.
5. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Matieiko, O., Razinkin, R., Stoliaryk, T., Volkov O. (2024). Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12, 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.
6. Petrychenko, O., Levinskyi, M., Goolak, S., Lukoševičius, V. (2025). Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport. *Sustainability*, 17, 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
7. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines. (2021). *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 7–8, 36–43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
8. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Tkachenko, I. (2022). Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships. *Ship power plants*, 45, 5–16. DOI: 10.31653/smf45.2022.5-16.

9. Varbanets, R., Fomin, O., Píštěk, V., Klymenko, V., Minchev, D., Khrulev, A., Zalozh, V., Kučera, P. (2021). Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9 (3). 321. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
10. Kuropyatnyk, O.A. (2018). Reduction of NO_x emission in the exhaust gases of low-speed marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 7–8, 37–42.
11. Sagin, A.S., Zablotskyi, Yu.V. (2021). Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 7–8, 14–17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
12. Poberezhniy, R.V., Sagin, S.V. (2020). Zabezpechenya ekologichnykh pokaznikov dizeliv suden richkovogo ta morskogo transport. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 41, 5–9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
13. Neumann, S., Varbanets, R., Minchev, D., Malchevsky, V., Zalozh, V. (2022). Vibrodiagnostics of marine diesel engines in IMES GmbH systems. *Ships and Offshore Structures*, 18 (11), 1535–1546. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2128558>.
14. Sagin, S.V., Poberezhniy, R.V. (2022). Analiz osnovnich sposobiv znizhenya emisii oksidiv azotu dizeliv suden morskogo ta vnutrishnego vodnogo transportu. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 44, 132–141. DOI: 10.31653/smf44.2022.132-141.
15. Rusnak, D.Y., Sagin, S.V. (2020). Zabezpechenya ekologichnykh vumog pri ultrazvukovii desulphurizacii vuglevodnich paliv. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 40, 49–54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
16. Petrychenko, O., Levinskyi, M. (2024). Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport. *Transport Systems and Technologies*, 43, 21–36. DOI: 10.32703/2617-9059-2024-43-2.
17. Zverkov, D.O., Sagin, S.V. (2020). Znizhenya mechanichnich vtrat u sudnovich dizelyach. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 41, 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
18. Marchenko, O.O., Sagin, S.V. (2020). Vdoskonalenyia procesu ochishenya sudnovih vazhkih paliv. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 41, 10–14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
19. Zablotskyi, Yu.V. (2020). Pidvishenya palivnoi ekonomichnosti sudnovih dizelnih ustanovok. *Visnik Odeskogo nacionalnogo morskogo universitetu*, 2, 106–119. DOI: 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.
20. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2021). Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 7–8, 36–43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
21. Sagin, S.V., Sagin, A.S. (2023). Control ta diagnostuvanya nadiinosti ta ekonomichnosti dizeliv morskikh ta richkovih

- zasobiv transportu. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 46, 118–131. DOI: 10.31653/smf46.2023.118-131.
22. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, A.S. (2021). Robota sudnovogo dizelya na biodizelnom palivi. *Avtomatizaciya sudnovih tehnicnih zasobiv*, 27, 93–107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.
23. Sagin, S.V., Bondar, S.A. (2023). Metod poperedzhenya avariinih situacii pid chas ekspluatacii sudnovih dizeliv za analizom potocu vidmov iogo osnovnih vuzliv. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 46, 101–109. DOI: 10.31653/smf46.2023.101-109.
24. Zablotskyi, Yu.V. (2020). Pidvishenya economichnosti roboti sudnovih dizeliv. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 40, 12–16. DOI: 10.31653/smf340.2020.12-16.
25. Petrychenko, O. Levinskyi, M. (2024). Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport. *Transport Systems and Technologies*, 43, 21–36.
26. Sagin, S.S., Sagin, S.V. (2024). Vicoristanya shtuchnogo intelektu v situaciyah nadmirnogo zblizhenya suden. *Vodnii transport*, 1 (39), 215–225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
27. Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. (2021). Applying of fuel additives in marine diesel engines. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 43, 5–17. DOI: 10.31653/smf343.2021. 5-17.
28. Sagin, S.V. (2018). Zнизhenya energetichnih vtrat v precizionih parah palivnoi aparaturi sudnovich dizeliv. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 38, 132–142.
29. Sagin, S.V., Suvorov, P.S., Bondar, S.A. (2023). Rozrobka metodu ocinki rizikiv vineknnya avariinih podii pid chas eksplyatacii dizeliv morskih suden. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 47, 122–130. DOI: 10.31653/smf47.2023.122-130.
30. Sagin, S.V., Stolyaryk, T.O. (2021). Dinamika sudnovih dizeliv pid chas vikoristanya motornich mastil z rizmimi structurnimi harakteristikami. *Avtomatizaciya sudnovih tehnicnih zasobiv*, 27, 108–119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
31. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, S.S., Chimshir, V.I., Razinkin, R.O. (2023). Analiz ekologichnoi stiičnosti ta energetichnoi efektyvnosti vicoristanya scrubernogo ochishenya vipusknych gaziv dizeliv sudden morskogo transportu. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 47, 157–171.

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 29.08.2025

Дата публікації: 30.10.2025