

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

С.В. Сагін¹, О.А. Куропятник²

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

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

Анотація

Вступ. Рух суден морського та внутрішнього водного транспорту неможливий без використання двигунів внутрішнього згоряння, які нині є основним генератором механічної енергії. Використання альтернативних видів енергії (сонячної, вітрової, а також енергії різного типу акумуляторних батарей) обмежено для суден, що здійснюють тривалі автономні навігаційні переходи. Основним видом палива, що використовується в суднових дизелях та надалі сприяє отриманню ефективної потужності, є рідке паливо нафтового походження. Круговий робочий цикл суднового дизеля неможливий без утворення випускних газів, до складу яких входять небезпечні токсичні компоненти. Суднові дизелі, що перебувають в експлуатації, вимагають постійного пошуку ефективних способів зниження токсичності випускних газів, насамперед викидів оксидів азоту. Актуальність цього завдання підтверджується вимогами міжнародних та національних конвенцій, що регламентують вміст оксидів азоту у випускних газах залежно від типу дизеля та року побудови судна. Забезпечення вимог цих конвенцій можливе шляхом використання різних способів, одним з яких є рециркуляція випускних газів. **Мета** дослідження – визначення впливу системи рециркуляції випускних газів високого тиску на екологічні показники роботи суднового малооборотного дизеля. **Результати.** Розглянуті питання щодо забезпечення екологічних показників суднових дизелів шляхом використання систем рециркуляції випускних газів високого тиску. Висвітлені особливості систем рециркуляції випускних газів високого тиску, що встановлюються на суднових малооборотних дизелях високої потужності. Наведені результати досліджень, що виконувались на судновому малооборотному дизелі 8G60ME MAN Diesel, обладнаному системою рециркуляції випускних газів високого тиску. Конструкційною особливістю цих систем є повернення деякої кількості випускних газів повз газовий турбонагнітач до циліндру дизеля. Це сприяє погіршенню складу паливо-повітряної суміші в циліндрі та через це зменшує температуру згоряння. Саме це явище перериває ланцюгову реакцію утворення оксидів азоту та зменшує рівень їх емісії. **Висновки.** Експериментально встановлено, що зміна ступеня рециркуляції випускних газів у діапазоні 5–20 % забезпечує зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах відповідно на 5,7–38,5 % залежно від навантаження дизеля.

Негативним фактором використання системи рециркуляції випускних газів високого тиску є підвищення температурних навантажень на циліндрову групу та газо-випускную систему суднового дизеля.

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

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

S.V. Sagin¹, O.A. Kuropyatnyk²

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

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

Summary

Introduction. The movement of sea and inland waterway vessels is impossible without the use of internal combustion engines, which are currently the main generator of mechanical energy. The use of alternative energy sources (solar, wind, as well as energy from various types of batteries) is limited to vessels that make long autonomous navigational crossings. The main type of fuel used in marine diesel engines and subsequently contributes to obtaining effective power is liquid fuel of petroleum origin. The circular operating cycle of a marine diesel engine is impossible without the formation of exhaust gases, which include dangerous toxic components. Marine diesel engines in operation require a constant search for effective ways to reduce the toxicity of exhaust gases, primarily nitrogen oxide emissions. The relevance of this task is confirmed by the requirements of international and national conventions that regulate the content of nitrogen oxides in exhaust gases depending on the type of diesel engine and the year of construction of the vessel. Ensuring the requirements of these conventions is possible by using various methods, one of which is exhaust gas recirculation. **The purpose** of the study is to determine the impact of the high-pressure exhaust gas recirculation system on the environmental performance of a low-speed marine diesel engine. **Results.** To consider the issue of ensuring the environmental performance of marine diesel engines by using high-pressure exhaust gas recirculation systems. The features of high-pressure exhaust gas recirculation systems installed on high-power low-speed marine diesel engines are highlighted. The results of research carried out on the 8G60ME MAN Diesel low-speed marine diesel engine equipped with a high-pressure exhaust gas recirculation system are presented. The design feature of these systems is the return of a certain amount of exhaust gases past the gas turbocharger to the diesel cylinder. This contributes to the deterioration of the composition of the fuel-air mixture in the cylinder and, therefore, reduces the combustion temperature. It is this phenomenon that interrupts the chain reaction of the formation of nitrogen oxides and reduces the level of their emissions. **Conclusions.** It has been 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 5.7–38.5 %, respectively, depending on the load of the diesel engine. A negative factor in using a high-pressure exhaust gas recirculation system is the increase in temperature loads on the cylinder group and the gas exhaust system of a marine diesel engine.

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

Вступ. Двигуни внутрішнього згоряння / дизелі займають у судновій енергетиці домінуюче положення порівняно з іншими типами теплових двигунів – паровими котлами та газовими турбінами. Насамперед це пов'язано з найменшою питомою витратою палива та найбільшим коефіцієнтом корисної дії, що характерно саме для дизелів [1; 2]. Дизелі, що встановлюються на суднах морського та внутрішнього водного транспорту, виконують функції головних та допоміжних двигунів, забезпечуючи рух судна та роботу суднових систем, механізмів та обладнання. Отримання корисної роботи та ефективної потужності в суднових дизелях неможливе без спалювання в їхніх циліндрах рідкого палива нафтового походження. При цьому в результаті його згоряння в атмосферу викидаються випускні гази. Більшу частину випускних газів (до 99,0–99,2 %) становлять нейтральні та нетоксичні компоненти – продукти неповного згоряння (більшою частиною яких є діоксид вуглецю CO_2 і водяна пара H_2O) та повітря зі зниженим вмістом кисню. Невелику решту із загальної частини випускних газів становлять токсичні компоненти, які поділяються на дві групи. До першої групи належать продукти неповного згоряння палива – монооксид вуглецю CO , вуглеводні C_nH_m , альдегіди R-CHO та сажа C . Токсичні компоненти другої групи утворюються в результаті повного окислення хімічних елементів, що входять до складу палива та повітря – це оксиди азоту NO_x та сірки SO_x . Суднові ДВЗ, що знаходяться в експлуатації, вимагають постійного пошуку ефективних способів зниження токсичності випускних газів, насамперед викидів оксидів азоту NO_x [3; 4]. Вміст оксидів азоту у випускних газах регламентується вимогами Annex VI Міжнародної конвенції MARPOL та залежить від року побудови судна та частоти обертання валу дизеля (табл. 1) [5; 6].

Таблиця 1

**Максимальна концентрація оксидів азоту (NO_x , г/кВт·год)
в випускних газах суднових дизелів відповідно до вимог Annex VI MARPOL**

Рівень	Частоти обертання валу, об/хв		
	$n < 130$	$130 < n < 2000$	$n > 2000$
Tier I – для суден, збудованих після 2000 р.	17,0	$45n^{-0,2}$	9,8
Tier II – для суден, збудованих після 2011 р.	14,4	$44n^{-0,23}$	7,7
Tier III – для суден, збудованих після 2016 р.	3,4	$9n^{-0,2}$	2,0

Забезпечення вимог Tier I, Tier II можливе шляхом додаткової підготовки палива (наприклад, його гомогенізації, ультразвукової обробки та виготовлення водопаливних емульсій) та вдосконалення робочого циклу (наприклад, управління фазами подачі повітря, випуску газів та впорскування палива). Забезпечення

вимог Tier III можливо лише через використання додаткових технічних систем та пристроїв. Найбільш поширеними з них є: система очищення випускних газів – Selective Catalytic Reduction (SCR); системи рециркуляції – Exhaust Gas Recirculation (EGR); система перепуску – Exhaust Gas Wastegate (EWR) [7, 8].

Постановка проблеми. Екологічні показники суднових дизелів внутрішнього згоряння нині займають основну позицію разом з іншими показниками їхньої роботи – енергетичними та економічними [9; 10]. Постійне підвищення потужності та кількості суднових дизелів, що встановлюються на судах морського та внутрішнього водного транспорту, призводить до пропорційного збільшення кількості випускних газів, що потрапляють в атмосферу та забруднюють її. Це змушує провідні фірми, що виробляють дизелі, а також наукові організації, які виконують відповідні дослідницькі розробки, постійно вдосконалювати методи щодо зниження емісії шкідливих компонентів випускних газів та їх негативного впливу на довкілля [11; 12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системи рециркуляції випускних газів насамперед розроблялися для автомобільного транспорту (як для бензинових, так і для дизельних двигунів) [13; 14]. Позитивний досвід їх застосування, а також необхідність пошуку нових рішень для забезпечення екологічних показників роботи дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту сприяли впровадженню даних систем до складу суднових енергетичних установок [15; 16]. Залежно від характеристик дизеля (конструкційного виконання, потужності, характеристик системи наддуву), щоб забезпечити процес рециркуляції випускних газів, використовуються різні схеми: високого тиску (High pressure – HP-EGR), низького тиску (Low pressure – LP-EGR) і комбінована система (High and Low pressure – HLP-EGR) [17, 18].

Система рециркуляції випускних газів (як низького, так і високого тиску) включає [19; 20]:

- клапан рециркуляції (за допомогою якого здійснюється керування потоком газів, що надходять на рециркуляцію) [21; 22];
- скруббер (призначений для очищення випускних газів від твердих незгорілих частинок під час їхнього повернення до циліндрів дизеля) із системою водяного зрошення та охолодження випускних газів [23; 24];
- газовий нагнітач (за допомогою якого забезпечується рециркуляція випускних газів у продувний ресивер або до компресора газового турбонагнітача) [25; 26].

Через повернення частини випускних газів у циліндр дизеля змінюється склад повітряного заряду, призначеного для згоряння палива. Передусім це призводить до зменшення коефіцієнта надлишку повітря та далі – до зниження інтенсивності згоряння та зменшення максимальної температури під час згоряння [27; 28]. Це стає основною причиною переривання ланцюгової реакції утворення оксидів азоту та зменшення рівня їх емісії. Водночас через перенесення частини процесу згоряння на лінію розширення збільшується процес догоряння палива, що відображається на підвищенні питомої витрати палива та температури випускних газів [29; 30]. Таким чином, розв'язання завдання підвищення екологічної ефективності суднових дизелів та зниження токсичності їхніх випускних газів стикається з дилемою підтримання температурної напруженості суднових дизелів та забезпечення їх економічності.

Формулювання цілей статті. У зв'язку з вищевикладеним, метою дослідження було визначення впливу системи рециркуляції випускних газів високого тиску на основні експлуатаційні показники роботи судових дизелів.

Виклад основного матеріалу. Дослідження виконувались на судовому малооборотовому дизелі 8G60ME фірми MAN Diesel, обладнаному системою рециркуляції газів високого тиску – HP-EGR. Принципова схема системи рециркуляції випускних газів високого тиску судового малооборотового дизеля 8G60ME фірми MAN Diesel дана на рис. 1.

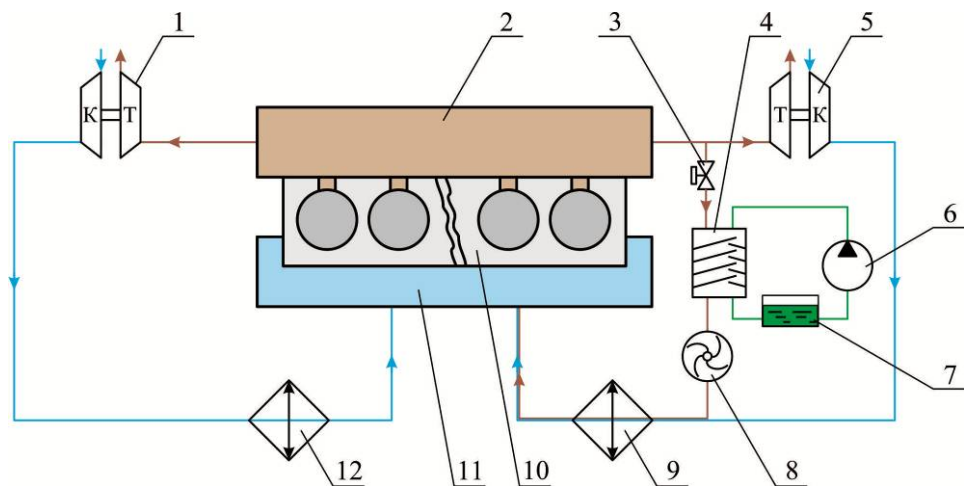


Рис. 1. Принципова схема системи рециркуляції випускних газів високого тиску судового малооборотового дизеля 8G60ME фірми MAN Diesel:

- 1, 5 – газотурбонагнітач; 2 – випускний колектор; 3 – керуючий клапан системи рециркуляції випускних газів високого тиску; 4 – скрублер; 6 – насос подачі прісної води в систему очищення та охолодження випускних газів;
7 – цистерна прісної води системи очищення та охолодження випускних газів;
9, 12 – охолоджувач наддувного повітря; 10 – судовий дизель;
11 – продувний ресивер; Т, К – газова турбіна та повітряний компресор газотурбонагнітачів

Система працює в такий спосіб. Випускні гази з циліндрів дизеля 10 надходять у загальний випускний колектор 2 і далі до газотурбонагнітачів 1 і 5, після чого через газовипускную трубу видаляються в атмосферу. Газотурбонагнітачі 1 і 5 забирають повітря з машинного відділення та після стиснення спрямовують його через охолоджувачі 9 і 12 в повітряний (продувний) ресивер 11. При цьому газотурбонагнітач 5 обладнаний системою рециркуляції випускних газів високого тиску, до складу якої входять керуючий клапан 3, скрублер очищення газів 4, цистерна 7 прісної води системи очищення та охолодження випускних газів та насос 6 подачі прісної води в систему очищення та охолодження випускних газів.

Під час експлуатації системи рециркуляції випускних газів високого тиску їх кількість, що повертається через систему очищення до продувального ресивера та циліндрів дизеля, регулюється клапаном 3. Випускні гази очищуються і поперечно охолоджуються в скрублері 4, після чого додатковим нагнітачем 8 подаються

на змішування з повітрям (що надходить з повітряного компресору газотурбонагнітувача 5) і далі прямують до продувного ресиверу 11.

Основною метою дослідження було визначення впливу системи HP-EGR на екологічні показники роботи суднового дизеля 8G60ME MAN Diesel, зокрема на рівень емісії оксидів азоту NO_x . Концентрація оксидів азоту вимірювалась у газо-випускній магістралі дизеля на відстані, що перебільшувала 10 м від виходу газів із газотурбонагнітача, що відповідало вимогам Технічного кодексу з NO_x . Вимірювання виконувались лише на сталих режимах роботи, що відповідали 60 %, 70 %, 80 % та 90 % від номінального навантаження. При цьому на кожному з режимів ступень рециркуляції поступово змінювався та становив 5 %, 10 %, 15 % та 20 %. На кожному з режимів дослідження починалися з вимірювання концентрації NO_x за умови роботи дизеля без використання системи HP-EGR ($\text{EGR}=0\%$). Навігаційні переходи дозволяли виконувати дослідження на кожному з режимів протягом 1,5–2,0 годин, що забезпечувало стабільність всіх контрольованих показників – частоти обертання та потужності дизеля, концентрації оксидів азоту у випускних газах, а також їх температури. Під час дослідження на кожному з режимів підтримувались постійними значення температури охолоджуючої води та змащувального мастила, а також фази паливоподачі та випуску газів. Результати досліджень з визначення зміни кількісних показників емісії оксидів азоту для різних умов проведення експерименту відображені на рис. 2.

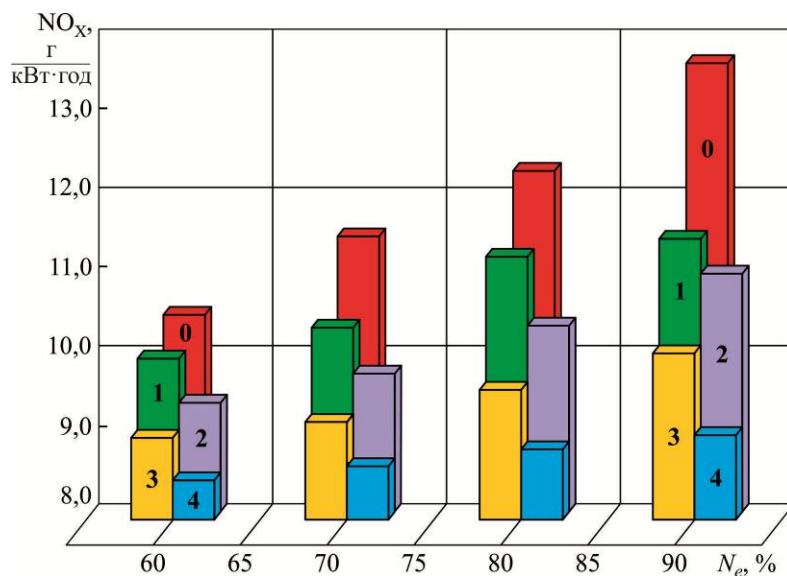


Рис. 2. Зміна концентрації оксидів азоту NO_x , г/(кВт·год) у випускних газах дизеля 8G60ME MAN Diesel для різного ступеня рециркуляції:
0 – робота без рециркуляції, $\text{EGR}=0\%$; 1 – $\text{EGR}=5\%$; 2 – $\text{EGR}=10\%$;
3 – $\text{EGR}=15\%$; 4 – $\text{EGR}=20\%$

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

виконувалось визначення відносного зменшення емісії оксидів азоту NO_x . При цьому як NO_x^0 приймалась концентрація оксидів азоту у випадку, коли $\text{EGR}=0\%$; як NO_x^i – концентрація оксидів азоту для інших значень ступеня рециркуляції EGR (5 %, 10 %, 15 %, 20 %). За отриманими при цьому значеннями побудована діаграма (рис. 3).

Одним із негативних факторів, що пов'язані з використанням системи рециркуляції газів, є збільшення температури газів на виході з циліндрів. Це зумовлюється 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.

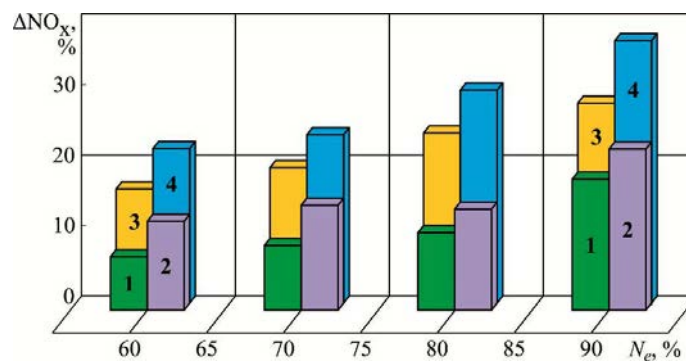


Рис. 3. Відносне зменшення емісії оксидів азоту NO_x з випускними газами дизеля 8G60ME MAN Diesel для різного ступеня рециркуляції:
1 – $\text{EGR}=5\%$; 2 – $\text{EGR}=10\%$; 3 – $\text{EGR}=15\%$; 4 – $\text{EGR}=20\%$

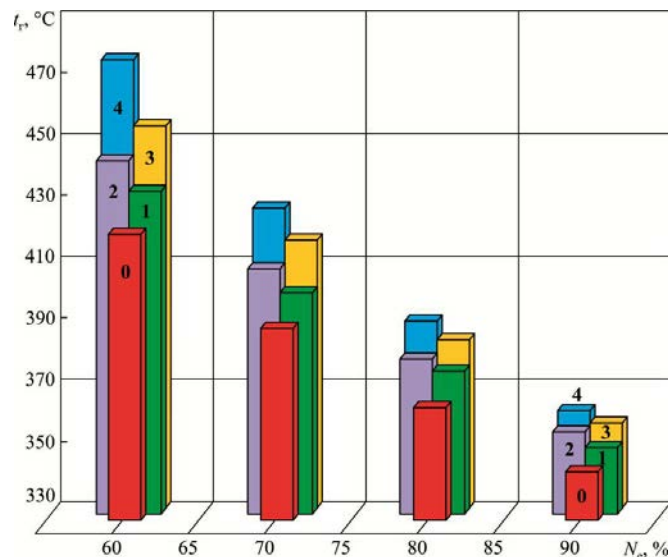


Рис. 4. Зміна температури випускних газів t_g , °C дизеля 8G60ME MAN Diesel для різного ступеня рециркуляції, %:
0 – робота без рециркуляції, $\text{EGR}=0\%$; 1 – $\text{EGR}=5\%$; 2 – $\text{EGR}=10\%$; 3 – $\text{EGR}=15\%$; 4 – $\text{EGR}=20\%$

Висновки. Необхідність забезпечення екологічних параметрів роботи суднових дизелів (зокрема, емісії NO_x з випускними газами) змушує використовувати додаткові технологічні рішення. Одним із таких варіантів є комплектація суднових дизелів системами рециркуляції випускних газів високого тиску HP-EGR, що забезпечують примусову подачу в циліндр частини випускних газів із газовипускної системи.

Під час проведення експериментів на судовому малообертовому дизелі 8G60ME MAN Diesel встановлено, що зміна ступеня рециркуляції випускних газів у діапазоні 5–20 % забезпечує зниження концентрації оксидів азоту NO_x у випускних газах відповідно на 5,7–38,5 % залежно від навантаження дизеля, яке в експериментах змінювалися в інтервалі $N_e = (0,6 \dots 0,9) N_{\text{еном}}$. Причому найбільші значення зниження концентрації оксидів азоту NO_x у випускних газах відповідають інтервалу навантажень $(0,8 \dots 0,9) N_{\text{еном}}$, 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 з цим під час вибору експлуатаційних режимів роботи судового дизеля, що оснащений системою рециркуляції випускних газів, необхідно враховувати не лише екологічну ефективність, але й зміни температурних навантажень на циліндрову групу та газовипускну систему дизеля.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Tkachenko, I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships. *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. 2022. Вип. 45. С. 5–16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
2. 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. <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
3. 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 : науково-технічний збірник*. 2023. Вип. 47. С. 157–171.
4. Sagin, A.S., Zablotzkyi, Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. 2021. № 7–8. P. 14–17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
5. Сагін, С.В., Куропятник, О.А. Використання системи рециркуляції випускних газів високого 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>.

6. Побережний, Р.В., Сагін, С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту. *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. 2020. Вип. 41. С. 5–9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
7. Petrychenko, O. Levinskyi, 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.
8. 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>.
9. 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. № 7–8. P. 36–43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
10. 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>.
11. 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. № 12. 1440 p. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.
12. Petrychenko, O., Levinskyi, M., Goolak, S., Lukoševičius, V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport. *Sustainability*. 2025. V. 17. P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
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. № 18(11). P. 1535–1546. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2128558>.
14. Заблоцький, Ю.В. Підвищення економічності роботи суднових дизелів. *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. 2020. Вип. 40. С. 12–16. DOI: 10.31653/smf340.2020.12-16.
15. Petrychenko, O. Levinskyi, M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport. *Transport Systems and Technologies*. 2024. № 43. P. 21–36.
16. Сагін, С.С., Сагін, С.В. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден. *Водний транспорт : збірник наукових праць*. 2024. Вип. 1(39). С. 215–225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
17. Сагін, С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів. *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. 2018. Вип. 38. С. 132–142.

18. 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.
19. Заблоцький, Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок. *Вісник Одеського національного морського університету*. 2020. №2(62). С. 106–119. DOI: 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.
20. Сагін, С.В., Столярик, Т.О. Динаміка суднових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками. *Автоматизація суднових технічних засобів* : збірник наукових праць. 2021. Вип. 27. С. 108–119.
21. Сагін, С.В., Мадей, В.В., Сагін, А.С. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі. *Автоматизація суднових технічних засобів* : науково-технічний збірник. 2021. Вип. 27. С. 93–107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.
22. 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.
23. 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.
24. Сагін, С.В., Побережний, Р.В. Аналіз основних способів зниження емісії оксидів азоту дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2022. Вип. 44. С. 132–141. doi: 10.31653/smf44.2022.132-141.
25. Руснак, Д.Ю., Сагін, С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 40. С. 49–54. DOI : 10.31653/smf340.2020.49-54.
26. 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
27. Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. Applying of fuel additives in marine diesel engines. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2021. Вип. 43. С. 5–17. doi: 10.31653/smf343.2021. 5-17.
28. Марченко, О.О., Сагін, С.В. Вдосконалення процесу очищення судових важких палив. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 41. С. 10–14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
29. Зверьков, Д.О., Сагін, С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 41. С. 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.

30. 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. № 7–8. P. 36–43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

REFERENCES

1. 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.
2. 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>.
3. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, S.S., Chimshir, V.I., Razinkin, R.O. (2023). Analiz ekologichnoi stiičnosti ta energetichnoi efektyvnosti vykorystannya scrubernogo ochishchennya vipusknich gaziv dizeliv sudden morskogo transportu. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 47, 157–171.
4. Sagin, A.S., Zablotyskyi, Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels. (2021). *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 7–8, 14–17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
5. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2025). Vikoristannia sistemi recirkulyacii vipusknich gaziv nizkogo tisku dlya zabezpechennya ekologichnykh pokaznykiv sudnovih dizelei. *Materials of the International Conference «Marine Power Plants & Operation MPP&O-2025»*. 2025. <https://2025.depas.od.ua>.
6. Poberezhniy, R.V., Sagin, S.V. Zabezpechennya ekologichnykh pokaznykiv dizeliv suden richkovogo ta morskogo transportu. (2020). *Sudnovi energetichni ustanovki*, 41, 5–9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
7. 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.
8. 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>.
9. 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>.
10. 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>.

11. 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>.
12. 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>.
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. Zablotskyi, Yu.V. (2020). Pidvishenya ekonomichnosti roboti sudnovih dizeliv. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 40, 12–16. DOI: 10.31653/smf340.2020.12-16.
15. 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.
16. 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.
17. Sagin, S.V. (2018). Zнизhenya energetichnih vtrat v precizionih parah palivnoi aparaturi sudnovich dizeliv. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 38, 132–142.
18. Sagin, S.V., Suvorov, P.S., Bondar, S.A. (2023). Rozrobka metodu ocinki rizikiv vineknennya avariinih podii pid chas eksplyatacii dizeliv morskih suden. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 47, 122–130. doi: 10.31653/smf47.2023.122-130.
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., Stolyaryk, T.O. (2021). Dinamika sudnovih dizeliv pid chas vikoristanya motornich mastil z rizznimi structurnimi harakteristikami. *Avtomatizaciya sudnovih tehnicnih zasobiv*, 27, 108–119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
21. 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.
22. Sagin, S.V., Bondar, S.A. (2023). Metod poperedzhenya avariinih situacii pid chas eksplyatacii sudnovih dizeliv za analizom potocu vidmov iogo osnovnih vuzliv. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 46, 101–109. doi: 10.31653/smf46.2023.101-109.
23. Sagin, S.V., Sagin, A.S. (2023). Control ta diagnostuvanya nadiinosti ta ekonomichnosti dizeliv morskih ta richkovih zasobiv transportu. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 46, 118–131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.

24. Sagin, S.V., Poberezhniy, R.V. Analiz osnovnich sposobiv znizhenya emisii oksidiv azotu dizeliv suden morskogo ta vnutrishnego vodnogo transportu. (2022). Sudnovi energetichni ustanovki, 44, 132–141. doi: 10.31653/smf44.2022.132-141.
25. Rusnak, D.Y., Sagin, S.V. (2020). Zabezpechennya ekologichnich vumog pri ultrazvukovii desulphurizacii vuglevodnich paliv. Sudnovi energetichni ustanovki, 40, 49–54. DOI : 10.31653/smf340.2020.49-54.
26. 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.
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. Marchenko, O.O., Sagin, S.V. (2020). Vdoskonalennya procesu ochishenya sudnovih vazhkih paliv. Sudnovi energetichni ustanovki, 41, 10–14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
29. 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.
30. 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>.