

ПІДТРИМАННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ МОРСЬКИХ СУДЕН ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ КАТАЛІТИЧНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

О.А. Куропятник

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

Анотація

Вступ. Експлуатація суден морського транспорту нерозривно пов'язана з викидом в атмосферу шкідливих речовин, що утворюються в циліндрі дизеля під час згоряння палива. Одними з наднебезпечних з них є оксиди азоту, емісія яких регламентується вимогами MARPOL. Найбільш ефективне очищення випускних газів від оксидів азоту забезпечують системи каталітичного відновлення. Водночас через використання в цих системах сечовини як реагенту збільшується емісія діоксиду вуглецю. Через підвищення парникового ефекту це сприяє глобальному потепленню. **Мета** дослідження – визначення оптимальних режимів роботи суднової системи каталітичного відновлення випускних газів суднових дизелів. При цьому під оптимальними розуміються такі, за яких забезпечується мінімальне підвищення емісії діоксиду вуглецю з одночасним підтриманням високого рівню зниження емісії оксидів азоту. **Результати.** Дослідження виконувалися на судні класу Gas Carrier водотоннажністю 127645 тонн із двома головними двигунами 5X72DF Hyundai-WinGD та трьома допоміжними двигунами 6H35DF Hyundai-HiMSEN, випускні гази яких піддавалися каталітичному відновленню. Експериментально встановлені оптимальні режими, за яких відносне збільшення емісії діоксиду вуглецю не перевищує 2,3 % для обох типів дизелів. Емісія оксиду азоту для дизелів 5X72DF Hyundai-WinGD не перевищує 3,3 г/(кВт·год) та не перевищує 2,4 г/(кВт·год) для дизелів 6H35DF Hyundai-HiMSEN, що відповідає вимогам Додатка VI MARPOL. Відносне зниження емісії оксидів азоту на цих режимах становить 66,7–83,4 % для дизеля 5X72DF Hyundai-WinGD та 60,8–78,3 % для дизеля 6H35DF Hyundai-HiMSEN. **Висновки.** Системи каталітичного відновлення випускних газів суднових дизелів характеризуються наявністю оптимальних експлуатаційних режимів. Саме на цих режимах забезпечується мінімальне підвищення емісії діоксиду вуглецю з одночасним підтриманням високого рівню зниження емісії оксидів азоту. Збіг отриманих значень для малообертового дизеля 5X72DF Hyundai-WinGD та середньообертового дизеля 6H35DF Hyundai-HiMSEN свідчить про коректність проведення досліджень та можливості імплементації їх результатів на всі типи дизелів і систем каталітичного відновлення.

Ключові слова: екологічні показники, емісія діоксиду вуглецю, емісія оксидів азоту, морський транспорт, система каталітичного відновлення, судновий дизель.

MAINTAINING THE ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS OF SEAGOING
VESSELS WHEN USING CATALYTIC REDUCTION SYSTEMS FOR MARINE
DIESEL ENGINES

O.A. Kuropyatnyk

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. Operation of sea transport vessels is inextricably linked with the emission of harmful substances into the atmosphere, which are formed in the diesel engine cylinder during fuel combustion. One of the most dangerous of them is nitrogen oxides, the emission of which is regulated by MARPOL requirements. The most effective purification of exhaust gases from nitrogen oxides is provided by catalytic reduction systems. At the same time, due to the use of urea as a reagent in these systems, carbon dioxide emissions increase. This, due to the increase in the greenhouse effect, contributes to global warming. **The purpose** of the study is to determine the optimal operating modes of the ship's catalytic reduction system for marine diesel engines. The optimal ones are understood to be those that ensure a minimal increase in carbon dioxide emissions while maintaining a high level of reduction in nitrogen oxide emissions. **Results.** The studies were carried out on a Gas Carrier class vessel with a displacement of 127,645 tons with two main engines 5X72DF Hyundai-WinGD and three auxiliary engines 6H35DF Hyundai-HiMSEN, the exhaust gases of which were subjected to catalytic reduction. Optimal modes have been experimentally established, in which the relative increase in carbon dioxide emissions does not exceed 2.3% for both types of diesel engines. Nitrogen oxide emissions for 5X72DF Hyundai-WinGD diesel engines do not exceed 3.3 g/(kW·h) and do not exceed 2.4 g/(kW·h) for 6H35DF Hyundai-HiMSEN diesel engines, which meets the requirements of Annex VI of MARPOL. The relative reduction in nitrogen oxide emissions in these modes is 66.7–83.4% for the 5X72DF Hyundai-WinGD diesel engine and 60.8–78.3% for the 6H35DF Hyundai-HiMSEN diesel engine. **Conclusions.** Catalytic reduction systems for marine diesel engines are characterized by the presence of optimal operating modes. It is in these modes that the minimum increase in carbon dioxide emissions is ensured while maintaining a high level of reduction in nitrogen oxide emissions. The coincidence of the values obtained for the low-speed diesel engine 5X72DF Hyundai-WinGD and the medium-speed diesel engine 6H35DF Hyundai-HiMSEN indicates the correctness of the research and the possibility of implementing their results on all types of diesel engines and catalytic reduction systems.

Key words: carbon dioxide emissions, catalytic reduction system, environmental performance, marine diesel, maritime transport, nitrogen oxide emissions.

Вступ. Морський транспорт є суттєвою складовою транспортної інфраструктури будь якої країни, що пов'язана з іншими морськими або океанськими шляхами. Морський транспорт є таким видом транспорту, який виконує багатотисячні (як за масою, так і за кількістю) трансокеанські перевезення вантажів [1; 2]. Подібні об'єми вантажу майже нереально, а в більшості випадків

неможливо виконувати іншими видами транспорту – залізничним та авіаційним. Визначене гарантує постійний подальший розвиток морських перевезень як одного з основних секторів загальних транспортних перевезень [3; 4].

Рух морських транспортних суден неможливий без використання енергетичних установок, найпоширенішим типом яких є двигуни внутрішнього згоряння [5; 6]. Будучи джерелом корисної енергії, суднові двигуни внутрішнього згоряння водночас із цим є джерелами шкідливих викидів, які надходять в атмосферу з їх випускними газами [7; 8]. Більшу частину випускних газів скидають небезпечні та нейтральні речовини та з'єднання – водяна пара H_2O , атомарний азот N_2 , незгорілий кисень O_2 . До складу випускних газів входять і токсичні речовини – монооксид вуглецю CO , оксиди сірки SO_x та азоту NO_x [9; 10]. Згоряння палива також супроводжується утворенням діоксиду вуглецю CO_2 , який не є токсичним компонентом випускних газів, але належить до парникових газів та впливає на збільшення парникового ефекту [11; 12].

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Оксиди азоту NO_x відносяться до забруднювальних речовин, яким приділяється найбільша увага з боку міжнародних і національних наглядових організацій та класифікаційних товариств [13; 14]. Це обумовлює актуальність досліджень, що спрямовані на зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах. Основним документом, що регламентує рівень емісії NO_x з випускними газами суднових дизелів, є Міжнародна конвенція із запобігання забрудненню з суден МАРПОЛ. Вимоги Додатка VI МАРПОЛ (що в тому числі обмежують значення емісії оксидів азоту) поширюються на всі двигуни, потужність яких перевищує 130 кВт. Максимальна концентрація оксидів азоту NO_x у випускних газах суднових дизелів залежить від року побудови судна та частоти обертання вала дизеля [15; 16]. Її значення наведені в табл. 1.

Таблиця 1
**Максимальна концентрація оксидів азоту (NO_x , г/кВт·год)
у випускних газах суднових дизелів відповідно
до вимог Додатка VI МАРПОЛ**

Рівень	Частоти обертання вала, 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

Виконання вимог Додатка VI та інших МАРПОЛ контролюється з боку Міжнародної морської організації та імплементовано в національні законодавства у понад 170 країн світу. Це підкреслює актуальність проблеми забезпечення екологічності морських суден, зокрема, у напрямі зниження викидів шкідливих речовин із випускними газами суднових дизелів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні судна (термін експлуатації яких не перебільшує 10 років) належать до Tier III вимог Annex VI MARPOL.

Підтримання необхідного рівня емісії оксидів азоту для подібних суден можливе лише за умови використання додаткових методів очищення випускних газів, які поділяються на первинні та вторинні [17; 18]. Первинні забезпечують створення сприятливих умов, які перешкоджають ланцюговій реакції утворення оксидів азоту під час згоряння палива [19; 20]. Насамперед вони спрямовані на зниження максимальної температури згоряння в циліндрі дизеля. Найпоширенішими з первинних методів є зволоження наддувного повітря, використання водопаливних емульсій, безпосереднє впорскування води в циліндр дизеля, рециркуляція випускних газів. Найбільш поширеним серед вторинних методів зниження емісії оксидів азоту є селективне каталітичне відновлення [21; 22]. Вторинні методи спрямовані на безпосереднє очищення випускних газів від оксидів азоту.

Системи селективного каталітичного відновлення (SCR) є самим ефективним серед всіх інших, що використовуються для зменшення концентрації оксидів азоту у випускних газах [23; 24]. За різними оцінками, вони забезпечують 95–98 % зниження емісії оксидів азоту, що потрапляють до атмосфери з випускними газами судових дизелів. Саме тому SCR є найпоширенішим зі способів зниження емісії оксидів азоту. Принципову схему очищення випускних газів за допомогою системи SCR наведено на рис. 1.

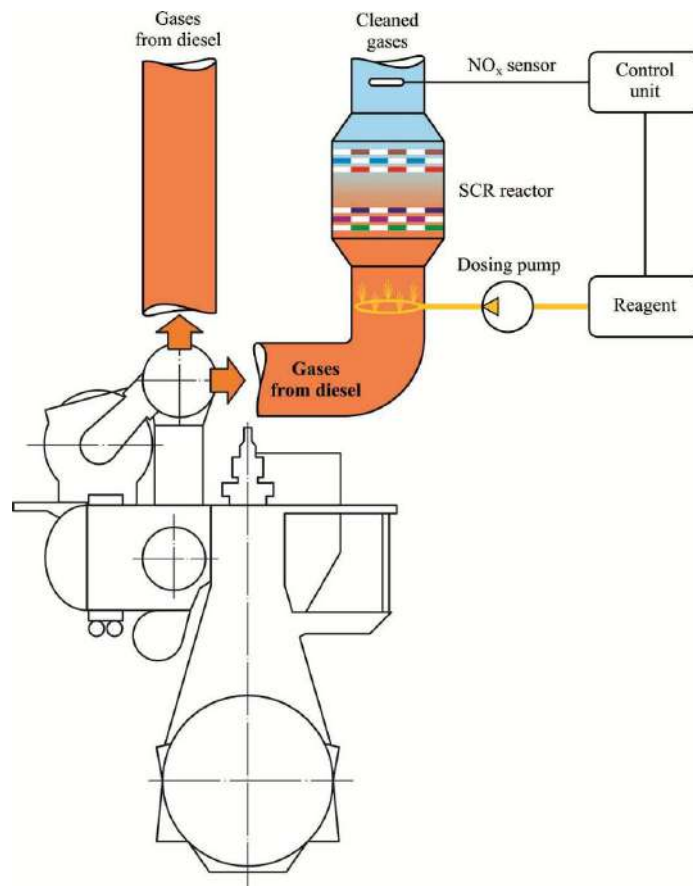
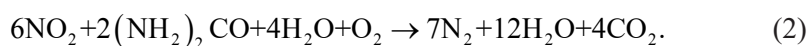
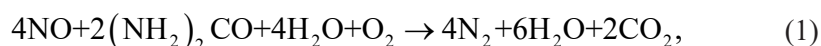


Рис. 1. Очищення випускних газів судового дизеля за допомогою системи селективного каталітичного відновлення – SCR

Випускні гази суднового дизеля прямують або випускною магістраллю, або через систему SCR. Основним елементом системи є SCR-реактор, саме в ньому відбуваються хімічні реакції, що забезпечують зниження емісії оксидів азоту. У потік випускних газів за допомогою насоса-дозатора впорскується реагент. У стаціонарній енергетиці, автомобільному та залізничному транспорті як реагент зазвичай використовується аміак NH_3 . У системах SCR, що встановлюються на морських суднах, як реагент використовується сечовина $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$. Суміш випускних газів і реагенту потрапляє всередину SCR-реактора, де на каталізаторі відбуваються такі реакції:



Це призводить до перетворення монооксиду NO та діоксиду NO_2 азоту в атомарний азот N_2 , який з іншими складовими випускних газів потрапляє до атмосфери. Остаточний вміст оксидів азоту у випускних газах контролюється за допомогою NO_x -сенсора, що встановлюється у випускній магістралі поза SCR-реактором. Інформація від NO_x -сенсора потрапляє до контрольного блоку, який забезпечує подачу необхідної кількості реагенту, а саме сечовини, до насоса-дозатора. Сечовина є одноразовим компонентом системи SCR. Вона випаровується в потоці випускних газів, перетворюється в інші речовини, та нова складова випускних газів видаляється до атмосфери. Поповнення суднових запасів сечовини виконується під час бункерування судна. Кількість сечовини, що приймається на борт судна (як і кількість палива) розраховується залежно від тривалості навігаційного переходу та можливості поповнення її запасів. Збереження сечовини під час морських переходів здійснюється в спеціальних танках. Підтримання її експлуатаційних характеристик забезпечується циркуляцією між танками, що розміщені поруч один з одним, або в об'ємі одного танку.

Рівняння (1), (2) свідчать, що процес очищення випускних газів від оксидів азоту в SCR-реакторі неминуче пов'язаний з утворенням діоксиду вуглецю CO_2 – газу, який сприяє глобальному потеплінню та є одним із визначальних під час оцінки парникового ефекту. На цей час рівень концентрації діоксиду вуглецю у випускних газах суднових дизелів не регламентується вимогами міжнародних або національних конвенцій. При цьому постійно впроваджуються заходи, спрямовані на зменшення викидів CO_2 . Таким чином, використання SCR як методу, що забезпечує максимальне зниження емісії оксидів азоту, призводить до підвищення емісії іншої негативної складової випускних газів – діоксиду вуглецю [25; 26].

Водночас слід зазначити, що до комплексної назви «оксиди азоту», крім раніше вказаних монооксиду азоту NO та діоксиду азоту NO_2 (які належать до канцерогенних речовин), входить також закис азоту N_2O . Відсотковий внесок цієї речовини до загальної кількості оксидів азоту значно менший, ніж NO та NO_2 , але саме закис азоту N_2O належить до парникових газів і володіє потенціалом глобального потепління, що майже в 300 разів перевищує аналогічний показник

Дослідження виконувалися на режимах, що відповідають навантаженню 25, 50, 75 та 100 % на головні двигуни 5X72DF Hyundai-WinGD та на допоміжні двигуни 6H35DF Hyundai-HiMSEN. Під час досліджень головні двигуни 5X72DF Hyundai-WinGD працювали з однаковою потужністю кожний на свій гвинт. Також однакова потужність підтримувалася на допоміжних двигунах 6H35DF Hyundai-HiMSEN у разі їх паралельної роботи.

Цикл випробувань починався з експлуатаційного режиму, що відповідав навантаженню 25 %, та ступінчасто змінювався на 50 % та далі на 75 % і на 100 %. Основні показники, визначенню яких присвячені дослідження, – це концентрація діоксиду вуглецю CO_2 та оксидів азоту NO_x у випускних газах. Фіксація цих показників виконувалася лише на сталих режимах роботи дизелів, які визначалися незмінними протягом як мінімум 30 хвилин: температури випускних газів, температури охолоджувальної води, температури циркуляційного мастила, максимального тиску згоряння, тиску наприкінці стиснення, середнього індикаторного тиску [27–30].

У системах SCR на кожному з навантажень на дизелі 5X72DF Hyundai-WinGD та 6H35DF Hyundai-HiMSEN дослідження виконувалися за умови 75, 80, 85, 90, 95 та 100 % подачі сечовини. Тривалість експлуатації дизелів та їх систем SCR на кожному з режимів становила 0,5–1,0 год. Це забезпечувало рівномірність теплових і динамічних навантажень, а також сталість контрольованих показників. Після цього проміжку часу виконувалася фіксація значень емісії діоксиду вуглецю CO_2 та оксидів азоту NO_x . Отримані в такий спосіб значення наведені у вигляді діаграм – рис. 3, 4.

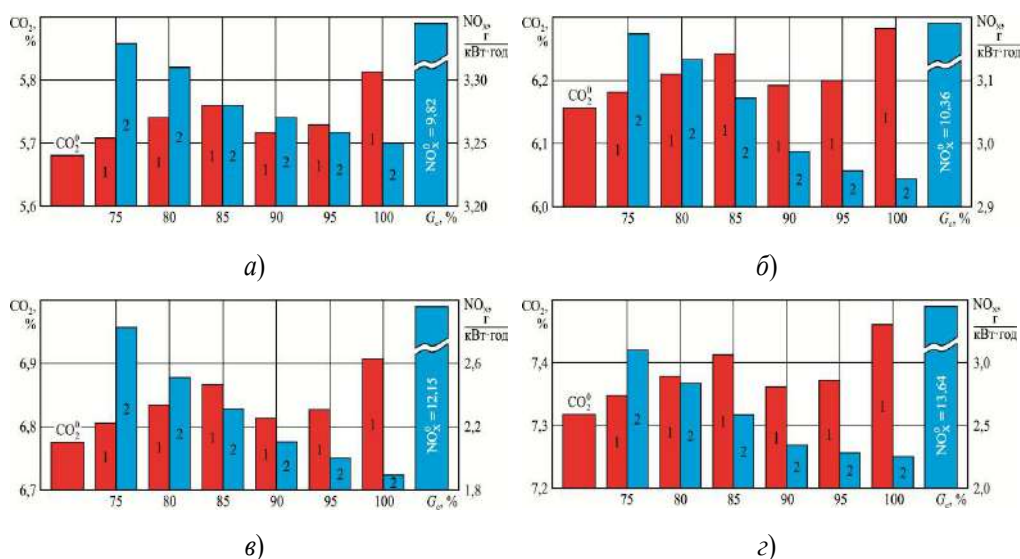


Рис. 3. Зміна емісії діоксидів вуглецю CO_2 та оксидів азоту NO_x під час використання системи HP-SCR на дизелі 5X72DF Hyundai-WinGD: а – навантаження 25 %; б – навантаження 50 %; в – навантаження 75 %; д – навантаження 100 % (CO_2^0 , NO_x^0 – емісія без використання SCR, G_c – відносна витрата сечовини)

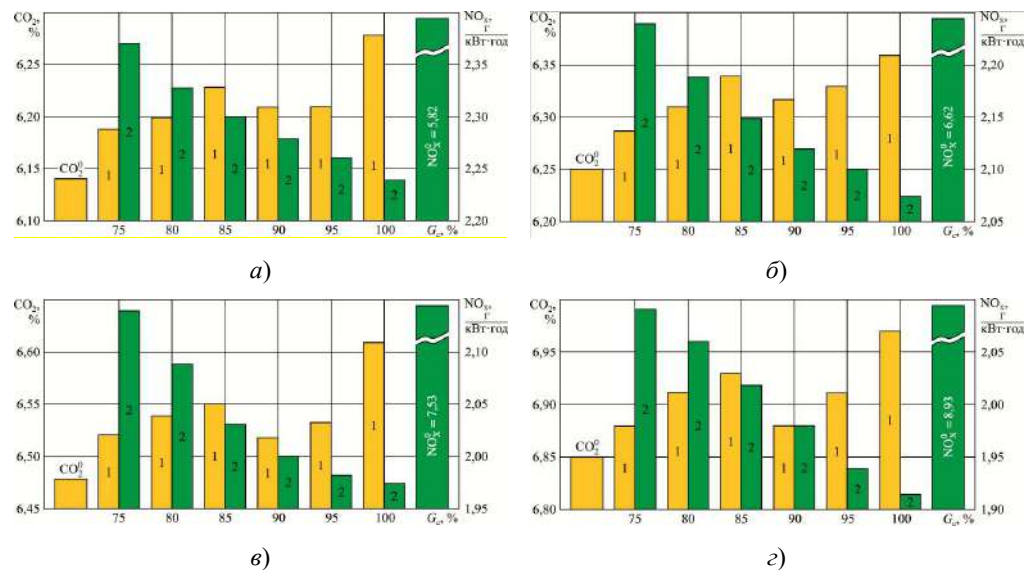


Рис. 4. Зміна емісії діоксидів вуглецю CO₂ та оксидів азоту NO_x під час використання системи LP-SCR на дизелі 6H35DF Hyundai-HiMSEN: а – навантаження 25 %; б – навантаження 50 %; в – навантаження 75 %; д – навантаження 100 % (CO₂⁰, NO_x⁰ – емісія без використання SCR, G_c – відносна витрата сечовини)

Визначимо, що обидва компоненти, які входять до складу випускних газів – діоксид вуглецю CO₂ та оксиди азоту NO_x – створюють негативний вплив на довкілля. Підвищення витрат сечовини пропорційно знижує рівень емісії оксидів азоту, але при цьому рівень емісії діоксиду вуглецю змінюється за нелінійною залежністю. Саме тому для визначення оптимальних режимів експлуатації системи SCR потрібне синергетичне рішення залежностей $CO_2 = f(G_c) \cap NO_x = f(G_c)$.

Висновки. Експериментальними дослідженнями, що виконувались у системах SCR суднового малообертового дизеля 5X72DF Hyundai-WinGD та суднового середньообертового дизеля 6H35DF Hyundai-HiMSEN, встановлено таке.

1. Сечовина як реагент, що використовується в системах SCR, сприяє збільшенню емісії діоксидів вуглецю на всіх експлуатаційних режимах роботи дизелів.

Відносне збільшення емісії CO₂ для дизеля 5X72DF Hyundai-WinGD залежно від відносної витрати сечовини (що змінювалась у діапазоні 75–100 %) становить 0,41–2,29 %. Ця залежність не є лінійною та у випадку 90–95 % витрати сечовини становить:

- під час 25 % навантаження на дизель – 0,70–0,88 %;
- під час 50 % навантаження на дизель – 0,65–0,81 %;
- під час 75 % навантаження на дизель – 0,59–0,74 %;
- під час 100 % навантаження на дизель – 0,55–0,68 %.

Відносне збільшення емісії CO₂ для дизеля 6H35DF Hyundai-HiMSEN залежно від відносної витрати сечовини (що змінювалась у діапазоні 75–100 %) становить 0,44–2,28 %.

У випадку 90–95 % витрати сечовини збільшення емісії CO_2 становить:

- під час 25 % навантаження на дизель – 1,14–1,16 %;
- під час 50 % навантаження на дизель – 1,12–1,28 %;
- під час 75 % навантаження на дизель – 0,62–0,77 %;
- під час 100 % навантаження на дизель – 0,44–0,88 %.

2. Збільшення витрати сечовини в діапазоні 75–100 % сприяє зменшенню емісії оксидів азоту на всіх експлуатаційних режимах роботи дизелів.

Для суднового дизеля 5X72DF Hyundai-WinGD використання системи SCR забезпечує зниження емісії оксидів азоту ΔNO_x на 66,1–83,8 %. При цьому для всіх навантажень на дизель (що змінювались у діапазоні 25–100 %) найбільш ефективними є режими, що відповідають 90–100 % відносної витрати сечовини.

Для суднового дизеля 6H35DF Hyundai-HiMSEN використання системи SCR забезпечує зниження емісії оксидів азоту ΔNO_x на 59,3–78,6 %. Для 25–100 % навантаження на дизель найбільше зниження емісії оксидів азоту спостерігається на режимах, що відповідають 90–100 % відносної витрати сечовини.

3. Зазначене свідчить про наявність оптимальних режимів роботи системи селективного каталітичного відновлення випускних газів суднових дизелів, які визначаються експериментально для кожного з дизелів. За результатами проведених досліджень найбільш оптимальними (з погляду мінімального підвищення емісії діоксиду вуглецю з одночасним підтриманням високого рівню зниження емісії оксидів азоту) є режими експлуатації системи SCR, на яких до контуру реактора подається 90 % відносної витрати сечовини. За цих умов спостерігається мінімальне підвищення емісії діоксиду вуглецю порівняно з режимами експлуатації суднових дизелів без використання системи SCR. Водночас рівень емісії оксидів азоту за цих обставин відповідає вимогам Tier III MARPOL.

4. Збіг отриманих значень для малообертового дизеля 5X72DF Hyundai-WinGD та середньообертового дизеля 6H35DF Hyundai-HiMSEN свідчить про коректність проведення досліджень і можливості імплементації їх результатів на всіх типи дизелів та систем SCR.

5. Подальші дослідження будуть спрямовані на визначення впливу сечовини (як основного реагенту в системі SCR) на зміну кожної з найбільш небезпечних складових оксидів азоту – монооксиду азоту NO , діоксиду азоту NO_2 та закису азоту N_2O .

ЛІТЕРАТУРА

1. 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>.
2. 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>.

3. 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: наук.-техн. зб.* 2023. Вип. 47. С. 122 - 130. DOI: 10.31653/smf47.2023.122-130.
4. 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>.
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. 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. Vol. 29 (4). P. 88–96. <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
7. 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.
8. 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>.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Сагін С. В., Куропятник О. А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами суднових дизелів. *Водний транспорт. Зб. наук. праць* 2024. Вип. 2 (40). С. 173–185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
17. 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.
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. 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>.
20. 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. No. 5 (1 (73)). P. 37–43. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.
21. 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.
22. Сагін С. В., Сагін А. С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2023. Вип. 46. С. 118–131. DOI: 10.31653/smf46.2023.118-131.
23. Сагін С. В., Мадей В. В., Сагін С. С., Чимшир В. І., Разінкін Р. О. Аналіз екологічної стійкості та енергетичної ефективності використання скрубєрного очищення випускних газів дизелів суден морського транспорту. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2023. Вип. 47. С. 157–171. DOI: 10.31653/smf47.2023.157-171.
24. Сагін С. В., Куропятник О. А. Визначення оптимальних режимів експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2024. Вип. 48. С. 100–113. DOI: 10.31653/smf48.2024.100-113.
25. 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.
26. 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 : наук.-техн. зб.* 2023. Вип. 46. С. 101–109. DOI: 10.31653/smf46.2023.101-109.
27. 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.
28. 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.
29. Заблоцький Ю. В., Сагін А. С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури суднових дизелів. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2022. Вип. 44. С. 121–131. DOI: 10.31653/smf44.2022.121-131.
30. 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.

REFERENCES

1. 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>.
2. 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>.
3. Sagin, S.V., Suvorov, P.S., Bondar, S.A. (2023). Rozrobka metodu ocinki rizikiv vineknenya avariinih podii pid chas eksplyatacii dizeliv morskih suden. *Ship power plants*, 47, 122–130. DOI: 10.31653/smf47.2023.122-130.
4. 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>.
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. 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>.
7. 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.
 8. 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>.
 9. Sagin, S.V., Poberezhniy, R.V. Analiz osnovnich sposobiv znizhenya emisii oksidiv azotu dizeliv suden morskogo ta vnutrishnego vodnogo transportu. (2022). *Ship power plants*, 44, 132–141. DOI: 10.31653/smf44.2022.132-141.
 10. 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.
 11. Poberezhniy, R.V., Sagin, S.V. (2020). Zabezpechenya ekologichnykh pokaznikov dizeliv suden richkovogo ta morskogo transport. *Ship power plants*, 41, 5–9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
 12. Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. (2021). Applying of fuel additives in marine diesel engines. *Ship power plants*, 43, 5–17. DOI: 10.31653/smf343.2021.5-17.
 13. Zablotskyi, Yu.V. (2020). Pidvishenya ekonomichnosti roboti sudnovih dizeliv. *Ship power plants*, 40, 12–16. DOI: 10.31653/smf340.2020.12-16.
 14. 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.
 15. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, A.S. (2021). Robota sudnovogo dizelya na biodizelnom palivi. *Automation of ship technical facilities*, 27, 93–107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.
 16. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2024). Viznachenya optimalnih rezhimiv procesiv upravlinnya vipusknimi gazami sudnovih duzeliv. *Water transport*, 2 (40), 173–185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
 17. 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.
 18. Marchenko, O.O., Sagin, S.V. (2020). Vdoskonalenya procesu ochishenya sudnovih vazhkih paliv. *Ship power plants*, 41, 10–14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
 19. 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>.

20. 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>.
21. Rusnak, D.Y., Sagin, S.V. (2020). Zabezpechennya ekologichnich vumog pri ultrazvukovii desulphurizacii vuglevodnich paliv. *Ship power plants*, 40, 49–54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
22. Sagin, S.V., Sagin, A.S. (2023). Control ta diagnostuvannya nadiinosti ta ekonomichnosti dizeliv morskih ta richkovih zasobiv transportu. *Ship power plants*, 46, 118–131. DOI: 10.31653/smf46.2023.118-131.
23. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, S.S., Chimshir, V.I., Razinkin, R.O. (2023). Analiz ekologichnoi stiicosti ta energetichnoi effektivnosti vicoristannya scrubernogo ochishenya vipusknych gaziv dizeliv sudden morskogo transportu. *Ship power plants*, 47, 157–171. DOI: 10.31653/smf47.2023.157-171.
24. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2024). Vznachennya optimalnih rezhimiv ekspluatacii sudnovih dviguniv vnutrashnogo zgoryannya pid chas vikoristannya biodizelnogo paliva. *Ship power plants*, 48, 100–113. DOI: 10.31653/smf48.2024.100-113.
25. Sagin, S.S., Sagin, S.V. (2024). Vicoristannya shtuchnogo intelektu v situaciyah nadmirnogo zblizhenya suden. *Water transport*, 1 (39), 215–225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
26. Sagin, S.V., Bondar, S.A. (2023). Metod poperedzhenya avariinih situacii pid chas ekspluatacii sudnovih dizeliv za analizom potocu vidmov iogo osnovnih vuzliv. *Ship power plants*, 46, 101–109. DOI: 10.31653/smf46.2023.101-109.
27. Sagin, S.V. (2018). Znizhenya energetichnih vtrat v precizionih parah palivnoi aparaturi sudnovich dizeliv. *Ship power plants*, 38, 132–142.
28. Sagin, S.V., Stolyaryk, T.O. (2021). Dinamika sudnovih dizeliv pid chas vikoristannya motornich mastil z rizmimi structurnimi harakteristikami. *Automation of ship technical facilities*, 27, 108–119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
29. Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. (2022). Vznachennya dunamichnih navantazhen pid chas zmini rezhimiv mashchennya preciziinich par palivnoi aparaturi sudnovih dizeliv. *Ship power plants*, 44, 121–131. DOI: 10.31653/smf44.2022.121-131.
30. Zverkov, D.O., Sagin, S.V. (2020). Znizhenya mechanichnih vtrat u sudnovich dizelyach. *Ship power plants*, 41, 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 27.08.2025

Дата публікації: 30.10.2025