

УДК 629.5

DOI: 10.31653/2306-5761.38.2025.104-115

ENSURING THE ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS OF SEA PASSAGES IN THE COASTAL WATERS OF NORTHERN EUROPE

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ МОРСЬКИХ ПЕРЕХОДІВ В ПРИБЕРЕЖНИХ АКВАТОРІЯХ ПІВНІЧНОЇ ЄВРОПИ

S. Sagin , D.Sc., professor, O. Kuropyatnyk , Ph.D.

С.В. Сагін, д.т.н., професор, О.А. Куропятник, д-р філософії

National University "Odesa maritime academy", Ukraine

Національний Університет «Одеська морська академія», Україна

ABSTRACT

This study examines environmental protection during sea passages in the coastal waters of Northern Europe, focusing on nitrogen oxides (NO_x) from marine diesel exhaust as a primary source of uncontrolled air pollution, especially hazardous in high-humidity regions. In response, MARPOL designates special emission control areas that impose stricter NO_x limits. We evaluate exhaust gas recirculation (EGR) as a principal, widely used measure to meet these limits during operations within such areas. Experiments were conducted on a 65,000-DWT general cargo vessel trading in Northern European special areas. The ship was fitted with a combined EGR arrangement incorporating both high- and low-pressure loops. We propose assessing EGR effectiveness—and, by extension, the environmental friendliness of passages—in terms of an environmental sustainability index referenced to NO_x emissions. Results show that the integrated EGR system enabled the vessel to meet MARPOL NO_x requirements across test conditions. The most effective operating modes corresponded to the highest practicable recirculation rates of both loops. Under these conditions, the environmental sustainability index reached 30.00–35.88%, representing the maximum measured reduction potential within the study. These findings support complex EGR control as a viable pathway for compliant, lower-impact operations in Northern European coastal waters.

Keywords: coastal waters, environmental indicators, exhaust gas recirculation system, navigational passage, nitrogen oxide emissions, maritime transport, special ecological areas.

АНОТАЦІЯ

Це дослідження розглядає питання екологічного захисту під час морських переходів у прибережних водах Північної Європи, зосереджуючись на оксидах азоту (NO_x) з вихлопів суднових дизелів як на основному джерелі неконтрольованого забруднення повітря — особливо небезпечному в регіонах із високою вологістю. У відповідь MARPOL визначає спеціальні зони контролю за викидами, у яких діють жорсткіші обмеження на NO_x. Ми оцінюємо рециркуляцію відпрацьованих газів (EGR) як провідний і широко застосовуваний захід для дотримання цих вимог під час роботи у таких зонах. Експерименти було проведено на суховантажному судні дедвейтом 65 000 т, що виконувало рейси у спеціальних районах Північної Європи. Судно було оснащене комбінованою EGR-системою з контурами високого та низького тиску. Ми пропонуємо оцінювати ефективність EGR — і, відповідно, екологічність переходів — за індексом екологічної сталості, прив'язаним до викидів NO_x. Результати показують, що інтегрована система EGR дала змогу судну відповідати вимогам MARPOL щодо NO_x в усіх випробувальних режимах. Найефективнішими виявилися режими роботи, що відповідають максимально можливим ступеням рециркуляції в обох контурах. За цих умов індекс екологічної сталості досягав 30,00–35,88 %, що становить максимальний зафіксований у дослідженні потенціал

зниження. Ці результати підтверджують, що складне керування EGR є життєздатним шляхом до нормативно сумісної та менш впливової на довкілля експлуатації у прибережних водах Північної Європи.

Ключові слова: екологічні показники, емісія оксидів азоту, навігаційний перехід, морський транспорт, прибережна акваторія, система рециркуляції випускних газів, спеціальні екологічні райони.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями

Морські перевезення повинні забезпечувати не лише своєчасну доставку вантажів відповідно до укладених контрактів, але також й виконання вимог щодо екологічної експлуатації суден та їх енергетичних установок [1-3]. Перш за все це пов'язано з вимогами Міжнародної конвенції MARPOL щодо попередження забруднення зі суден. Додаток VI MARPOL регламентує рівень забруднення повітряного середовища з суден морського та внутрішнього водного транспорту. Цим додатком встановлюються обмеження щодо викидів оксидів сірки, оксидів азоту, летучих органічних речовин, а також речовин, що руйнують озоновий шар [4-6].

Однією з найбільших небезпек, що призводить до неконтрольованого забруднення атмосфери, є емісія оксидів азоту з випускними газами суднових дизелів [7, 8]. Процес отримання корисної роботи в циліндрі суднового дизеля, її трансформація до крутного моменту колінчатого валу та далі в обертальних рух гребного гвинта неможливий без використання рідкого палива – як правило нафтового, але також в деяких енергетичних установках біологічного походження [9, 10]. В обох випадках згоряння палива супроводжується неминучим утворенням та подальшим видаленням з в циліндра дизеля випускних газів, до складу яких (разом з небезпечними) входять шкідливі компоненти, одним з яких є оксиди азоту [11, 12].

Поняття «оксиди азоту» є загальною (комплексною) назвою. Залежно від зміни валентності азоту існують закис азоту N_2O , монооксид азоту NO , триоксид діазоту N_2O_3 , двооксид азоту NO_2 , пентаоксид N_2O_5 . З вказаних з'єднань найбільшу небезпеку на довкілля створюють монооксид азоту NO та діоксид азоту NO_2 . Саме ці сполуки після потрапляння в атмосферу та реакції з водяною парою, що знаходиться в повітрі, утворюють азотну кислоту HNO_3 , яка у вигляді опадів повертається на водну та материкову поверхні.

Додаток VI MARPOL встановлює рівневий підхід щодо емісії оксидів азоту від суднових дизелів, при цьому максимальна концентрація оксидів азоту з випускними газами залежить від року побудови судна та частоти обертання дизеля. Графічні та аналітичні залежності, що відображають ці показники наведені на рис. 1.

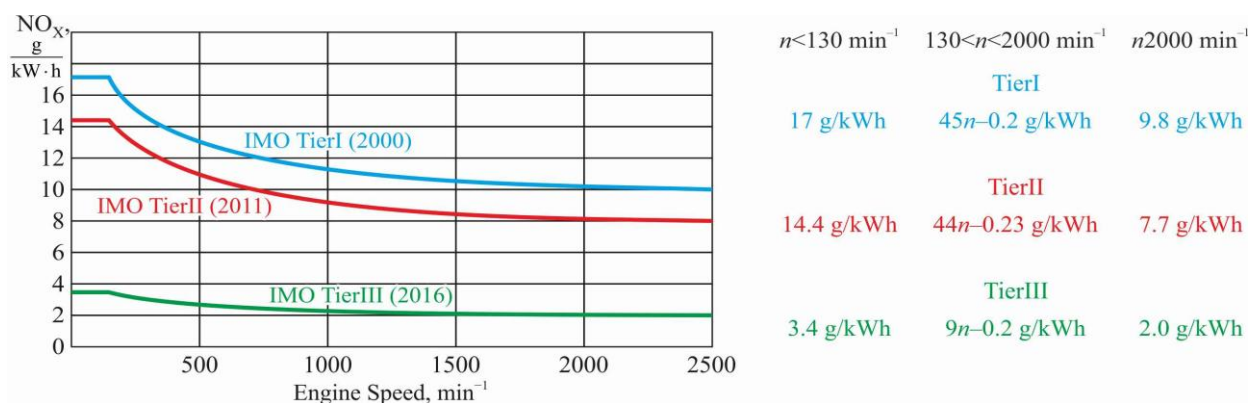


Рис. 1. Вимоги Додатку VI MARPOL щодо максимального вмісту оксидів азоту у випускних газах суднових дизелів

Особливу небезпеку оксиди азоту виявляють у географічних районах з підвищеною вологістю. За цих умов утворення азотної кислоти здійснюється за більш короткий час, а її осідання відбувається з більшою швидкістю [13-15]. В комплексі ці підвищує інтенсивність забруднення акваторій або континентів. Саме за цих підстав у MARPOL визначені спеціальні екологічні райони (Emission control areas – ECA), в яких діють більш суворі вимоги щодо емісії оксидів азоту з випускними газами [16-18]. Відносно Північної Європи до таких районів відносяться Балтійське море та частина Північного моря, включаючи пролив Ла-Манш (рис. 2).

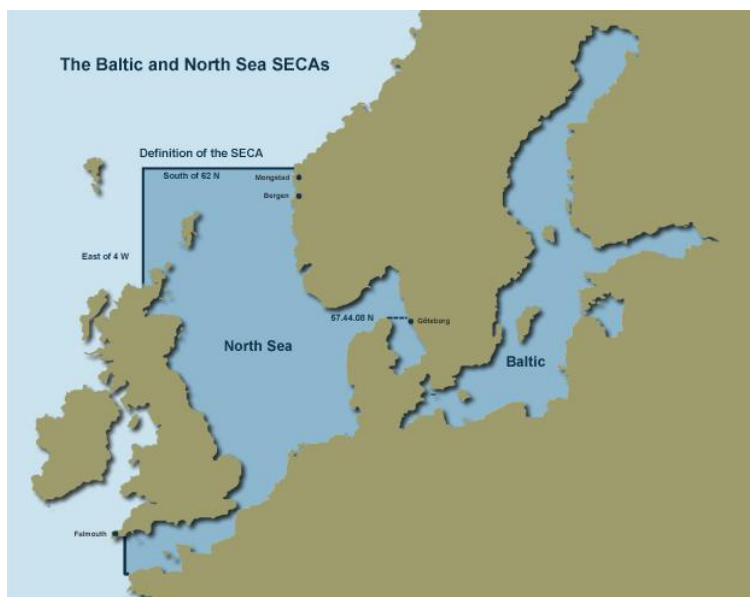


Рис. 2. Спеціальні екологічні райони Північної Європи

Вимоги Додатку VI MARPOL щодо зниження емісії шкідливих речовин з випускними газами енергетичних установок суден морського та внутрішнього водного транспорту односпрямовані з пріоритетними напрямками діяльності Європейського Союзу відносно створення «зеленої», екологічно безпечної Зони для країн, що входять до його складу. Ці напрямки передбачають запобігання забруднення континентальних районів та прибережних акваторій токсичними та небезпечними речовинами, які є утворюються під час експлуатації стаціонарної та транспортної (у тому числі морської) енергетики.

На теперішній час всі Європейські країни ратифікували Конвенцію MARPOL. Виконання її вимог є обов'язковим для всіх країн, що входять до Міжнародної морської організації (International Maritime Organization – IMO) [19, 20]. Це підкреслює актуальність та додає важливості до досліджень, що спрямовані на забезпечення екологічності морських переходів в прибережних акваторіях Північної Європи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частини загальної проблеми

Проблеми захисту повітряного басейну та зниження забруднення повітря з суден особливо гостро виникла на початку XXI-го століття разом з інтенсивним зростанням потужності енергетичних установок та кількості морських суден, збільшенням інтенсивності морських перевезень та підвищенням щільності морського трафіку у прибережних акваторіях. Розв'язання завдання зі забезпечення екологічності морських суден щодо емісії оксидів азоту можливо різними шляхами та залежить від технічних характеристик суден та районів їх експлуатації [21, 22]. Більшість суден морського та внутрішнього водного транспорту

підпадають під вимоги Tier II та Tier III MARPOL, тобто побудовані та спущені на воду після 01.01.2011 р. або 01.01.2016 р. відповідно.

Виконання вимог Tier II можливо шляхом конструкційних заходів [23, 24] або оптимізації робочого процесу дизеля [25, 26] та оптимізації процесу впорскування палива в його циліндр [27, 28]. Найбільшого поширення серед конструкційних заходів знайшли вдосконалення паливної апаратури високого тиску [29, 30], використання водопаливних емульсій [31, 32], зволоження наддувного повітря [33, 34], застосування фільтрів та фільтраційних установок [35, 36]. Серед методів оптимізації робочого процесу найбільше розповсюдження отримали використання циклу Міллера, управління процесом випуску газів, вдосконалення процесу наддуву [37, 38]. Оптимізації процесу впорскування палива полягає у визначенні фаз подачі палива та закону подачі палива, які забезпечують максимальну інтенсивність згоряння палива та мінімальну емісію оксидів азоту [39, 40].

Виконання вимог Tier III можливо лише за рахунок використання спеціальних технічних заходів та систем додаткового очищення випускних газів. До них відносяться системи рециркуляції (Exhaust gas recirculation system – EGR) та системи каталітичного відновлення (Selective catalytic reduction system – SCR). Найбільшою ефективністю характеризуються системи SCR, вони забезпечують 90...95 % зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах. За різними даними системи EGR спроможні знизити вміст оксидів азоту у випускних газах на 70...75 % при цьому постійно виникає завдання визначення оптимального ступеню рециркуляції на різних експлуатаційних режимах роботи дизеля.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

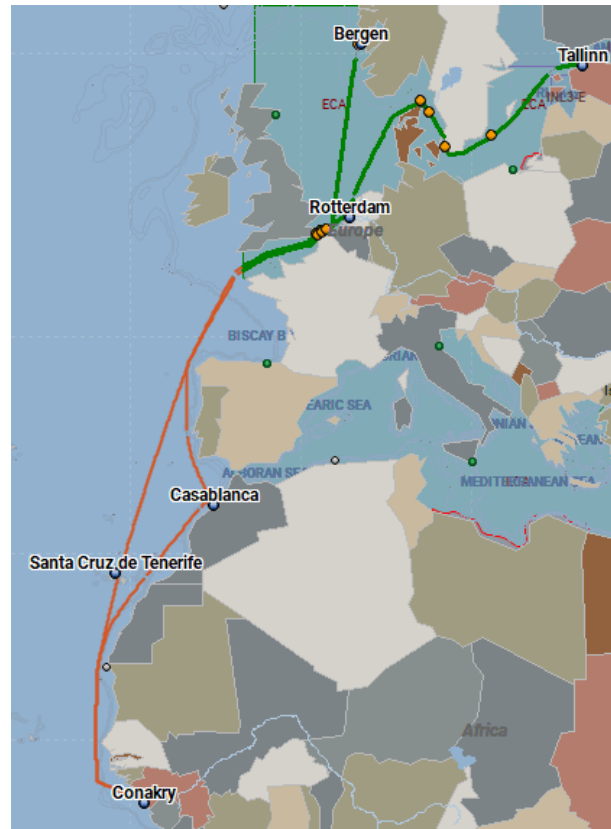
Завданням дослідження було експериментальне визначення оптимальних режимів роботи системи рециркуляції випускних газів, за якими забезпечується максимальне зниження емісії оксидів азоту та максимальний рівень екологічності морських переходів під час знаходження судна в прибережних акваторіях Північної Європи.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

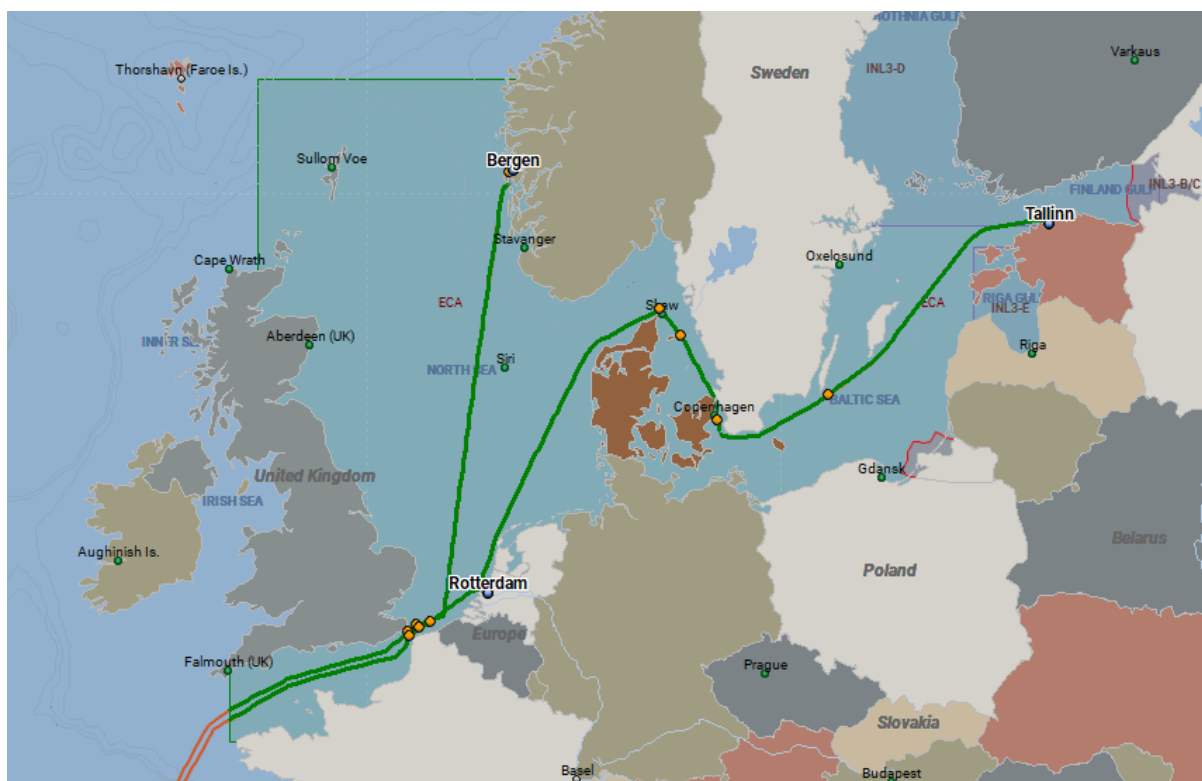
Дослідження виконувались на судні класу General Cargo дедвейтом 65000 тон. Під час дослідження судно здійснювало навігаційний перехід Таллінн (Естонія) – Роттердам (Голландія) – Санта Круз де Тенерифе (Канарські острова, Іспанія) – Конакрі (Гвінея) – Касабланка (Марокко) – Берген (Норвегія). При цьому навігаційний перехід Таллінн – Роттердам та частина навігаційних переходів Роттердам – Санта Круз де Тенерифе та Касабланка – Берген здійснювались в спеціальних екологічних районах. Інша частина навігаційних переходів здійснювалась поза цих районів. Схема навігаційних переходів наведена на рис. 3.

Як головний двигун на судні використовувався судновий дизель 6UEC60LS фірми Mitsubishi Heavy Industries. Для забезпечення вимог Додатку VI MARPOL щодо концентрації оксидів азоту у випускних газах дизель обладнаний комплексною системою рециркуляції випускних газів – високого (High pressure – HP-EGR) та низького (Low pressure – LP-EGR) тиску. Принципова схема системи рециркуляції надана на рис. 4.

Судновий дизель обладнаний двохступеневою системою наддуву, яку забезпечують газотурбоагнітатчі 2 та 17. Ступінь наддуву (одноступеневий або двохступеневий) регулюється положенням трьохходових клапанів 19 та 20. До системи рециркуляції HP-EGR входять керуючий клапан 1, охолоджувач випускних газів 11, скруббер очищення випускних газів 8, насос 10 та цистерна 9 прісної води системи охолодження скрубера 8, додатковий нагнітач випускних газів 7.



а)



б)

Рис. 3. Схема навігаційних переходів:
а – повний перехід; б – перехід у Baltic та North Sea Emission control areas

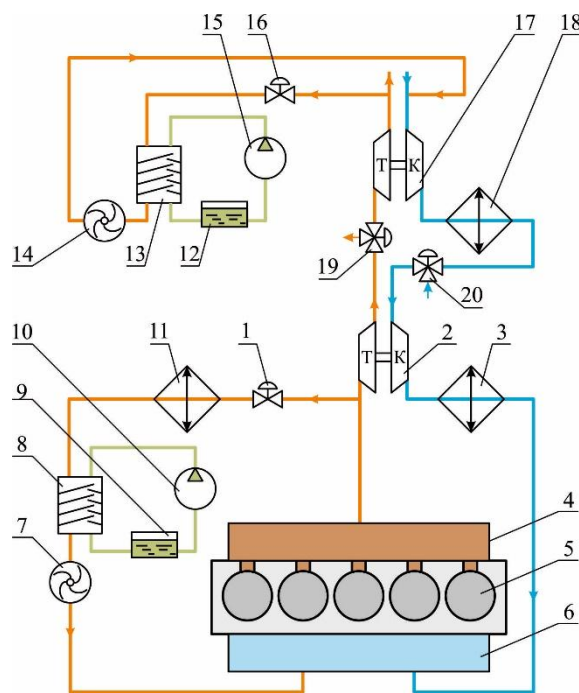


Рис. 4. Принципова схема системи рециркуляції випускних газів суднового дизеля 6UEC60LS фірми Mitsubishi Heavy Industries:

1, 16 – керуючий клапан; 2, 17 – газотурбонагнітач; 3, 18 – охолоджувач наддувного повітря; 4 – випускний колектор; 5 – дизель; 6 – продувний колектор; 7, 14 – додатковий нагнітач випускних газів; 8, 13 – скруббер очищення випускних газів; 9, 12 – цистерна прісної води; 10, 15 – насос прісної води; 11 – охолоджувач випускних газів; 19, 20 – трьохходовий клапан; Т, К – газова турбіна та повітряний компресор газотурбонагнітача

Основними складовими системи рециркуляції LP-EGR є керуючий клапан 16, скруббер очищення випускних газів 13, насос 15 та цистерна 12 прісної води системи охолодження скрубера 13, додатковий нагнітач випускних газів 14. Охолодження наддувного повітря забезпечується у охолоджувачах 18 (для першого ступеню наддува) та 3 (для другого ступеню наддува). Випускні гази, що виходять з випускного колектору 4 дизеля 5 потрапляють або у газову турбіну Т газотурбонагнітача 2, або переспрямовуються системою рециркуляції до продувного колектору 6.

Судновий дизель обладнаний двохступеневою системою наддуву, яку забезпечують газотурбонагнітачі 2 та 17. Ступінь наддуву (одноступеневий або двохступеневий) регулюється положенням трьохходових клапанів 19 та 20. До системи рециркуляції HP-EGR входять керуючий клапан 1, охолоджувач випускних газів 11, скруббер очищення випускних газів 8, насос 10 та цистерна 9 прісної води системи охолодження скрубера 8, додатковий нагнітач випускних газів 7. Основними складовими системи рециркуляції LP-EGR є керуючий клапан 16, скруббер очищення випускних газів 13, насос 15 та цистерна 12 прісної води системи охолодження скрубера 13, додатковий нагнітач випускних газів 14. Охолодження наддувного повітря забезпечується у охолоджувачах 18 (для першого ступеню наддува) та 3 (для другого ступеню наддува). Випускні гази, що виходять з випускного колектору 4 дизеля 5 потрапляють або у газову турбіну Т газотурбонагнітача 2, або переспрямовуються системою рециркуляції до продувного колектору 6.

Відповідно та технічних характеристики системи EGR, в залежності від положення керуючого клапану 16 ступінь рециркуляції δ_{LP} системи LP-EGR знаходиться у межах $\delta_{HP}=0...25\%$ (що забезпечує повернення до циліндрів дизеля 20 % випускних газів). Також

згідно технічних характеристик в залежності від положення керуючого клапану 1 ступінь рециркуляції δ_{HP} системи HP-EGR знаходиться у межах $\delta_{HP}=0\ldots 20\%$ (що забезпечує повернення до повітряного компресору К газотурбонагнітача 17 та ділі до циліндрів дизеля 25 % випускних газів).

Екологічність морських переходів під час знаходження судна поза ЕСА забезпечувалась роботою однієї з двох систем – LP-EGR або HP-EGR. При цьому в обох випадках значення концентрації оксидів азоту у випускних газах відповідало вимогам Tier II. Під час знаходження судна всередині ЕСА екологічність судна задовольняла вимогам Tier III, це забезпечувалось послідовним, комплексним очищенням випускних газів в системах HP-EGR та LP-EGR.

З метою розв'язання завдання дослідження, виконувались вимірювання емісії оксидів азоту на різних режимах роботи системи EGR. При цьому з можливого діапазону зміни ступеню рециркуляції δ_{HP} системи HP-EGR обирались режими, що відповідали $\delta_{HP}=5\%$, 10% , 15% та $\delta_{HP}=20\%$. Для кожного з цих режимів поступово (зі усього можливого діапазону) змінювався ступінь рециркуляції δ_{LP} системи LP-EGR, а саме $\delta_{LP}=0\%$, 5% , 10% , 15% , 20% та $\delta_{LP}=25\%$. Під час проведення експериментів залежно від навігаційних та гідрометеорологічних умов навантаження на судновий дизель 6UEC60LS фірми Mitsubishi Heavy Industries змінювалось в діапазоні $80\ldots 85\%$ від номінального. Зі урахуванням інерційності та енергоємності дизеля та системи EGR зміна навантаження в такому діапазоні не надавала суттєвого впливу на процес утворення оксидів азоту. Це дозволяло вважати його сталим та таким, що збігається для всіх досліджених режимів.

Результати з вимірювання емісії оксидів азоту NO_x за різних умов експлуатації системи EGR наведені у таблиці 1.

Таблиця 1. Емісія оксидів азоту NO_x , г/(кВт·год), судна класу General Cargo дедвейтом 65000 тонн за різних умов експлуатації системи EGR

Ступінь рециркуляції системи HP-EGR δ_{HP} , %	Ступінь рециркуляції системи LP-EGR δ_{LP} , %					
	0	5	10	15	20	25
5	13,64	13,64	3,17	3,05	2,87	2,83
10	12,50	12,50	3,08	2,87	2,73	2,54
15	10,74	10,74	2,92	2,74	2,57	2,42
20	10,37	10,37	2,57	2,47	2,38	2,27

Для кращої візуалізації результати досліджень, що наведені у таблиці 1, подані у вигляді рис. 5.

Результати, що наведені у таблиці 1 та на рис. 5, свідчать, що система EGR, яка встановлена на судні, забезпечує виконання вимог Tier III.

Екологічності морських переходів за емісією оксидів азоту може бути оцінена через екологічну стійкість $Eco(NO_x)$ – як відносна різниця між максимально можливим NO_x^{Tier} (таким, що відповідає вимогам Tier III) та поточним NO_x^i значеннями концентрації оксидів азоту у випускних газах:

$$Eco(NO_x) = \frac{NO_x^{Tier} - NO_x^i}{NO_x^{Tier}}. \quad (1)$$

Ця величина характеризує на скільки меншою у відносному відношенні є значення поточної емісії оксидів азоту в порівнянні з такою, що регламентується вимогами MARPOL [41].

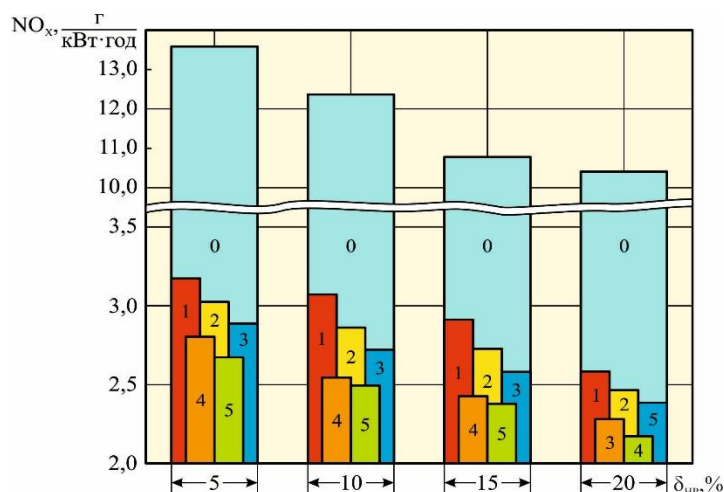


Рис. 5. Емісія оксидів азоту NO_x , г/(кВт·год), судна класу General Cargo дедвейтом 65000 тон за різних умов експлуатації системи EGR:

0 – $\delta_{LP}=0\%$ (відсутність рециркуляції у контурі LP-EGR); 1 – $\delta_{LP}=5\%$;
2 – $\delta_{LP}=10\%$; 3 – $\delta_{LP}=15\%$; 4 – $\delta_{LP}=20\%$; 5 – $\delta_{LP}=25\%$

З урахуванням, що відповідно до Tier III $NO_x^{Tier} = 3,4$ г/(кВт·год) та даних, що наведені у таблиці 1 відповідно до виразу (1) розраховані значення екологічної стійкості $Eco(NO_x)$ – таблиця 2.

Таблиця 2. Екологічна стійкість $Eco(NO_x)$, %, судна класу General Cargo дедвейтом 65000 тон за різних умов експлуатації системи EGR

Ступінь рециркуляції системи HP-EGR $\delta_{HP}, \%$	Ступінь рециркуляції системи LP-EGR $\delta_{LP}, \%$				
	5	10	15	20	25
5	6,76	10,29	15,59	16,76	21,18
10	9,41	15,59	19,71	25,29	27,06
15	14,12	19,41	24,41	28,82	30,00
20	24,41	27,35	30,00	33,24	35,88

Для кращої візуалізації результати, що наведені у таблиці 2, подані у вигляді рис. 6.

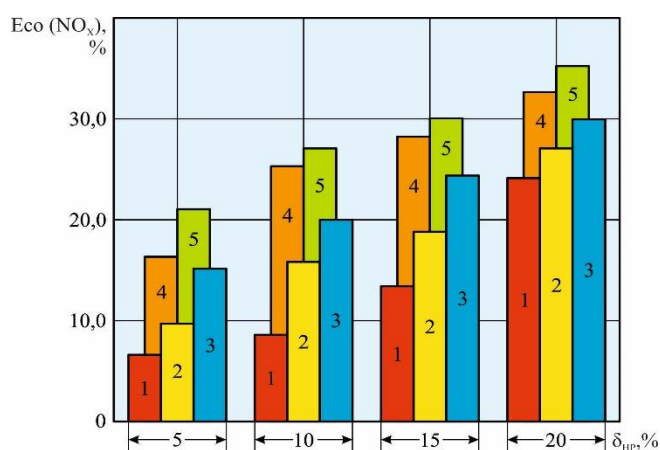


Рис. 6. Екологічна стійкість $Eco(NO_x)$, %, судна класу General Cargo дедвейтом 65000 тон за різних умов експлуатації системи EGR:

1 – $\delta_{LP}=5\%$; 2 – $\delta_{LP}=10\%$; 3 – $\delta_{LP}=15\%$; 4 – $\delta_{LP}=20\%$; 5 – $\delta_{LP}=25\%$

Всі випробування виконувались кваліфікованим судновим екіпажем. Технологія проведення досліджень було погоджена з технічним департаментом судноплавної компанії, що забезпечує менеджмент судна. Під час дослідження контролювались всі необхідні показники роботи суднової енергетичної установки та навігаційні характеристики судна.

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

Результати наведених досліджень дозволяють зробити наступні висновки.

1. Морські переходи в прибережних акваторіях Північної Європи у більшості випадків здійснюються у районах спеціального екологічного контролю, в яких діють більш суворі відносно інших морських та океанських акваторіях вимоги MARPOL щодо емісії оксидів азоту з випускними газами.

2. Одним зі способів, що забезпечують вимоги MARPOL у районах спеціального екологічного контролю (зокрема значення емісії оксидів азоту з випускними газами відповідно до Tier III) є системи рециркуляції випускних газів. Найбільшою ефективністю при цьому характеризуються комплексні системи рециркуляції, які складаються з послідовних систем рециркуляції високого та низького тиску.

3. Оцінку ефективності експлуатації систем рециркуляції випускних газів та рівень екологічності морських переходів за емісією оксидів азоту доцільно виконувати за екологічною стійкістю. Ця величина характеризує на скільки меншою у відносному відношенні є значення поточної емісії оксидів азоту в порівнянні з такою, що регламентується вимогами MARPOL.

4. Для судна класу General Cargo дедвейтом 65000 тон експериментально визначено, що використання комплексної системи рециркуляції випускних газів забезпечує вимоги Tier III MARPOL щодо емісії оксидів азоту. При цьому найбільшою ефективністю характеризуються режими експлуатації системи рециркуляції, що відповідають максимальному степеню рециркуляції систем високого та низького тиску. За цих умов екологічна стійкість досягає значень 30,00...35,88 %.

5. Подальші дослідження в цьому напрямку будуть пов'язані з визначенням економічної ефективності використання комплексних систем рециркуляції та вибором таких режимів їх експлуатації, за якими спостерігається максимальна екологічна стійкість з одночасним мінімальним збільшенням експлуатаційних витрат на судно.

REFERENCES

- [1] Maryanov, D., "Reduced energy losses during transportation of drilling fluid by platform supply vessels," *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 2, no. 1(64), pp. 42–50, 2022, doi: 10.15587/2706-5448.2022.256473.
- [2] Madey, V., "Assessment of the efficiency of biofuel use in the operation of marine diesel engines," *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 2, no. 1(64), pp. 34–41, 2022, doi: 10.15587/2706-5448.2022.255959.
- [3] Khlopenko, M., I. Gritsuk, O. Sharko, and E. Appazov, "Increasing the accuracy of the vessel's course orientation," *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 1, no. 2(75), pp. 25–30, 2024, doi: 10.15587/2706-5448.2024.298518.
- [4] Wang, Z., Q. Ma, Z. Zhang, Z. Li, C. Qin, J. Chen, and C. Peng, "A study on monitoring and supervision of ship nitrogen-oxide emissions and fuel-sulfur-content compliance," *Atmosphere*, vol. 14, p. 175, 2023, doi: 10.3390/atmos14010175.

- [5] Kong, K.-J., and S.-C. Hwang, "Development and performance evaluation experiment of a device for simultaneous reduction of SO_x and PM," *Energies*, vol. 17, p. 3337, 2024, doi: 10.3390/en17133337.
- [6] Golovan, A., I. Gritsuk, and I. Honcharuk, "Reliable ship emergency power source: A Monte Carlo simulation approach to optimize remaining capacity measurement frequency for lead-acid battery maintenance," *SAE International Journal of Electrified Vehicles*, vol. 13, no. 2, pp. 179–189, 2024, doi: 10.4271/14-13-02-0009.
- [7] Melnyk, O., S. Onyshchenko, and O. Onishchenko, "Development measures to enhance the ecological safety of ships and reduce operational pollution to the environment," *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, vol. 118, pp. 195–206, 2023, doi: 10.20858/sjsutst.2023.118.13.
- [8] Wang, W., G. Wang, Z. Wang, J. Lei, J. Huang, X. Nie, and L. Shen, "Optimization of Miller cycle, EGR, and VNT on performance and NO_x emission of a diesel engine for range extender at high altitude," *Energies*, vol. 15, p. 8817, 2022, doi: 10.3390/en15238817.
- [9] Petrychenko, O., and M. Levinskyi, "Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport," *Transport Systems and Technologies*, vol. 43, pp. 21–36, 2024, doi: 10.32703/2617-9059-2024-43-2.
- [10] Petrychenko, O., M. Levinskyi, D. Prytula, and A. Vynohradova, "Fuel options for the future: A comparative overview of properties and prospects," *Transport Systems and Technologies*, vol. 41, pp. 96–106, 2023, doi: 10.32703/2617-9059-2023-41-8.
- [11] Sagin, S. V., and O. A. Kuropyatnyk, "Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines," *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, nos. 7–8, pp. 36–43, 2021, doi: 10.29013/AJT-21-7.8-36-43.
- [12] Sagin, S., and A. Sagin, "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*, vol. 5, no. 1(73), pp. 37–43, 2023, doi: 10.15587/2706-5448.2023.290198.
- [13] Fischer, D., W. Vith, and J. L. Unger, "Assessing particulate emissions of novel synthetic fuels and fossil fuels under different operating conditions of a marine engine and the impact of a closed-loop scrubber," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, p. 1144, 2024, doi: 10.3390/jmse12071144.
- [14] Lee, J.-U., S.-C. Hwang, and S.-H. Han, "Numerical and experimental study on NO_x reduction according to the load in the SCR system of a marine boiler," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, p. 777, 2023, doi: 10.3390/jmse11040777.
- [15] Šenčič, T., V. Mrzljak, P. Blecich, and I. Bonefačić, "2D CFD simulation of water injection strategies in a large marine engine," *Journal of Maritime Science and Engineering*, vol. 7, p. 296, 2019, doi: 10.3390/jmse7090296.
- [16] Amoresano, A., G. Langella, P. Iodice, and S. Roscioli, "Numerical analysis of SO₂ absorption inside a single water drop," *Atmosphere*, vol. 14, p. 1746, 2023, doi: 10.3390/atmos14121746.
- [17] Zannis, T. C., J. S. Katsanis, G. P. Christopoulos, E. A. Yfantis, R. G. Papagiannakis, E. G. Pariotis, D. C. Rakopoulos, C. D. Rakopoulos, and A. G. Vallis, "Marine exhaust gas treatment systems for compliance with the IMO 2020 global sulfur cap and Tier III NO_x limits: A review," *Energies*, vol. 15, p. 3638, 2022, doi: 10.3390/en15103638.

- [18] Pelić, V., T. Mrakovčić, V. Medica-Viola, and M. Valčić, “Effect of early closing of the inlet valve on fuel consumption and temperature in a medium speed marine diesel engine cylinder,” *Journal of Maritime Science and Engineering*, vol. 8, no. 10, p. 747, 2020, doi: 10.3390/jmse8100747.
- [19] Petrychenko, O., M. Levinskyi, S. Goolak, and V. Lukoševičius, “Prospects of solar energy in the context of greening maritime transport,” *Sustainability*, vol. 17, p. 2141, 2025, doi: 10.3390/su17052141.
- [20] Levinskyi, M. V., and V. F. Shapo, “Adaptive control for technological type control objects,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1231, 2021, pp. 565–575, doi: 10.1007/978-3-030-52575-0_47.
- [21] Sagin, S., O. Kuropyatnyk, O. Matieiko, R. Razinkin, T. Stoliaryk, and O. Volkov, “Ensuring operational performance and environmental sustainability of marine diesel engines through the use of biodiesel fuel,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, p. 1440, 2024, doi: 10.3390/jmse12081440.
- [22] Sagin, S., O. Kuropyatnyk, and D. Rusnak, “Improvement of the process of cleaning exhaust gases of marine diesels from sulfur oxides,” *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 4, no. 1(84), pp. 72–79, 2025, doi: 10.15587/2706-5448.2025.337616.
- [23] Sagin, S., V. Chymshyr, S. Karianskyi, O. Kuropyatnyk, V. Madey, and D. Rusnak, “Using ultrasonic fuel treatment technology to reduce sulfur oxide emissions from marine diesel exhaust gases,” *Energies*, vol. 18, p. 4756, 2025, doi: 10.3390/en18174756.
- [24] Kolegaev, M., and I. Brazhnik, “Improvement of the process of preparing cargo tanks of crude oil tankers for cargo operations,” *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 6, no. 1(80), pp. 36–40, 2024, doi: 10.15587/2706-5448.2024.318534.
- [25] Matieiko, O., “Selection of optimal schemes for the inerting process of cargo tanks of gas carriers,” *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 4, no. 1(78), pp. 43–50, 2024, doi: 10.15587/2706-5448.2024.310699.
- [26] Budashko, V., and V. Shevchenko, “Solving a task of coordinated control over a ship automated electric power system under a changing load,” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2, no. 110, pp. 54–70, 2021, doi: 10.15587/1729-4061.2021.229033.
- [27] Wang, F., J. Zhao, T. Li, P. Guan, S. Liu, H. Wei, and L. Zhou, “Research on NOx emissions testing and optimization strategies for diesel engines under low-load cycles,” *Atmosphere*, vol. 16, p. 190, 2025, doi: 10.3390/atmos16020190.
- [28] Stoliaryk, T., “Analysis of the operation of marine diesel engines when using engine oils with different structural characteristics,” *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 5, no. 1(67), pp. 22–32, 2022, doi: 10.15587/2706-5448.2022.265868.
- [29] Budashko, V., A. Sandler, and V. Shevchenko, “Diagnosis of the technical condition of high-tech complexes by probabilistic methods,” *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 16, no. 1, pp. 105–111, 2022, doi: 10.12716/1001.16.01.11.
- [30] Zablotsky, Y. V., “The use of chemical fuel processing to improve the economic and environmental performance of marine internal combustion engines,” *Scientific Research of the SCO Countries: Synergy and Integration*, 2019, doi: 10.34660/inf.2019.15.36257.

- [31] Sagin, A. S., and Yu. V. Zablotskyi, "Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels," *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, nos. 7–8, pp. 14–17, 2021, doi: 10.29013/AJT-21-7.8-14-17.
- [32] Gorb, S., M. Levinskyi, and M. Budurov, "Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor," *Scientific Horizons*, vol. 24, no. 11, pp. 9–19, 2021, doi: 10.48077/scihor.24(11).2021.9-19.
- [33] Maryanov, D., "Development of a method for maintaining the performance of drilling fluids during transportation by platform supply vessel," *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 5, no. 2(61), pp. 15–20, 2021, doi: 10.15587/2706-5448.2021.239437.
- [34] Melnyk, O., O. Fomin, O. Shumylo, V. Yarovenko, M. Jurkovič, and V. Ocheretna, "Simulation of the interrelationship between energy efficiency and ship safety based on empirical data and regression analysis," in *Systems, Decision and Control in Energy VII (Studies in Systems, Decision and Control, vol. 596)*, V. Babak and A. Zaporozhets, Eds. Cham: Springer, 2025, doi: 10.1007/978-3-031-90462-2_16.
- [35] Varbanets, R., O. Fomin, V. Pištěk, V. Klymenko, D. Minchev, A. Khrulev, V. Zalozh, and P. Kučera, "Acoustic method for estimation of marine low-speed engine turbocharger parameters," *Journal of Maritime Science and Engineering*, vol. 9, p. 321, 2021, doi: 10.3390/jmse9030321.
- [36] Lamas Galdo, M. I., L. Castro-Santos, and C. G. Rodriguez Vidal, "Numerical analysis of NOx reduction using ammonia injection and comparison with water injection," *Journal of Maritime Science and Engineering*, vol. 8, no. 2, p. 109, 2020, doi: 10.3390/jmse8020109.
- [37] Drazdauskas, M., and S. Lebedevas, "Numerical study on optimization of combustion cycle parameters and exhaust gas emissions in marine dual-fuel engines by adjusting ammonia injection phases," *Journal of Maritime Science and Engineering*, vol. 12, p. 1340, 2024, doi: 10.3390/jmse12081340.
- [38] Petrenko, T., "Study of physicochemical and geochemical aspects of enhanced oil recovery and CO2 storage in oil reservoirs," *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 2, no. 1(82), pp. 24–29, 2025, doi: 10.15587/2706-5448.2025.325343.
- [39] Bian, J., L. Duan, and Y. Yang, "Simulation and economic investigation of CO2 separation from gas turbine exhaust gas by molten carbonate fuel cell with exhaust gas recirculation and selective exhaust gas recirculation," *Energies*, vol. 16, p. 3511, 2023, doi: 10.3390/en16083511.
- [40] Li, M., M. Qiu, Y. Li, H. Tang, R. Wu, Z. Yu, Y. Zhang, S. Ye, C. Zheng, Y. Qu, et al., "Research on ship carbon-emission monitoring technology and suggestions on low-carbon shipping supervision system," *Atmosphere*, vol. 16, p. 773, 2025, doi: 10.3390/atmos16070773.
- [41] Sagin, S., O. Haichenia, S. Karianskyi, O. Kuropyatnyk, R. Razinkin, A. Sagin, and O. Volkov, "Improving green shipping by using alternative fuels in ship diesel engines," *Journal of Maritime Science and Engineering*, vol. 13, no. 3, p. 589, 2025, doi: 10.3390/jmse13030589.