

УДК 629.5

DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-66-80

ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ СИСТЕМИ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

О.А. Куропятник

док. філ. (PhD), докторант кафедри «Суднові енергетичні установки»

kuropyatnyk83@gmail.com

ORCID ID 0009-0008-2565-5771

Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна

Анотація. Розглянуто способи рециркуляції випускних газів – як один із найбільш поширених, що сприяють зниження емісії оксидів азоту з випускними газами суднових дизелів. Визначено, що системи рециркуляції випускних газів відносяться до технологічних рішень, за допомогою яких забезпечується виконання вимог Додатку VI MARPOL, зокрема відповідність рівню Tier III щодо концентрації оксидів азоту у випускних газах. Наведені результати експериментальних досліджень, що виконувались на судновому дизелі MAN-Diesel 5G70ME-C10, обладнаному системою рециркуляції випускних газів. З метою вдосконалення процесу зниження емісії оксидів азоту у системі рециркуляції додатково використовувалось зволоження випускних газів, що повертаються до циліндрів дизеля. Дослідження виконувались в діапазоні експлуатаційних навантажень дизеля 60...90 % від номінальної потужності та за умовою 5-25 % ступеню рециркуляції випускних газів. Дослідження виконувались в районах спеціального екологічного контролю, на які розповсюджуються вимоги Tier III MARPOL щодо концентрації оксидів азоту у випускних газах. Експериментально встановлено, що під час використання системи рециркуляції без додаткового зволоження випускних газів забезпечується зниження емісії оксидів азоту до значень 1,75-3,28 г/(кВт·год). Додаткове зволоження випускних газів сприяє покращенню екологічних показників роботи дизеля, що виявляється в зниженні емісії оксидів азоту до значень 1,63-3,12 г/(кВт·год). В обох випадках отримані значення не перевищують максимально можливі значення 3,4 г/(кВт·год), яке відповідає вимогам Tier III MARPOL. Запропоновано ефективність експлуатаційних режимів системи рециркуляції (для обох випадків – без та зі додатковим зволоженням випускних газів) оцінювати за екологічною стійкістю щодо емісії оксидів азоту. Цей показник складає 38,53-48,53 % в разі експлуатації системи рециркуляції без додаткового зволоження випускних газів та 43,53-52,06 % в разі експлуатації системи рециркуляції з додатковим зволоженням випускних газів.

Ключові слова: екологічна стійкість, екологічні показники, емісія оксидів азоту, морський транспорт, рециркуляція випускних газів, судновий дизель.

UDK 629.5

DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-66-80

IMPROVING THE OPERATING MODES OF THE EXHAUST GAS RECIRCULATION SYSTEM OF MARINE DIESEL ENGINES

O. Kuropyatnyk

PhD, doctoral student of the department «Ship's Power Plants»
kuropyatnyk83@gmail.com

National University Odessa Maritime Academy, Odesa, Ukraine
ORCID ID 0009-0008-2565-5771

Abstract. Exhaust gas recirculation methods are considered as one of the most common methods that contribute to the reduction of nitrogen oxide emissions from marine diesel engines. It is determined that exhaust gas recirculation systems are technological solutions that ensure compliance with the requirements of Annex VI of MARPOL, in particular, compliance with the Tier III level for the concentration of nitrogen oxides in exhaust gases. The results of experimental studies performed on a MAN-Diesel 5G70ME-C10 marine diesel engine equipped with an exhaust gas recirculation system are presented. In order to improve the process of reducing nitrogen oxide emissions in the recirculation system, additional humidification of exhaust gases returning to the diesel cylinders was used. The studies were performed in the range of diesel engine operating loads of 60-90 % of nominal power and under the condition of 5-25 % of the exhaust gas recirculation degree. The studies were carried out in areas of special environmental control, which are subject to the requirements of Tier III MARPOL regarding the concentration of nitrogen oxides in exhaust gases. It was experimentally established that when using the recirculation system without additional humidification of exhaust gases, the emission of nitrogen oxides is reduced to values of 1,75-3,28 g/(kW·h). Additional humidification of exhaust gases contributes to the improvement of the environmental performance of the diesel engine, which is manifested in the reduction of nitrogen oxide emissions to values of 1,63-3,12 g/(kW·h). In both cases, the values obtained do not exceed the maximum possible value of 3,4 g/(kW·h), which meets the requirements of Tier III MARPOL. It is proposed to evaluate the efficiency of the operating modes of the recirculation system (for both cases – without and with additional humidification of exhaust gases) by environmental stability in terms of nitrogen oxide emissions. This indicator is 38,53-48,53 % in the case of operation of the recirculation system without additional humidification of exhaust gases and 43,53-52,06 % in the case of operation of the recirculation system with additional humidification of exhaust gases.

Keywords: environmental indicators, environmental sustainability, exhaust gas recirculation, maritime transport, marine diesel, nitrogen oxide emissions.

Постановка проблеми. Одним з актуальних завдань, які виникають під час експлуатації морських суден, є забезпечення їх екологічних показників. Під час транспортування вантажів судна морського транспорту перетинають, або тривалий

час можуть знаходитися у спеціальних екологічних районах або у прибережних акваторіях в яких діють більш суворі вимоги щодо екологічних параметрів суден та їх енергетичних установок. Основним документом, спрямованим на захист довкілля під час експлуатації морських суден, є Міжнародна конвенція MARPOL [1; 2]. Додаток VI MARPOL «Запобігання забрудненню повітря з суден» запроваджує вимоги щодо регулювання забруднення повітря випускними газами судових дизелів, зокрема оксидами азоту NO_x [3; 4]. Вимоги цього Додатку встановлюють три рівня контролю вмісту оксидів азоту у випускних газах, що залежать від року побудови судна та частоти обертання дизеля:

рівень Tier I є межею вмісту оксидів азоту NO_x у викидах дизелів суден, побудованих після 1 січня 2000 р., але до 2011 р.;

- рівень Tier II – стандарт за вмістом NO_x для дизелів, встановлених на судах, збудованих після 1 січня 2011 р.;

- рівень Tier III – стандарт за вмістом NO_x у викидах дизелів, встановлених на судах, збудованих після 1 січня 2016 року.

В даний час більшість морських транспортних суден відповідають рівням Tier II та Tier III. При для цього рівню Tier II емісія NO_x залежно від номінальної частоти обертання колінчастого валу дизеля n , об/хв, не повинна перевищувати:

- $14,4 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$ – у випадку, коли $n < 130 \text{ об/хв}$;
- $44n^{-0,23} \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$ – у випадку, коли $130 < n < 2000 \text{ об/хв}$;
- $7,7 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$ – у випадку, коли $n \geq 2000 \text{ об/хв}$.

Двигуни рівня Tier III повинні забезпечувати такі вимоги щодо вмісту NO_x у випускних газах:

- $3,4 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$ – якщо $n < 130 \text{ об/хв}$;
- $9n^{-0,2} \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$ – якщо $130 < n < 2000 \text{ об/хв}$;
- $2,0 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$ – якщо $n \geq 2000 \text{ об/хв}$.

Суднові дизелі є найбільш розповсюдженим типом теплових двигунів, що встановлюються на морських судах та виконують функції головних та допоміжних двигунів. Підтримання екологічних показників судових дизелів (в тому числі за емісією оксидів азоту з випускними газами) є актуальним завданням, а виконання вимог Додатку VI MARPOL обов'язковим майже для всіх типів транспортних суден [5; 6]. Саме через це постійно виконуються дослідження щодо визначення оптимальних (з точки зору підтримання мінімального рівня емісії оксидів азоту) режимів експлуатації судових дизелів та систем, що забезпечують їх роботу [7; 8].

Огляд останніх досліджень і публікацій. Зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах судових дизелів досягається шляхом впливу на робочий процес, що перебігає в циліндрі дизеля; шляхом оптимізації процесу впорскування палива, а також шляхом безпосереднього очищення випускних газів. Найбільшого поширення серед першого варіанту отримали двохступеневий наддув та цикл Міллера [9; 10]. Серед другого – підвищення тиску впорскування, вибір оптимального закону подачі палива, а також вдосконалення паливної апаратури високого тиску [11; 12]. Серед третього – каталітичне та некаталітичне очищення випускних газів, а також їх фільтрація [13; 14].

Слід зазначити, що забезпечення вимог рівню Tier III MARPOL можливо лише за допомогою спеціальних технологічних рішень, найбільш розповсюдженими з яких є системи рециркуляції випускних газів (Exhaust gas recirculation – EGR) та системи каталітичного відновлення (Selective catalytic reduction – SCR) випускних газів [15; 16]. Системи EGR відносяться до первинних методів зниження емісії оксидів азоту та впливають на процес їх утворення в циліндрі дизеля [17; 18]. Системи SCR належать до вторинних методів зниження емісії оксидів азоту та забезпечують безпосереднє очищення випускних газів після того, як вони залишили циліндр та випускний колектор дизеля [19; 20].

Зниження емісії оксидів азоту в системах EGR (як у всіх первинних методах) відбувається через зниження пікових температур в циліндрі дизеля. Випускні гази, яки системою рециркуляції повертаються в циліндр, знижують кількість свіжого повітря, що надходить у циліндр. Це погіршує інтенсивність згоряння палива (кількість палива, що згоряє за певний кут оберту колінчатого валу, та швидкість згоряння палива) та знижує температуру в циліндрі до значень, за якими неможливе ланцюгова реакція утворення оксидів азоту [21; 22].

Системи EGR, що встановлюються на суднових дизелях, поділяються на системи високого та низького тиску [23; 24]. В системах EGR високого тиску частина газів переспрямовуються на рециркуляцію до їх потрапляння на лопатки газової турбіни газотурбонагнітача (ГТН), в системах EGR низького тиску гази спрямовуються до циліндрів дизеля після їх розширення в ГТН.

Одним з різновидів системи EGR є додатково зволоження випускних газів, що повертаються в циліндр дизеля. При цьому (аналогічно зі способом зволоження наддувного повітря) збільшується вологовміст суміші випускних та залишкових газів з чистим повітрям. Через підвищення вологовмісту процес згоряння уповільнюється та зсувається на лінію розширення, що знижує максимальну температуру в циліндрі дизеля та сприяє перериванню процесу утворення оксидів азоту [25; 26]. Додаткове зволоження випускних газів в системах EGR відноситься до інноваційних технологій та на сьогодні не має широкого розповсюдження та інформаційної статистики його використання на судах морського транспорту.

Формулювання завдання дослідження. Завданням дослідження було визначення впливу додаткового зволоження випускних газів, що повертаються в циліндр дизеля під час їх рециркуляції в системі EGR, на емісію оксидів азоту.

Виклад основного матеріалу дослідження. Експерименти виконувались на судні класу Gas Carrier вантажомісткістю 72380 м³. Як головний двигун на судні використовувався малообертовий дизель MAN-Diesel 5G70ME-C10 з номінальною потужністю 12120 кВт та номінальною частотою обертання колінчатого валу 77 об/хв. Для забезпечення вимог Додатку VI MARPOL щодо викидів оксидів азоту дизель обладнаний системою EGR в яку додатково був вмонтовано блок зволоження випускних газів, що повертаються до циліндрів дизеля. Принципова схема системи EGR з додатковим блоком зволоження надана на рис. 1.

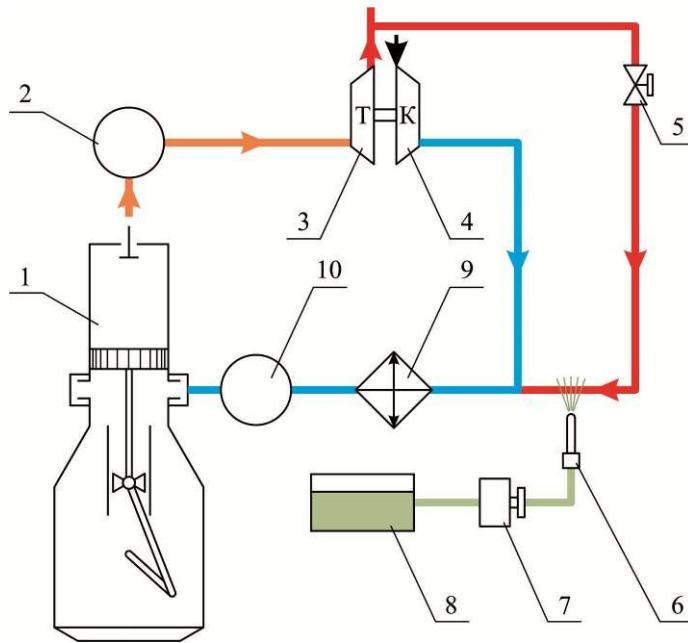


Рис. 1. Принципова схема системи EGR суднового дизеля MAN-Diesel 5G70ME-C10:

- 1 – циліндр; 2 – випускний колектор; 3 – газова турбіна ГТН;
4 – повітряний компресор ГТН; 5 – клапан рециркуляції випускних газів;
6 – форсунка; 7 – дозуючий пристрій; 8 – цистерна прісної води;
9 – охолоджувач надувного повітря; 10 – продувний ресивер;
Т – газова турбіна ГТН; К – повітряний компресор ГТН

Система працює в такий спосіб. Гази, що утворились в циліндрі 1 під час згоряння палива, потрапляють до випускного колектора 2 та далі прямують до газової турбіни ГТН 3. Основна частина газів після газової турбіни ГТН рухається у випускную трубу та видаляється в атмосферу. Інша частина газів повертається до циліндрів дизеля через магістраль рециркуляції, в якій встановлено регулюючий клапан 5. Випускні газы, що використовуються в системі рециркуляції, змішуються з повітрям, яке подається повітряним компресором ГТН 4. Утворена в такий спосіб суміш потрапляє до охолоджувача надувного повітря 9 та далі потрапляє в продувний ресивер 10 та циліндр 1. Додаткове зволоження випускних газів системи рециркуляції здійснюється шляхом впорскування в їх потік прісної води. Це забезпечується за допомогою форсунки 6, до якої дозуючий пристрій 7 подає необхідну кількість води з цистерни 8. Система EGR може працювати як з додатковим охолодженням випускних газів, також й без нього. Ступінь рециркуляції випускних газів визначається за виразом

$$\delta_{\text{EGR}} = \frac{G_{\text{вг}}}{G_{\text{EGR}}} \cdot 100\%; \quad (1)$$

де $G_{\text{вг}}$ – загальна кількість випускних газів, м³/с або кг/с;

G_{EGR} – кількість випускних газів, що повертається до циліндрів дизеля, м³/с або кг/с.

Значення ступеню рециркуляції випускних газів знаходиться у діапазоні $\delta_{\text{EGR}} = 0 \dots 25 \%$ та контролюється системою автоматичного регулювання роботи дизеля.

Кількість прісної води, що додається форсункою 6 до випускних газів для їх зволоження, контролюється мікроконтролером дозуючого пристрою 7.

Вдосконаленість робочого процесу, а також процесів впорскування палива та тепломасообміну суднового дизеля MAN-Diesel 5G70ME-C10 забезпечувало виконання вимог Tier II під час експлуатації судна у звичайних екологічних районах. В разі знаходження судна в зонах спеціального екологічного контролю його експлуатація здійснювалась з використанням системи EGR. Це забезпечувало виконання вимог Tier III MARPOL.

Таблиця 1

*Зміна концентрації оксидів азоту у випускних газах суднового дизеля
MAN-Diesel 5G70ME-C10 за під час експлуатації системи EGR
без додаткового охолодження випускних газів*

Навантаження на дизель, %	Ступінь рециркуляції випускних газів, δ_{EGR} , %					
	0	5	10	15	20	25
60	10,86	3,11	2,82	2,41	2,09	1,75
70	11,42	3,16	2,88	2,53	2,25	1,82
80	12,88	3,22	2,97	2,62	2,29	1,94
90	13,72	3,28	3,05	2,73	2,45	2,09

Таблиця 2

*Зміна концентрації оксидів азоту у випускних газах суднового дизеля
MAN-Diesel 5G70ME-C10 за під час експлуатації системи EGR
з додатковим охолодженням випускних газів*

Навантаження на дизель, %	Ступінь рециркуляції випускних газів, δ_{EGR} , %					
	0	5	10	15	20	25
60	10,86	2,92	2,58	2,28	1,81	1,63
70	11,42	2,98	2,64	2,39	2,01	1,71
80	12,88	3,04	2,71	2,47	2,12	1,78
90	13,72	3,12	2,87	2,56	2,19	1,92

За результатами, що надані у табл. 1; 2, побудовані діаграми, що відображають зміну емісії оксидів азоту для різного навантаження суднового дизеля MAN-Diesel 5G70ME-C10 та різного ступеня рециркуляції газів у системі EGR – рис. 2; 3.

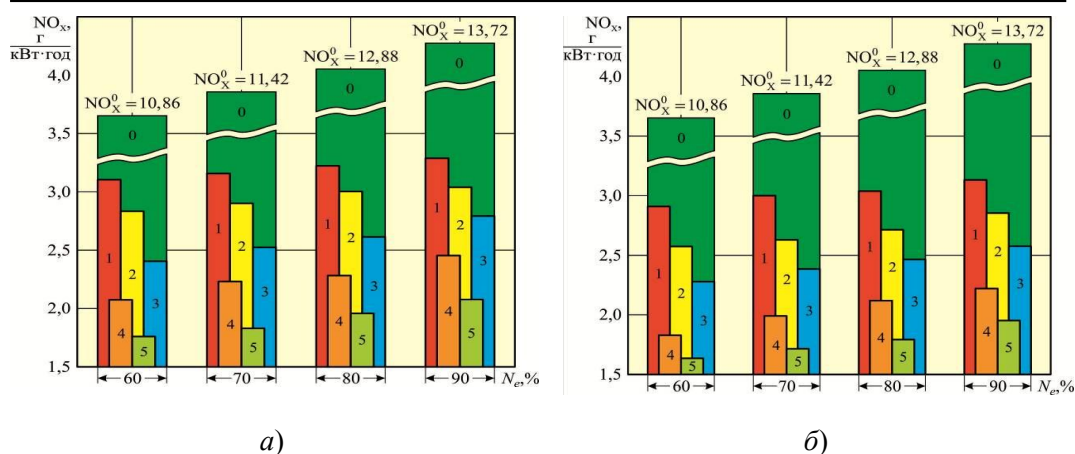


Рис. 2. Зміна концентрації оксидів азоту у випускних газах суднового дизеля
MAN-Diesel 5G70ME-C10 за різних умов експлуатації системи EGR:

а – без додаткового охолодження випускних газів;

б – з додатковим охолодженням випускних газів;

1 – $\delta_{EGR}=5\%$;

2 – $\delta_{EGR}=10\%$;

3 – $\delta_{EGR}=15\%$;

4 – $\delta_{EGR}=20\%$;

5 – $\delta_{EGR}=25\%$;

NO_X^0 – експлуатація без використання системи EGR

Відповідно до вимог Tier III для суднового дизеля MAN-Diesel 5G70ME-C10 максимальна концентрація оксидів азоту у випускних газах не повинна перевищувати 3,4 г/(кВт·год). Експериментально отримані дані, що наведені у табл. 1, свідчать, що ця вимога виконується для всіх навантажень на дизель та для всіх режимів експлуатації системи EGR.

Результати, що наведені у табл. 1 та на рис. 2, свідчать про зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах суднового дизеля MAN-Diesel 5G70ME-C10 для обох випадків експлуатації системи EGR – без додаткового зволоження випускних газів (рис. 2, а) та з додатковим зволоженням випускних газів (рис. 2, б).

Якість роботи системи EGR на різних режимах її експлуатації доцільно оцінювати за величиною екологічної стійкості за емісією оксидів азоту ΔNO_X^+ . Ця величина є відносною різницею між максимально можливим та поточним значенням концентрації оксидів азоту у випускних газах та розраховується за виразом

$$\Delta NO_X^+ = \frac{NO_X^{Tier} - NO_X^{екс}}{NO_X^{Tier}} \cdot 100\%; \quad (2)$$

де – $\text{NO}_X^{\text{Tier}}$ концентрація оксидів азоту у випускних газах, що регламентується вимогами Tier, г/(кВт·год);

$\text{NO}_X^{\text{екс}}$ – концентрація оксидів азоту у випускних газах для відповідних умов проведення експерименту, г/(кВт·год).

З урахуванням значень, що наведені у табл. 1; 2, за виразом (2) визначимо величини екологічної стійкості за емісією оксидів азоту ΔNO_X^+ для різних режимів експлуатації суднового дизеля MAN-Diesel 5G70ME-C10 та системи EGR. Отримані значення наведені у табл. 3; 4.

Таблиця 3

*Екологічна стійкість за емісією оксидів азоту суднового дизеля
MAN-Diesel 5G70ME-C10 за під час експлуатації системи EGR
без додаткового охолодження випускних газів*

Навантаження на дизель, %	Ступінь рециркуляції випускних газів, δ_{EGR} , %				
	5	10	15	20	25
60	8,53	17,06	29,12	38,53	48,53
70	7,06	15,29	25,59	33,82	46,47
80	5,29	12,65	22,94	32,65	42,94
90	3,53	10,29	19,71	27,94	38,53

Таблиця 4

*Екологічна стійкість за емісією оксидів азоту суднового дизеля
MAN-Diesel 5G70ME-C10 за під час експлуатації системи EGR
з додатковим охолодженням випускних газів*

Навантаження на дизель, %	Ступінь рециркуляції випускних газів, δ_{EGR} , %				
	5	10	15	20	25
60	14,12	24,12	32,94	46,76	52,06
70	12,35	22,35	29,71	40,88	49,71
80	10,59	20,29	27,35	37,65	47,65
90	8,24	15,59	24,71	35,59	43,53

Для кращої візуалізації результати, що наведені у табл. 3; 4, відображені у вигляді діаграм – рис. 3.

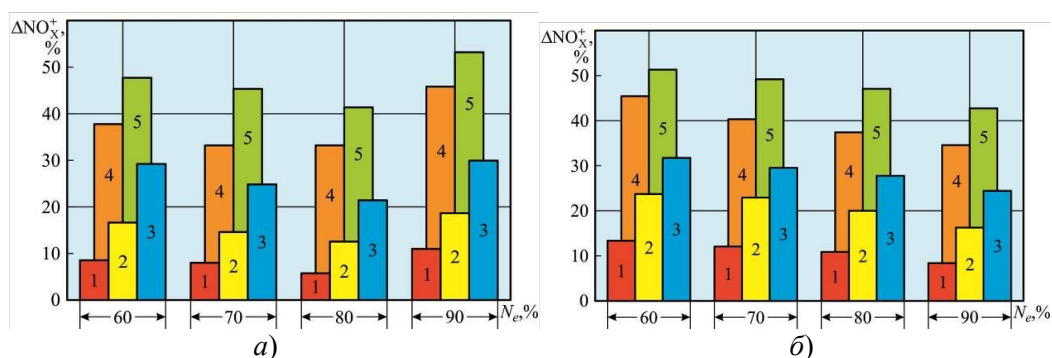


Рис. 3. Екологічна стійкість за емісією оксидів азоту суднового дизеля MAN-Diesel 5G70ME-C10 за різних умов експлуатації системи EGR:

а – без додаткового охолодження випускних газів;

б – з додатковим охолодженням випускних газів;

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

Модернізація системи EGR (стосовно встановлення елементів, що забезпечують додаткове зволоження випускних газів), а також технологія проведення експериментів були погоджені з технічним департаментом судноплавної компанії, якої належить судно [27; 28]. Під час проведення досліджень виконувались всі вимоги наглядових та класифікаційних товариств, а також інструкцій з експлуатації суднового дизеля MAN-Diesel 5G70ME-C10 та системи рециркуляції випускних газів [29-31].

Висновки. Виконані дослідження, що були виконані на судновому мало-обертовому дизелі MAN-Diesel 5G70ME-C10, обладнаному системою EGR, та отримані результати дозволяють зробити наступні висновки.

1. Одним з найбільш ефективних та розповсюджених способів, що забезпечує виконання вимог щодо емісії оксидів азоту від суднових дизелів, є рециркуляція випускних газів. Вдосконалення експлуатаційних режимів системи рециркуляції випускних газів можливо за рахунок їх додаткового зволоження, яке досягається шляхом впорскування в потік випускних газів, що повертаються в циліндр дизеля, прісної води.

2. Під час використання системи EGR без додаткового зволоження випускних газів забезпечується зниження емісії оксидів азоту до значень 1,75-3,28 г/(кВт·год). Ці величини не перевищують максимально можливе значення 3,4 г/(кВт·год), яке відповідає вимогам Tier III MARPOL.

3. Додаткове зволоження випускних газів сприяє покращенню екологічних показників роботи дизеля, що виявляється в зниженні емісії оксидів азоту до значень 1,63-3,12 г/(кВт·год). Наведені значення також відповідають вимогам Tier III MARPOL.

4. Ефективність експлуатаційних режимів системи EGR (для обох випадків – без та зі додатковим зволоженням випускних газів) може бути оцінена за

екологічною стійкістю щодо емісії оксидів азоту. Цей показник складає 38,53-48,53 % в разі експлуатації системи EGR без додаткового зволоження випускних газів та 43,53-52,06 % в разі експлуатації системи EGR з додатковим зволоженням випускних газів.

5. Додаткове зволоження випускних газів сприяє зниженню емісії оксидів азоту (в порівнянні з експлуатацією системи рециркуляції без цієї технології) та через це підвищує екологічну стійкість суднових дизелів щодо емісії оксидів азоту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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
2. 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.
3. 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>.
4. 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.
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. – P. 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.
6. 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*. – 2018. – № 7-8. – P. 37-42. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-37-42.
7. 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>.
8. Levinskyi M.V., Shapo V.F. Adaptive control for technological type control objects // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2021. – Vol. 1231. – P. 565–575. https://doi.org/10.1007/978-3-030-52575-0_47.
9. 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.

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. 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.
12. 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)). – Р. 37-43. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.
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. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін С.С., Чимшир В.І., Разінкін Р.О. Аналіз екологічної стійкості та енергетичної ефективності використання скрубберного очищення випускних газів дизелів суден морського транспорту. Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 47. – С. 157-171. doi: 10.31653/smf47.2023.157-171.
15. 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.
16. 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.
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 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. – № 7-8. Р. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
20. 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.

21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. Левінський М.В., Левінський В.М. Вибір параметрів системи стабілізації курсу судна при дії водно-хвильових збурень // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
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. Сагин С. В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. Наук. праць. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89-100.
27. 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. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
28. Заблоцкий Ю.В., Солодовников В.Г. Снижение энергетических потерь в топливной аппаратуре судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2013. – № 3. – С. 46-56.
29. Мацкевич Д.В., Сагин С.В., Ханмамедов С.А. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб.–2010. – Вып. 25. – С. 109-118.
30. Заблоцкий Ю.В. Исследование влияния органических покрытий на работу элементов топливной аппаратуры высокого давления судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2015. – № 35. – С. 83-92.
31. Gorb S., Levinskyi M., Budurov M. Sensitivity Optimisation of a Main Marine Diesel Engine Electronic Speed Governor // Scientific Horizons. – 2021. – Vol. 24(11). – P. 9-19. [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(11\).2021.9-19](https://doi.org/10.48077/scihor.24(11).2021.9-19).

REFERENCES

1. Petrychenko, O., Levinskyi, M. (2024). Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport. *Transport Systems and Technologies*. 43. P. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.
2. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2024). Vznachennya optimalnih rezhimiv ekspluatacii sudnovih dviguniv vnutrashnogo zgoryannya pid chas vikoristannya biodizelnogo paliva. *Ship power plants*. 2024. 48. P. 100-113. doi: 10.31653/smf48.2024.100-113.
3. 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. P. 36-43. [https://doi.org/ 10.29013/AJT-21-7.8-36-43](https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43).
4. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2024). Vznachennya optimalnih rezhimiv procesiv upravlinnya vipusknimi gazami sudnovih duzeliv. *Water transport*. 2(40). P. 173-185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
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. P. 14-40. [https://doi.org/ 10.3390/jmse12081440](https://doi.org/10.3390/jmse12081440).
6. Kuropyatnyk, O.A. Reduction of NO_x emission in the exhaust gases of low-speed marine diesel engines. (2018). *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 7-8. P. 37-42.
7. Petrychenko, O., Levinskyi, M., Goolak, S., Lukoševičius, V. (2025). Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport. *Sustainability*. 17. P. 21-41. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
8. Levinskyi, M.V.; Shapo, V.F. (2021). Adaptive control for technological type control objects. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 1231. P. 565-575. https://doi.org/10.1007/978-3-030-52575-0_47.
9. Sagin, S.V., Sagin, A.S. (2023). Control ta diagnostuvanya nadiinosti ta ekonomichnosti dizeliv morskih ta richkovih zasobiv transportu. *Ship power plants*. 46. P. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
10. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Tkachenko, I. (2022). Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships. *Ship power plants*. 45. P. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
11. Rusnak, D.Y., Sagin, S.V. (2020). Zabezpechennya ekologichnich vumog pri ultrazvukovii desulphurizacii vuglevodnich paliv. *Ship power plants*. 40. P. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
12. 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)). P. 37-43. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.

13. Zablotskyi, Yu.V. (2020). Pidvishenya ekonomichnosti roboti sudnovih dizeliv. Ship power plants. 40. P. 12-16. DOI: 10.31653/smf340.2020.12-16.
14. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, S.S., Chimshir, V.I., Razinkin, R.O. (2023). Analiz ekologichnoi stiicosti ta energetichnoi effektivnosti vicoristanya scrubernogo ochishenya vipusknych gaziv dizeliv sudden morskogo transportu. Ship power plants. 47. P. 157-171. doi: 10.31653/smf47.2023.157-171.
15. Poberezhniy, R.V., Sagin, S.V. Zabezpechennya ekologichnykh pokaznikiv dizeliv suden richkovogo ta morskogo transport. (2020). Ship power plants. 41. P. 5-9. DOI:10.31653/smf340.2020.5-9.
16. Sagin, S.V., Poberezhniy, R.V. Analiz osnovnykh sposobiv znizhenya emisii oksidiv azotu dizeliv suden morskogo ta vnutrishnego vodnogo transportu. (2022). Ship power plants. 44. P. 132-141. Doi: 10.31653/smf 44.2022. 132-141.
17. Zablotskyi, Yu.V. (2020). Pidvishenya palivnoi ekonomichnosti sudnovih dizelnykh ustanovok. Visnik Odeskogo nacionalnogo morskogo universitetu. 2. P. 106-119. DOI: 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.
18. Marchenko, O.O., Sagin, S.V. (2020). Vdoskonalennya procesu ochishenya sudnovih vazhkykh paliv. Ship power plants. 41. P. 10-14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
19. Sagin, A.S., Zablotskyi, 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>.
20. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, A.S. (2021). Robota sudnovogo dizelya na biodizelnom palivi. Automation of ship technical facilities. 27. P. 93-107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.
21. Sagin, S.V., Bondar, S.A. (2023). Metod poperedzhenya avariinnykh situatsii pid chas ekspluatatsii sudnovih dizeliv za analizom potocu vidmov iogo osnovnykh vuzliv. Ship power plants. 46. P. 101-109. doi: 10.31653/smf46.2023. 101-109.
22. Sagin, S.V. (2018). Znizhenya energetichnykh vtrat v precizionnykh parakh palivnoi aparatury sudnovykh dizeliv. Ship power plants. 38. P. 132-142.
23. Zverkov, D.O., Sagin, S.V. (2020). Znizhenya mekhanichnykh vtrat u sudnovykh dizelyakh. Ship power plants. 41. P. 20-25. DOI: 10.31653/smf 341.2020. 20-25.
24. Levinskyi M.V., Levinskyi V.M. (2020). Choosing the structure and parameters of vessel's course automatic control system under the influence of water-wave disturbances. Automation of ship technical facilities. 26. P. 27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
25. Sagin, S.S., Sagin, S.V. (2024). Vicoristannya shchuchynogo intelektu v situatsiyah nadmornogo zblyzhenya suden. Water transport. 1(39). P. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
26. Sagin, S.V. (2019). Opredelenie diapazona stratafikatsii vyazkosti smazochnogo msteriala v tribologicheskikh sistemah sudnovykh diziliv. Visnik Odeskogo nacionalnogo morskogo universitetu. 1. P. 89-100.

27. Sagin, S.V., Stolyaryk, T.O. (2021). Dinamika sudnovih dizeliv pid chas vikoristanya motornich mastil z rizmimi structurnimi harakteristikami. Automation of ship technical facilities. 27. P. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
28. Zablotskyi, Yu.V., Solodovnikov, V.G. (2013). Snizhenie energetishnih poter v toplivnoi apparature sudovih dizelei. Снижение энергетических потерь в топливной аппаратуре судовых дизелей. Problemi tehniki. 3. P. 46-56.
29. Matskevich, D.V., Sagin, S.V., Hanmamedov, S.A. (2010). Izmenenie reologicheskikh harakteristik smazochnih materialiv v tsirkulyatsionnoi maslyanoi sistemi v protsessi ekspluatatsii sredneovorotnogo dvigatelya. Ship power plants. 25. P. 109-118.
30. Zablotskyi, Yu.V. (2015). Issledovanie vliyaniya ogranicheskikh pokritii na rabotu elementov toplivnoi apparaturi visokogo davleniya sudovih dizelei. Ship power plants. 35. P. 83-92.
31. Gorb, S., Levinskyi, M., Budurov, M. (2021). Sensitivity Optimisation of a Main Marine Diesel Engine Electronic Speed Governor. Scientific Horizons. 24(11). 9-19. [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(11\).2021.P. 9-19](https://doi.org/10.48077/scihor.24(11).2021.P. 9-19).

Стаття надійшла до редакції 15.09.2025

Посилання на статтю: Куропятник О.А. Вдосконалення експлуатаційних режимів системи рециркуляції випускних газів суднових дизелів // *Вісник Одеського національного морського університету*: Зб. наук. праць, 2025. № 4 (78). С. 66-80. DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-66-80.

Article received 15.09.2025

Reference a Journal Artic: Kuropyatnyk O. Improving the operating modes of the exhaust gas recirculation system of marine diesel engines // *Herald of the Odesa National Maritime University*: Coll. scient. works, 2025. № 4 (78). P. 66-80. DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-66-80.