

10.31653/smf47.2023.157-171

Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін С.С., Чимшир В.І., Разінкін Р.О.

Національний університет «Одеська морська академія»

АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СКРУБЕРНОГО ОЧИЩЕННЯ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ ДИЗЕЛІВ СУДЕН МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Екологічна безпека судна є комплексними показниками та включає: безпечне управління баластними операціями, підтримання безпечного технічного стану корпусу судна, забезпечення вимог міжнародних конвенцій щодо захисту довкілля від забруднень. Особливо актуальним є управління екологічною безпекою під час знаходження суден морського транспорту в 12-ти мильній прибережній зоні, у спеціальних екологічних районах та акваторіях внутрішніх морів. Суднові енергетичні установки (СЕУ) включають до свого складу двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) / дизелі, парові та термомасильні котли, парові та газові турбіни. При цьому саме дизелі в даний час набули домінуючого поширення на всіх без винятку судах морського та внутрішнього водного транспорту, незалежно від їх водотоннажності, типу та призначення [1-3].

Забезпечуючи судно необхідною енергією (яка використовується як для руху, так і для всіх судових машин, механізмів, обладнання та приладів) дизелі викидають в атмосферу велику кількість випускних газів. Більшу частину випускних газів становлять нетоксичні компоненти (діоксид вуглецю CO_2 , водяна пара H_2O , а також атомарний кисень O_2 та азот N_2). Однак разом з ним в атмосферу потрапляють шкідливі для довкілля та людини токсичні домішки. До них відносяться оксиди азоту NO_x , оксиди сірки SO_x , монооксид вуглецю CO , а також незгорілі вуглеводні C_nH_m . Мінімізація викидів NO_x , SO_x , CO , які потрапляють в атмосферу з випускними газами судових дизелів, є актуальним завданням, на її розв'язання спрямовані численні дослідження та розробки [4-6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розв'язання проблеми управління екологічною безпекою суден морського та внутрішнього водного транспорту розглядалося різними дослідниками.

Для зниження рівня емісії оксидів азоту пропонувалося викорис-

товувати рециркуляцію випускних газів [7, 8], додаткове очищення у спеціальних каталітичних реакторах [9, 10], а також застосовувати технології зволоження наддувного повітря та подачі води в циліндр дизеля [11, 12]. Однак при цьому знижується ефективна потужність дизеля та збільшується питома витрата палива [13, 14].

У дослідженнях [15, 16] було доведено, що зниження концентрації монооксиду вуглецю в випускних газах можливе за рахунок їх додаткової фільтрації та охолодження. При цьому було встановлено, що подібні технологічні рішення збільшують аеродинамічний опір випускної магістралі. Це становиться причиною зниження ефективних показників робочого циклу дизеля [17]. Одним із варіантів зниження викидів монооксиду вуглецю є коригування навігаційного переходу з урахуванням попутної течії та попутних повітряних потоків [18]. Цей спосіб знижує загальну витрату палива на мильо плавання, проте його використання можливе лише в обмежених морських та океанських акваторіях, в яких напрямок морських та океанських течій співпадає з напрямком навігаційного переходу судна між портами [19].

Зниження емісії оксидів сірки забезпечується шляхом десульфуризації палива [20]. У суднових умовах це досягається шляхом ультразвукової чи гідродинамічної обробки палива. Однак при цьому суттєво покращується лише технічний стан циліндрової групи та газовипускної магістралі дизеля. Рівень концентрації оксидів сірки у випускних газах за такої обробки палива зменшується незначно. Основним методом зниження емісії оксидів сірки із випускними газами є використання палива із вмістом сірки до 0,1 % за масою. Відповідно до міжнародного стандарту ISO8217 “Fuel Standard for marine distillate fuels” ці сорти суднових палив відносяться до класу Marine Gas Oil та характеризуються найбільшою вартістю порівняно з паливами інших класів. Використання таких палив знижує економічну ефективність суден морського транспорту. Це є однією з причин використання скрубєрного очищення випускних газів, при якому можливе використання палива із вмістом сірки до 3,5 %.

Постановка завдання. Додаткове очищення випускних газів ДВЗ в скрубєрах суттєво поширює можливість використання морських сортів палива з підвищеним вмістом сірки, сприяє тим самим зменшенню експлуатаційних витрат на придбання палива. Одночасно з цим системи скрубєрного очищення вимагають додаткових витрат енергії на обслуговування обладнання, що входить до їх складу, а та-

кож є підставою збільшення опору в газовипускної магістралі дизелів та пов'язаного з цим зменшення ефективної потужності дизелів. В зв'язку з цим завданням дослідження було проведення аналізу екологічної, економічної та енергетичної ефективності процесу скрубберного очищення випускних газів ДВЗ суден морського транспорту.

Виклад основного матеріалу дослідження. Основні екологічні показники суднових дизелів визначаються емісією оксидів азоту NO_x та оксидів сірки SO_x , які потрапляють у довкілля з випускними газами. Значення емісії NO_x та SO_x регламентуються вимогами Annex VI MARPOL [5, 8-10]. Максимально допустима концентрація NO_x у випускних газах визначається за спеціальними виразами залежно від року будівництва судна та характеристик дизеля. Викиди SO_x регламентуються масовим вмістом сірки у судновому паливі. З 01.01.2020 р. відповідно до Annex VI MARPOL вміст сірки у паливі не повинен перевищувати 0,1 % за умови експлуатації судна в зонах спеціального екологічного контролю (Sulphur Emission Control Areas – SECAs) та не більше 0,5 % під час експлуатації судна поза районами SECAs. Спеціальні зони SECAs визначені Міжнародною морською організацією (ІМО) та показані на рис. 1. Для країн Європи до них належать акваторії Північного та Балтійського морів, а також порти Середземномор'я.

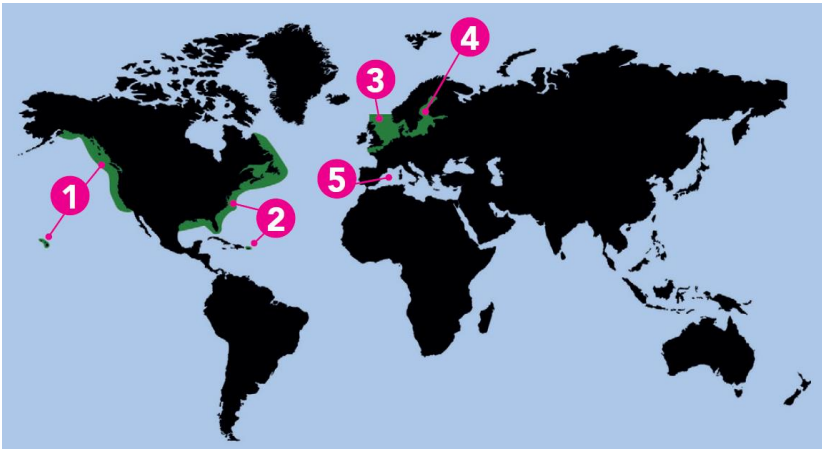


Рис. 1. Райони SECAs відповідно до вимог ІМО:

- 1 – SECA Північної Америки, включаючи більшу частину США, узбережжя Канади та Гавайї; 2 – SECA Карибського басейну США, включаючи Пуерто-Ріко та Віргінські острови США; 3 – SECA Північного моря, включаючи Ла-Манш; 4 – Балтійське море SECA; 5 – усі порти ЄС

Використання палива з вмістом сери понад 0,5 % від маси можливо тільки за умови додаткового очищення випускних газів у спеціальних технічних пристроях (в якості яких зазвичай встановлюються скрубери) [36, 37]. У разі управління екологічною безпекою морських суден за допомогою додаткового очищення випускних газів контролюється співвідношення $SO_2(\text{ppm})/CO_2(\%)$ після скрубера. Ця величина не повинна перевищувати значення 4,1 SO_2/CO_2 під час знаходження судна в SECAs та значення 21,7 SO_2/CO_2 під час перебування судна за межами SECAs. Вимоги Annex VI MARPOL щодо контролю викидів оксидів сірки наведені в таблиці 1.

Дослідження виконувались на судне класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн. В енергетичну установку судна входили дизелі 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel & Turbo та 6EY18ALW Yanmar. Основні характеристики дизелів наведені в таблиці 2.

Таблиця 1. Вимоги Додатка VI MARPOL щодо емісії оксидів сірки

Де та коли застосується	Вміст сірки в паливі, %	Співвідношення викидів $SO_2(\text{ppm})/CO_2(\%)$
За межами SECA або порту ЄС, починаючи з 1 січня 2020 року	0,5	21,7
В SECA або порту ЄС, починаючи з 1 січня 2020 року	0,1	4,3

Таблиця 2. Основні характеристики дизелів судна класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн

Параметр	5S60ME-C8.2 MAN-Diesel & Turbo	6EY18ALW Yanmar
Функціональне призначення	головний	допоміжний
Діаметр циліндра, м	0,6	0,18
Хід поршня, м	2,4	0,28
Кількість циліндрів	5	6
Номинальна потужність, кВт	8050	800
Частота обертання вала, хв^{-1}	89	900
Питома витрата палива в діапазоні навантажень 45...100 %, $\text{кг}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$	0,187...0,175	0,198...0,183
Кількість в складі CEU	1	3

Для додаткового очищення випускних газів від оксидів сірки на судні було встановлено скрубери систему очищення (рис. 2). Це доз-

воляло використовувати для суднових дизелів (як головного, також і допоміжних) паливо з вмістом сірки до 3,5 % за масою.

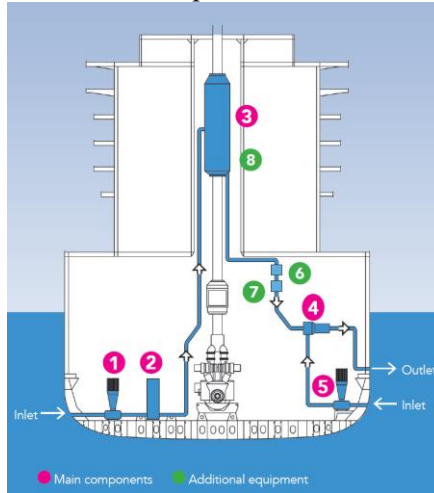


Рис. 2. Комплектація суднової системи очищення вихідних газів:

- 1 – насос заборотної (морської) води; 2 – фільтр заборотної (морської) води;
- 3 – скруббер; 4 – змішувач; 5 – буферний насос; 6 – блок дегазації; 7 – блок фільтрації; 8 – охолоджувач вихідних газів

Очищення вихідних газів виконувалося за відкритим типом. Гази від головного двигуна та трьох допоміжних двигунів (на рис. 2 не показані) надходили до скруббера 3. Для очищення газів використовувалася морська вода, яка подавалася в скруббер 3 насосом морської води 1 через фільтр 2. Продуктивність насоса 1 (залежно від вмісту сірки у паливі, потужності головного двигуна, а також кількості працюючих допоміжних двигунів) змінювалась у діапазоні 200...550 кг/год. Температура газів у скруббері 3 підтримувалася в діапазоні 200...300°C. У разі перевищення цього значення, гази охолоджувалися за допомогою охолоджувача 8. Вода після скруббера 3 надходила до блоку дегазації 6 та до блоку фільтрації 7, в яких виконувалося відділення від води газів і твердих домішок. Далі вода зливалася за борт. Для утримання необхідного рівня кислотності (рівень якої підтримувався в діапазоні $\text{pH}=6,8...7,0$) до води, що зливалася за борт, в змішувачі 4 додавалася заборотна вода. Подача заборотної води до змішувача 4 здійснювалася буферним насосом 5. Продуктивність буферного насоса змінювалася в діапазоні 200...300 кг/год. Робота всіх елементів системи контролювалася автоматично. Також автома-

тично підтримувалося необхідне відношення SO_2/CO_2 . Це забезпечувалося шляхом зміни продуктивності насосу заборотної води 1.

Система забезпечує необхідний рівень очищення випускних газів у наступному діапазоні роботи суднової енергетичної установки:

- мінімальний експлуатаційний режим – робота одного допоміжного двигуна 6EY18ALW Yanmar на будь-якому навантаженні;
- максимальний експлуатаційний режим – робота головного двигуна 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel & Turbo на навантаженні 85 % та двох допоміжних двигунів 6EY18ALW Yanmar на навантаженні 85%.

Також система може експлуатуватися за умови 105 % навантаження головного двигуна 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel & Turbo та загального навантаження допоміжних двигунів 6EY18ALW Yanmar 150 %.

Система передбачає автоматичну реєстрацію місця знаходження судна, навантаження на головний двигун та допоміжні двигуни, параметри морської води в контурі очищення, а також поточне значення SO_2/CO_2 . Реєстрація цих даних проводиться з інтервалом 3 хвилини. На всіх експлуатаційних режимах, а також у всіх районах плавання (всередині та поза SECAs) робота головного двигуна 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel & Turbo та допоміжних двигунів 6EY18ALW Yanmar відбувалася з використанням палива RMG380 [21-23]. Основні характеристики палива наведені у таблиці 3.

Таблиця 3 Основні характеристики палива RMG380

В'язкість за 50°C, сСт	329
Густина за 15°C, кг/м ³	986
Вміст сірки, %	2,7
Температура спалаху, °C	81
Теплотворна здатність, кДж/кг	39070

Програма автоматичного моніторингу роботи системи очищення випускних газів дозволяла контролювати її основні параметри. Проте, для аналізу ефективності системи очищення випускних газів розглядалося лише зміна відношення емісії оксидів сірки до оксидів вуглецю за часом – $\frac{SO_2}{CO_2} = f(t)$.

Результати цих досліджень наведені в таблиці 4. Значення відношення $\frac{SO_2}{CO_2}$ фіксувалися системою моніторингу через кожні 3 хвилини. Для скорочення обсягу інформації дані значення в табли-

ці 4 наведені через 5 годин (під час знаходження судна поза SECA) і через 10 годин (під час знаходження в SECA).

Таблиця 4. Моніторинг відношення SO_2/CO_2 під час навігаційного переходу

Знаходження поза SECA		Знаходження в SECA			
Час, години	SO_2/CO_2	Час, години	SO_2/CO_2	Час, години	SO_2/CO_2
5	18,72	50	3,75	120	3,80
10	19,21	60	4,02	130	4,05
15	17,72	70	3,72	140	3,72
20	18,68	80	3,18	150	3,63
25	20,02	90	3,82	160	3,53
30	20,83	100	4,17	170	3,61
35	19,22	110	4,15	180	3,68
40	18,32				
45	18,82				

Для кращої візуалізації отримані значення представлені у вигляді рис. 3.

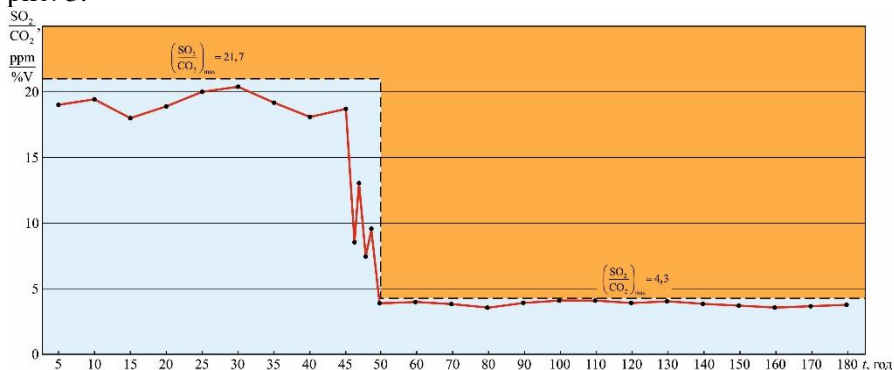


Рис. 3. Зміна відношення $\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}$

газів дизелів судна класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн під час знаходження судна поза SECA (ліворуч) та в SECA (праворуч)

Ефективність методу системи скрубберного очищення можна оцінити за виразом, що характеризує екологічну стійкість судна:

$$\text{Есо}^+ = \frac{\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{max}} - \left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_t}{\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{max}}} \cdot 100\%$$

де $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\max}$ – максимальне для умов роботи судна (в SECA або поза

SECA) значення відношення $\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}$;

$\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_t$ – відношення $\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}$ в момент часу t .

Чим більша величина E_{co^+} , тим далі від максимально допустимого значення залежність – $\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2} = f(t)$ рис. 3, тим вище екологічна

стійкість судна та екологічна безпека навігаційного переходу.

Значення екологічної стійкості під час розглянутого навігаційного переходу за умови використання системи скрубєрного очищення випускних газів наведені у таблиці 5.

Таблиця 5. Екологічна стійкість судна під час навігаційного переходу

Знаходження поза SECA		Знаходження в SECA			
Час, години	E_{co^+} , %	Час, години	E_{co^+} , %	Час, години	E_{co^+} , %
5	15,92	50	12,79	120	11,63
10	12,96	60	6,51	130	5,81
15	22,46	70	13,49	140	13,49
20	16,17	80	26,05	150	15,58
25	8,39	90	11,17	160	17,91
30	4,18	100	3,02	170	16,05
35	12,90	110	3,49	180	14,42
40	18,46				
45	15,30				

Для краткої візуалізації за результатами таблиці 5 побудовані діаграми – рис. 4.

Використання методів управління екологічною безпекою завжди пов'язане з підвищенням витрат енергії та палива на їхнє забезпечення. У разі системи скрубєрного очищення додаткові витрати енергії пов'язані з використанням насосів морської води та буферних насосів (позиції 1 та 5 на рис. 2). Крім того, використання скрубєрного очищення на 1,0...1 5 % знижує потужність головного та допоміжних двигунів, що пов'язане з підвищенням аеродинамічного опору в газоповітряній магістралі дизелів.

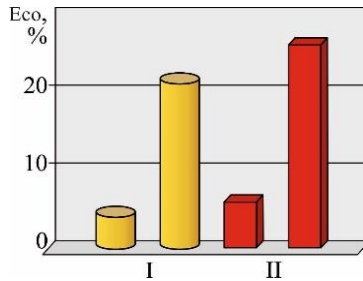


Рис. 4. Зміна екологічної стійкості судна класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн:

I – робота у SECA; II – робота поза SECA

Для розглянутої скрубберної системи очищення випускних газів потужність, необхідна для забезпечення роботи двох насосів морської води

$$N_p^{sw} = 2 \cdot 40 = 80 \text{ кВт};$$

де 40 кВт – потужність одного насоса морської води;

потужність, необхідна для забезпечення роботи двох буферних насосів

$$N_p^{bw} = 2 \cdot 35 = 70 \text{ кВт};$$

де 35 кВт – потужність одного буферного насоса.

Втрата 1,0...1,5 % потужності головного двигуна 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel & Turbo за умови його роботи на навантаженні 85 % від номінальної потужності

$$\Delta N_e^{ME} = 0,85 \cdot 8050 \cdot 0,01 = 68,4 \text{ кВт},$$

$$\Delta N_e^{ME} = 0,85 \cdot 8050 \cdot 0,015 = 102,6 \text{ кВт};$$

де 8050 кВт – номінальна потужність дизеля 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel & Turbo.

Втрата 1,0...1,5 % потужності двох допоміжних двигунів 6EY18ALW Yanmar за умови їхньої роботи на навантаженні 85 % від номінального

$$\Delta N_e^{AE} = 0,85 \cdot 2 \cdot 800 \cdot 0,01 = 13,6 \text{ кВт},$$

$$\Delta N_e^{AE} = 0,85 \cdot 2 \cdot 800 \cdot 0,015 = 20,4 \text{ кВт}.$$

де 800 кВт – номінальна потужність дизеля 6EY18ALW Yanmar.

Загальні втрати потужності у разі використання скруберної системи очищення випускних газів

$$\Delta N^{sc} = N_p^{sw} + N_p^{bw} + \Delta N_e^{ME} + \Delta N_e^{AE}.$$

Залежно від втрат потужності головним двигуном 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel & Turbo та допоміжними двигунами 6EY18ALW Yanmar діапазон загальних втрат потужності складає

$$\Delta N^{sc}=232\dots273 \text{ кВт.}$$

Відносні втрати потужності при використанні скруберного очищення випускних газів (порівняно з потужністю головного двигуна) можуть бути визначені за виразом

$$\delta_{SC}^N = \frac{\Delta N^{sc}}{N_e^{ME}} \cdot 100\%.$$

З урахуванням значень ΔN^{sc} та N_e^{ME} отримаємо

$$\delta_{SC}^N = 2,92\dots3,42 \text{ \%}.$$

Компенсація втрат потужностей головним та допоміжними двигунами, а також забезпечення роботи додаткових насосів системи скруберного очищення (двох морської води та двох бустерних) призводить до додаткових витрат палива.

Для головного двигуна 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel & Turbo ці втрати визначаються як

$$\Delta b_e^{ME} = b_e^{ME} \cdot \Delta N_e^{ME};$$

де $\Delta b_e^{ME} = 0,175 \text{ кг/(кВт}\cdot\text{год)}$ – питома ефективна витрата палива головним двигуном на навантаженні 85 % номінальної потужності.

Для допоміжного двигуна 6EY18ALW Yanmar

$$\Delta b_e^{AE} = b_e^{AE} \cdot (\Delta N_e^{AE} + N_p^{sw} + N_p^{bw});$$

де $\Delta b_e^{AE} = 0,186 \text{ кг/(кВт}\cdot\text{год)}$ – питома ефективна витрата палива допоміжними двигунами на навантаженні 85 % номінальної потужності.

Враховуючи, що головний та допоміжні двигуни працюють на одному сорті палива, загальна витрата палива визначиться як

$$\Delta b_e^{\Sigma} = \Delta b_e^{ME} + \Delta b_e^{AE}$$

та складе

$$\Delta b_e^\Sigma = 0,175(68,4 \dots 102,6) + 0,186((13,6 \dots 20,4) + 80 + 70) = 42,4 \dots 49,6 \text{ кг/год.}$$

Загальна витрата палива на роботу головного та допоміжного двигунів при їх експлуатації на навантаженні 85 % від номінальної потужності складає

$$B_\Sigma = 0,175 \cdot 0,85 \cdot 8050 + 2 \cdot 0,85 \cdot 800 \cdot 0,186 = 1450 \text{ кг/год.}$$

Відносне збільшення витрати палива при використанні скрубберного очищення визначається як

$$\delta_{SC}^B = \frac{\Delta b_e^\Sigma}{B_\Sigma} \cdot 100\%$$

та складає

$$\delta_{SC}^B = 2,92 \dots 3,42 \text{ \%}.$$

Збіг у значеннях δ_{SC}^N та δ_{SC}^B підтверджує правильність розрахунків та припущень. Діаграма, що відображає відносні втрати потужності та збільшення витрати палива під час використання скрубберного методу управління екологічною безпекою, наведено на рис. 5.

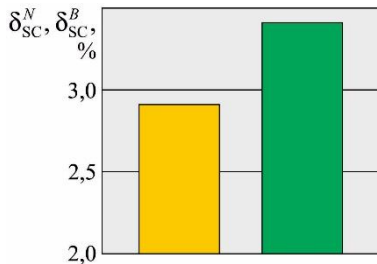


Рис. 5. Діапазон відносного збільшення втрат потужності та питомої витрати палива під час використання скрубберного управління екологічною безпекою судна класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн

Під час проведення досліджень контролювалися та підтримувалися у необхідному діапазоні всі основні параметри роботи головного та допоміжних двигунів [24, 25], а також параметри в системах, які забезпечують їхнє функціонування [26-28].

Висновки і перспективи подальших досліджень. Управління екологічною безпекою навігаційних переходів є одним із складових, які визначають роботу морського транспорту. Особливо актуальною є підтримка екологічної безпеки для районів Північної Європи, в яких створені спеціальні екологічні райони контролю викидів оксиди

сірки. Виконання міжнародних вимог щодо рівня емісії SO_x можливе шляхом додаткового очищення випускних газів. Ефективність використання методів управління екологічною безпекою може бути оцінена за екологічною стійкістю судна. Чим вище значення екологічної стійкості – тим на більшій відстані від максимально можливих значень емісії SO_x перебувають поточні значення емісії SO_x .

До недоліків методів керування екологічною безпекою відносяться втрати потужності дизеля, які пов'язані з додатковим аеродинамічним опором у газовипускній магістралі. Також вимагають додаткових витрат енергії додаткове обладнання, яке забезпечує функціонування систем очищення газів (насосів морської води та буферних насосів).

Економічна ефективність скрубєрного очищення випускних газів визначається можливістю використання в суднових дизелях палива, вміст сірки в якому досягає 3,5 %. Дані сорти палива (порівняно з паливом із вмістом сірки до 0,5 %) мають меншу вартість. Тому використання скрубєрного очищення випускних газів найбільше раціонально для морських суден з потужними енергетичними установками і, відповідно, підвищеною витратою палива.

На жаль, методи управління екологічною безпекою характеризуються додатковими ризиками та загрозами. Для системи скрубєрного очищення випускних газів – це робота з відкритою контурою, при якому вода зі скрубєра зливається за борт без додаткового очищення. Це зобов'язує виконувати постійний моніторинг та забезпечувати постійний контроль її кислотного числа.

Перелік використаних джерел

1. Madey, V. (2022). Assessment of the efficiency of biofuel use in the operation of marine diesel engines. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(1(64)), 34-41. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.255959>.
2. 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\(11\).2021.9-19](https://doi.org/10.48077/scihor.24(11).2021.9-19).
3. Sagin, S., Madey, V., Stoliaryk, T. (2021) Analysis of mechanical energy losses in marine diesels. *Technology Audit and Production Reserves*, 5(2(61)), 26-32. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239698>.

4. Stoliaryk, T. (2022). Analysis of the operation of marine diesel engines when using engine oils with different structural characteristics. *Technology Audit and Production Reserves*, 5(1(67)), 22–32. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.265868>

5. 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. Scientific journal*, 7-8, 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

6. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O. (2023). 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*, 118, 195-206. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.118.13>.

7. Puškár, M., Tarbajovský, P., Lavčák, M., Šoltésová, M. (2022). Marine Ancillary Diesel Engine Emissions Reduction Using Advanced Fuels. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10, 1895. <https://doi.org/10.3390/jmse10121895>.

8. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2018) The Use of Exhaust Gas Recirculation for Ensuring the Environmental Performance of Marine Diesel Engines. *Naše more : International Journal of Maritime Science & Technology*, 65(2), 78-86. DOI 10.17818/NM/2018/2.3.

9. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. (2022). Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters. *Naše more : International Journal of Maritime Science & Technology*, 69(1), 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.

10. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. (2022). Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe. *Journal of Maritime Science and Engineering*, 10(9), 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.

11. Rymar, T., Tatarchenko, H., Fomin, O., Píšťek, V., Kučera, P., Beran, M., Burlutskyy, O. (2022). The Study of Manufacturing Thermal Insulation Materials Based on Inorganic Polymers under Microwave Exposure. *Polymers*, 14, 3202. <https://doi.org/10.3390/polym14153202>.

12. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels. *Journal Marine Science and Engineering*, 10(10), 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.

13. Kuropyatnyk, O.A. (2020). Reducing the emission of nitrogen oxides from marine diesel engines. *International Conference “Scientific*

research of the SCO countries: synergy and integration, 154-160. DOI: 10.34660/INF.2020.24.53689.

14. Sagin, S.V. (2019). Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines. *Materials of the International Conference «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration». Part 1*, 139-145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.

15. Sagin, S., Karianskyi, S., Madey, V., Sagin, A., Stoliaryk, T., Tkachenko, I. (2023). Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines. *Journal of Maritime Science and Engineering*, 11(1), 120. <https://doi.org/10.3390/jmse11010120>.

16. Vorokhobin, I., Burmaka, I., Fusar, I., Burmaka, O. (2022). Simulation Modeling for Evaluation of Efficiency of Observed Ship Coordinates. *TransNav : The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 16(1), 137-141. DOI: 10.12716/1001.16.01.15.

17. Sagin, S.V. (2020) Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils. *Materials of the International Conference «Process Management and Scientific Developments», Part 4*, 195-202. DOI: 10.34660/INF.2020.4.52991.

18. Ershov, M.A., Savelenko, V.D., Makhmudova, A.E., Rekhletskaia, E.S., Makhova, U.A., Kapustin, V.M., Mukhina, D.Y., Abdellatief, T.M.M. (2022). Technological Potential Analysis and Vacant Technology Forecasting in Properties and Composition of Low-Sulfur Marine Fuel Oil (VLSFO and ULSFO) Bunkered in Key World Ports. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10, 1828. <https://doi.org/10.3390/jmse10121828>.

19. Ershov, M.A., Grigorieva, E.V., Abdellatief, T.M.M., Chernysheva, E.A., Makhin, D.Y., Kapustin, V.M. (2021). A New Approach for Producing Mid-Ethanol Fuels E30 Based on Low-Octane Hydrocarbon Surrogate Blends. *Fuel Processing Technology*, 213, 106688. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106688>.

20. Huang, J., Fan, H., Xu, X., Liu, Z. (2022). Life Cycle Greenhouse Gas Emission Assessment for Using Alternative Marine Fuels: A Very Large Crude Carrier (VLCC) Case Study. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10, 1969. <https://doi.org/10.3390/jmse10121969>.

21. Sagin, S.V., Sagin, S.S., Madey, V. (2023). Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships

of maritime transport. *Technology Audit and Production Reserves*, 4 (3 (72)), 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>

22. Salova, T., Lekomtsev, P., Likhanov, V., Lopatin, O., Belov, E. (2023). Development of calculation methods and optimization of working processes of heat engines. *AIP Conference Proceedings*, 2700, 050015 <https://doi.org/10.1063/5.0137793>.

23. Ruiz Zardoya, A., Oregui Bengoetxea, I., Lopez Martinez, A., Loroño Lucena, I., Orosa, J.A. (2023). Methodological Design Optimization of a Marine LNG Internal Combustion Gas Engine to Burn Alternative Fuels. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11, 1194. <https://doi.org/10.3390/jmse11061194>.

24. Sultanbekov, R., Denisov, K., Zhurkevich, A., Islamov, S. (2022). Reduction of Sulphur in Marine Residual Fuels by Deasphalting to Produce VLSFO. *Journal Marine Science and Engineering*, 10, 1765. <https://doi.org/10.3390/jmse10111765>.

25. Chountalas, T.D., Founti, M., Hountalas, D.T. (2023). Review of Biofuel Effect on Emissions of Various Types of Marine Propulsion and Auxiliary Engines. *Energies*, 16, 4647. <https://doi.org/10.3390/en16124647>.

26. Varbanets, R., Fomin, O., Píšťek, 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, 321. <https://doi.org/10.3390/jmse9030321> <https://www.mdpi.com/2077-1312/9/3/321>.

27. Gorb, S., Budurov, M. (2021). Increasing the accuracy of a marine diesel engine operation limit by thermal factor. *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 6, 18-26. DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v15i3.20865>.

28. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., Lohinov, O., Ocheretna, V. (2023). Integral Approach to Vulnerability Assessment of Ship's Critical Equipment and Systems. *Transactions on Maritime Science*, 12(1). doi: 10.7225/toms.v12.n01.002.