

**УПРАВЛІННЯ ЕМІСІЄЮ ОКСИДІВ СІРКИ  
ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВА БІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ,  
ЯКЕ СТАНОВЛЯТЬ ГІДРОВАНІ РОСЛИННІ МАСТИЛА**

**О.А. Куропятник**

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

**Анотація**

**Вступ.** Одним з актуальних завдань, яке виникає під час експлуатації суден морського транспорту, є забезпечення їх екологічності, зокрема щодо емісії оксидів сірки із випускними газами суднових дизелів. Способом розв'язання цього завдання є використання палива біологічного походження, яке становлять гідровані рослинні мастила. Як правило, вміст сірки в подібних сортах палива не перевищує 0,1 % за масою, що дозволяє їх використання або як окремого палива, або (що найчастіше) у складі суміші з паливом нафтового походження.

**Мета** дослідження – визначення можливості управління емісією оксидів сірки з випускними газами суднових дизелів під час використання палива біологічного походження, яке становлять гідровані рослинні мастила.

**Результати.** Дослідження виконувались на суднових середньооборотних дизелях Wartsila 6L32, які під час проведення експериментів експлуатувались на паливах нафтового походження DMA20 (у випадку знаходження судна всередині SECAs) та RMG350 (у випадку знаходження судна поза SECAs). Як альтернативне паливо (визначенню впливу якого на емісію оксидів сірки були присвячені дослідження) використовувалось паливо HVO – Hydrotreated Vegetable Oil, що належить до класу палива біологічного походження, яке становлять гідровані рослинні мастила. Під час досліджень створювались та використовувались у дизелях паливні суміші, які становили 70...80 % палива RMG350 або DMA20 та 30...10 % палива HVO. Як показник, що характеризує екологічність роботи судна за емісією оксидів сірки, приймалося відношення ( $SO_x/CO_2$ ), вимірювання якого забезпечувалось судновою системою діагностики та виконувалось у газовипускній системі дизеля. Для паливних сумішей, які становили 70...90 % палива нафтового походження RMG350 або DMA20 та палива 30...10 % палива HVO в діапазоні експлуатаційних навантажень на дизелі 50...80 %, було встановлено зниження емісії оксидів сірки на 4,43...23,59 % під час знаходження судна поза SECAs та на 8,91...27,21 % під час знаходження судна всередині SECAs.

**Висновки.** Експериментальними дослідженнями, що виконувались на суднових дизелях Wartsila 6L32, підтверджена можливість управління емісією оксидів сірки з випускними газами шляхом використання палива біологічного походження HVO.

**Ключові слова:** екологічні показники, емісія оксидів сірки, морський транспорт, паливо біологічного походження, паливо нафтового походження, судновий дизель.

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

O.A. Kuropyatnyk

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

**Summary**

**Introduction.** One of the current challenges that arise during the operation of maritime transport vessels is ensuring their environmental friendliness, in particular with regard to the emission of sulfur oxides with exhaust gases from ship diesel engines. The solution to this problem is the use of fuel of biological origin, which consists of hydrogenated vegetable oils. As a rule, the sulfur content in such fuel types does not exceed 0.1 % by weight, which allows their use either as a separate fuel or (most often) in a mixture with fuel of petroleum origin.

**The purpose of the study** is determining the possibility of controlling sulfur oxide emissions from marine diesel engine exhaust gases when using bio-based fuels consisting of hydrogenated vegetable oils.

**Results.** The research was carried out on medium-speed ship diesel engines Wartsila 6L32, which during the experiments were operated on fuels of petroleum origin DMA20 (in the case of the ship being inside SECAs) and RMG350 (in the case of the ship being outside SECAs). As an alternative fuel (the research was devoted to determining the impact of which on the emission of sulfur oxides), HVO fuel was used – Hydrotreated Vegetable Oil, which belongs to the class of fuels of biological origin, which are hydrogenated vegetable oils. During the research, fuel mixtures were created and used in diesel engines, which consisted of 70–80 % RMG350 or DMA20 fuel and 30–10 % HVO fuel. As an indicator characterizing the environmental friendliness of the ship's operation in terms of sulfur oxide emissions, the ratio ( $SO_2/CO_2$ ) was taken, the measurement of which was provided by the ship's diagnostic system and was performed in the diesel exhaust system. For fuel mixtures consisting of 70–90 % petroleum-based fuel RMG350 or DMA20 and 30–10 % HVO fuel, in the range of operating loads on diesel engines of 50–80 %, a reduction in sulfur oxide emissions of 4.43–23.59 % was established when the vessel was outside SECAs and by 8.91–27.21 % when the vessel was inside SECAs.

**Conclusions.** Experimental studies carried out on Wartsila 6L32 marine diesel engines confirmed the possibility of controlling sulfur oxide emissions with exhaust gases by using HVO fuel of biological origin.

**Key words:** biofuels, environmental indicators, marine diesel, maritime transport, petroleum fuels, sulfur oxide emissions.

**Вступ.** Забезпечення екологічності суден морського та внутрішнього водного транспорту є актуальним завданням, на розв'язання якого спрямовані дослідження науковців та технічні рекомендації фірм-виробників суднових дизелів. Головною метою цих досліджень та рекомендацій є зменшення забруднення водного та повітряного середовища під час експлуатації суднових енергетичних установок

та систем, що забезпечують їх функціонування [1; 2]. Самим поширеним типом теплових двигунів, що входять до складу суднових енергетичних установок, є двигуни внутрішнього згоряння (дизелі), які порівняно з іншими тепловими двигунами – паровими чи газовими турбінами – характеризуються більшим ефективним коефіцієнтом корисної дії та меншою питомою витратою палива. Саме ці обставини гарантують домінуюче поширення дизелів на суднах морського та внутрішнього водного транспорту та їх використання як головних та допоміжних двигунів [3; 4].

Отримання ефективної потужності у судових дизелях неможливе без використання палива, кінцевим продуктом життєвого циклу якого є випускні гази, що потрапляють у довкілля та сприяють його забрудненню. Найбільш небезпечними речовинами, що входять до складу випускних газів судових дизелів та негативно впливають на екологічність морських суден, є оксиди азоту  $\text{NO}_x$  та сірки  $\text{SO}_x$ . Саме зі зниженням емісії цих складників пов'язане завдання з підвищення екологічності роботи суден морського та внутрішнього водного транспорту [5; 6].

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Відповідно до вимог Annex VI MARPOL рівень емісії оксидів сірки  $\text{SO}_x$  з випускними газами судових дизелів регламентується вмістом сірки в паливі. Особлива увага щодо емісії оксидів сірки приділяється під час знаходження суден морського та внутрішнього водного транспорту у районах спеціального екологічного контролю – Sulphur emission control area (SECAs). Під час експлуатації суден всередині SECAs максимальний вміст сірки в паливі не повинен перевищувати 0,1 % за масою, в разі експлуатації поза SECAs дозволяється використання палива, вміст сірки у якому не перевищує 0,5 %. Екологічність роботи морських суден щодо емісії оксидів сірки також визначається відношенням  $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)$ , значення якого повинно відповідати вмісту сірки у судовому паливі. Під час знаходження судна всередині SECAs значення відношення  $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)$  не повинно перевищувати 4,3 ppm/%, у випадку експлуатації судна поза SECAs – бути не більш за 21,7 ppm/% [7; 8].

Саме під час знаходження морського судна в цих акваторіях проводився комплекс досліджень з визначення можливості керування емісією оксидів сірки шляхом використання палива біологічного походження, яке становлять гідровані рослини мастила.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Зменшення емісії оксидів сірки  $\text{SO}_x$  з випускними газами судових дизелів досягається двома основними шляхами – через використання спеціальних систем очищення випускних газів та через забезпечення роботи судових дизелів на паливі, вміст сірки в якому не перевищує 0,1 % сірки за масою [9; 10].

Під час використання спеціальних систем очищення (найбільш розповсюдженими з яких є скрубери відкритого чи закритого типу) до потоку випускних газів попадає прісна чи забортна (морська) вода, в якій розчинені спеціальні хімічні речовини [11; 12]. У зв'язку з реакцією цих речовин (як правило, сильних неорганічних основ  $\text{NaOH}$  або  $\text{KOH}$ ) та з'єднань, що містять сірку (здебільшого сірчистої кислоти

$H_2SO_3$  та сірчаної кислоти  $H_2SO_3$ ) утворюються сольові розчини, які додатково розбавляються морською водою та видаляються за борт. При цьому вміст оксидів сірки  $SO_x$  у випускних газах суттєво знижується. Це дозволяє використовувати технології скрубберного очищення в разі експлуатації суднових дизелів на паливі, вміст сірки в якому може досягати 3,5 % за масою [13; 14]. Встановлення скрубберних систем очищення вимагає початкових фінансових витрат на їх встановлення. Ще одним негативним фактором цих систем є збільшення аеродинамічного опору в газопускній системі дизелів. При цьому скрубберні системи дозволяють використання палива із вмістом сірки до 3,5 % за масою, які мають нижчу вартість [15; 16].

Під час використання палива, вміст сірки в якому не перебільшує 0,1 % за масою, судновий дизель та його паливна система заздалегідь переводяться на експлуатаційні режими, що забезпечують ці умови [17; 18]. Тривалість цього переведення може досягати кількох годин та залежить від потужності дизелів та кількості палива із підвищеним вмістом сірки в паливній системі. Здебільшого як такі палива використовуються палива нафтового походження категорії Low-sulfur fuel (із вмістом сірки 0,08...0,1 % за масою), або Ultra-low-sulfur fuel (із вмістом сірки до 0,05 % за масою) [19; 20]. Основним недоліком використання подібних палив є їх більш висока вартість порівняно з паливом, вміст сірки в якому перебуває в межах 0,5 %, та особливо з паливом із вмістом сірки близько 3,5 % (використання якого можливе під час встановлення на дизелях скрубберних систем очищення) [21; 22].

**Формулювання цілей статті.** У зв'язку з вищевикладеним метою дослідження є аналіз можливості управління емісією оксидів сірки шляхом використання палива біологічного походження, яке становлять гідровані рослинні мастила.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження виконувались на спеціалізованому морському судні класу Container Ship, призначеному для транспортування 8480 TEU. Судно здійснювало навігаційні переходи як всередині SECAs, також поза цими районами. До складу допоміжної енергетичної установки якого входили чотири суднових середньооберткових дизелі Wartsila 6L32. Під час проведення експериментів суднові дизелі Wartsila 6L32 експлуатувались на паливах нафтового походження DMA20 (у випадку знаходження судна всередині SECAs) та RMG350 (у випадку знаходження судна поза SECAs). Ці палива використовувались як основні [23; 24]. Як альтернативне паливо (визначенню впливу якого на емісію оксидів сірки були присвячені дослідження) використовувалось паливо HVO – Hydrotreated Vegetable Oil, що належить до класу палива біологічного походження, яке становлять гідровані рослинні мастила [25; 26]. Основні характеристики палив наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристики моторних палив

Характеристика	Марка палива		
	DMA20	RMG350	HVO
Густина при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	874	912	918
В'язкість при 40 °С, мм <sup>2</sup> /с	10,7	342	322
Вміст сірки, %	0,084	0,42	0,018
Нижча теплотворна здатність, кДж/кг	42630	41110	44370

Комплектація паливної системи дизелів відповідала принциповій схемі, що надана на рис. 1, при цьому на такому етапі досліджень як паливо біологічного походження використовувалось паливо класу HVO (рис. 1).

Експлуатація дизелів виконувалась у такий спосіб. Під час знаходження судна поза екологічними районами експлуатація дизелів здійснювалась на паливі RMG350, яке знаходилося у витратному танку 1. Стан палива RMG350 (насамперед його густина, в'язкість та температура) дозволяв його подачу до паливної апаратури дизелів 10, 14, 15, 16. Це забезпечувалось паливним насосом 7 після додаткового очищення палива в паливному фільтрі 4. Кількість одночасно працюючих дизелів визначалась залежно від загального навантаження на суднову електростанцію, при цьому у будь-яких випадках не перевищувало трьох.

Під час знаходження судна в особливих екологічних районах експлуатація дизелів здійснювалась на паливі DMA20, яке знаходилося у витратному танку 2. Вміст сірки в паливі становив 0,084 %, що забезпечувало вимоги Annex VI MARPOL. подача палива DMA20 до дизелів здійснювалась паливним насосом 8 після додаткового очищення його очищення в паливному фільтрі 5.

Крім указаних варіантів, експлуатацію дизелів також можна було виконувати з використанням паливної суміші, до складу якої входило паливо RMG350 або DMA20 та паливо біологічного походження HVO, яке становлять

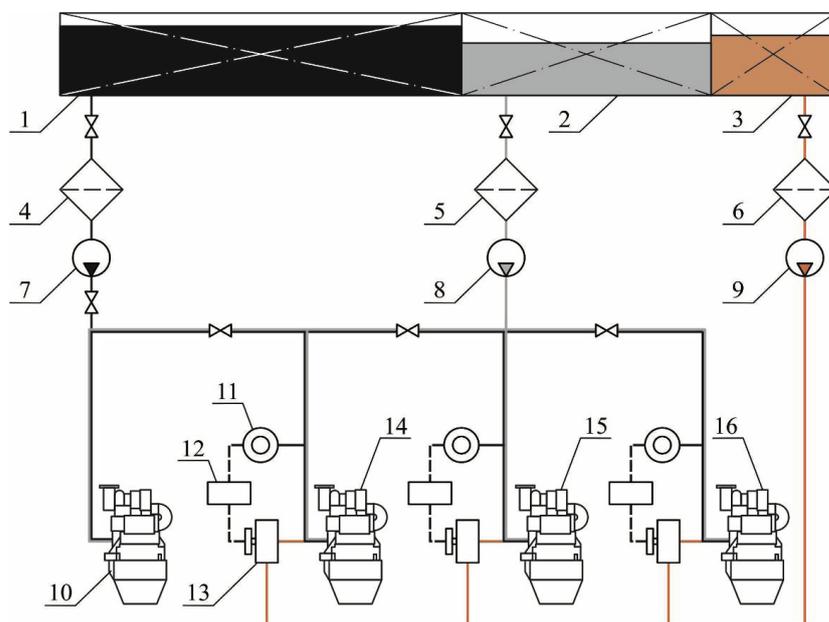


Рис. 1. Принципова паливна схема суднових дизелів Wartsila 6L32: 1 – паливо RMG350; 2 – паливо DMA20; 3 – паливо HVO; 4, 5, 6 – паливні фільтри для палив RMG350, DMA20, HVO відповідно; 7, 8, 9 – паливні насоси для палив RMG350, DMA20, HVO відповідно; 10, 14, 15, 16 – дизелі; 11 – витратомір; 12 – мікроконтролер; 13 – дозатор

гідровані рослинні мастила. При цьому паливні суміші, які становили палива RMG350 та HVO, використовувались під час знаходження судна поза районами SECAs. Паливні суміш з DMA20 та HVO – під час знаходження у SECAs. Подача палива HVO до дизелів здійснювалась паливним насосом 9 після додаткового очищення палива в паливному фільтрі 6. Вміст палива HVO у складі сумішей змінювався в діапазоні 10...30 % за масою. Паливна суміш, що складалась з палива RMG350 або DMA20 та палива біологічного походження HVO, утворювалась шляхом дозування палива HVO у загальний потік палива DM RMG350 або DMA20. Дозування палива біологічного походження HVO забезпечувалось дозатором 13, який встановлювався на магістралі його подачі до кожного з дизелів. Кількість палива біологічного походження HVO у суміші залежало від витрати палива RMG350 або DMA20, яке контролювалось витратоміром 11. Управління роботою дозатора 13 палива біологічного походження HVO забезпечувалось мікроконтролером 12. Використання суміші RMG350 або DMA20 та палива біологічного походження HVO було можливе для дизелів 14, 15, 16. При цьому:

у дизелі 14 використовувалась паливна суміш, яка складалась з 90 % палива нафтового походження RMG350 або DMA20 та 10 % палива біологічного походження HVO;

у дизелі 15 – паливна суміш з 80 % RMG350 або DMA20 та 20 % HVO;

у дизелі 16 – паливна суміш з 70 % RMG350 або DMA20 та 30 % HVO. Саме на цих дизелях виконувались експериментальні дослідження з визначення ефективності використання палива біологічного походження HVO. Дизель 10 експлуатувався виключно на паливі RMG350 або DMA20, без використання паливної суміші, до складу якої входило паливо біологічного походження HVO.

Як показник, за яким оцінювався вплив палива HVO на екологічність роботи морського судна, вибиралось відношення  $\left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)$ . Результати досліджень наведені у таблицях 2, 3 та подані на рис. 2.

Таблиця 2

Відношення  $\left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)$ , ppm/%v, під час різних умов експлуатації судових дизелів Wartsila 6L32 та знаходження судна поза SECAs

Навантаження, %	Вид палива			
	RMG350 (100 %)	RMG350 (90 %) + HVO (10 %)	RMG350 (80 %) + HVO (20 %)	RMG350 (70 %) + HVO (30 %)
50	17,83	17,04	16,12	14,38
60	18,24	17,28	16,43	14,56
70	18,82	17,56	16,84	14,72
80	19,67	17,93	17,16	15,03

Таблиця 3

Відношення  $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)$ , ppm/%v, під час різних умов експлуатації суднових дизелів Wartsila 6L32 та знаходження судна всередині SECAs

Навантаження, %	Вид палива			
	DMA20 (100 %)	DMA20 (90 %) + HVO (10 %)	DMA20 (80 %) + HVO (20 %)	DMA20 (70 %) + HVO (30 %)
50	3,48	3,17	2,95	2,72
60	3,72	3,38	3,12	2,88
70	3,93	3,56	3,28	3,02
80	4,08	3,67	3,32	2,97

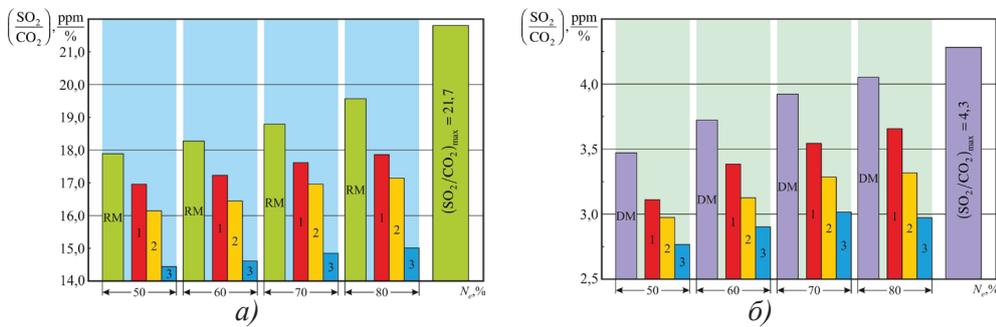


Рис. 2. Відношення  $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)$ , ppm/%v, під час різних умов експлуатації суднових

дизелів Wartsila 6L32:

*a* – під час використання палива RMG350 та його суміші з паливом HVO;

*б* – під час використання палива DMA20 та його суміші з паливом HVO;

RM – паливо RMG350; DM – паливо DMA20; 1, 2, 3 – суміш палива RMG350 (або DMA20) та 10 %, 20 %, 30 % палива HVO відповідно

Відносне зменшення емісії SO<sub>x</sub> під час використання палива біологічного походження, яке становлять гідровані рослинні мастила розраховується як

$$\Delta\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right) = \frac{\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{RMG}} - \left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{HVO}}}{\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{RMG}}} \cdot 100\%, \text{ або}$$

$$\Delta\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right) = \frac{\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{DMA}} - \left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{HVO}}}{\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{DMA}}} \cdot 100\%;$$

де  $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{RMG}}$ ,  $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{DMA}}$  – значення відношення  $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)$  під час використання палива RMG350 або DMA20;

$\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{HVO}}$  – значення відношення  $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)$  під час використання суміші палива

RMG350 або DMA20 та HVO [27].

За наведеним виразом з урахуванням значень таблиць 2, 3 отримані величини відносного зменшення емісії  $\text{SO}_x$  під час використання палива біологічного походження, які узагальнені у таблицях 4, 5.

Екологічна стійкість за емісією  $\text{SO}_x$  під час використання палива біологічного походження, яке становлять гідровані рослинні мастила, може бути оцінена за виразом:

$$\Delta\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)^+ = \frac{\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{VI}} - \left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{HVO}}}{\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{VI}}} \cdot 100\%;$$

в якому  $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{VI}}$  – значення відношення  $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)$  відповідно до вимог Annex VI

MARPOL (21,7 ppm/%v під час знаходження поза SECAs та 4,3 ppm/%v під час знаходження всередині SECAs) [28; 29].

Розрахункові значення, що отримані за наведеними виразами з урахуванням даних таблиць 4, 5, наведені у таблицях 6, 7.

Таблиця 4

**Відносне зменшення емісії  $\text{SO}_x$ , %, під час різних умов експлуатації суднових дизелів Wartsila 6L32 та знаходження судна поза SECAs**

Навантаження, %	Вид палива		
	RMG350 (90 %) + HVO (10 %)	RMG350 (80 %) + HVO (20 %)	RMG350 (70 %) + HVO (30 %)
50	4,43	9,59	19,35
60	5,26	9,92	20,18
70	6,70	10,52	21,79
80	8,85	12,76	23,59

Таблиця 5

**Відносне зменшення емісії  $\text{SO}_x$ , %, під час різних умов експлуатації суднових дизелів Wartsila 6L32 та знаходження судна всередині SECAs**

Навантаження, %	Вид палива		
	DMA20 (90 %) + HVO (10 %)	DMA20 (80 %) + HVO (20 %)	DMA20 (70 %) + HVO (30 %)
50	8,91	15,23	21,84
60	9,14	16,13	22,58
70	9,41	16,54	23,16
80	10,05	18,63	27,21

За даними таблиць 6, 7 побудовані діаграми, що наведені на рис. 3.

Таблиця 6

Екологічна стійкість  $\Delta \left( \frac{SO_2}{CO_2} \right)^+$  за емісією  $SO_x$ , %, під час різних умов експлуатації суднових дизелів Wartsila 6L32 та знаходження судна поза SECAs

Навантаження, %	Вид палива			
	RMG350 (100 %)	RMG350 (90 %) + HVO (10 %)	RMG350 (80 %) + HVO (20 %)	RMG350 (70 %) + HVO (30 %)
50	17,83	21,47	25,71	33,73
60	15,94	20,37	24,29	32,90
70	13,27	19,08	22,40	32,17
80	9,35	17,37	20,92	30,74

Таблиця 7

Екологічна стійкість  $\Delta \left( \frac{SO_2}{CO_2} \right)^+$  за емісією  $SO_x$ , %, під час різних умов експлуатації суднових дизелів Wartsila 6L32 та знаходження судна всередині SECAs

Навантаження, %	Вид палива			
	DMA20 (100 %)	DMA20 (90 %) + HVO (10 %)	DMA20 (80 %) + HVO (20 %)	DMA20 (70 %) + HVO (30 %)
50	19,07	26,28	31,40	36,74
60	13,49	21,40	27,44	33,02
70	8,60	17,21	23,72	29,77
80	5,12	14,65	22,79	30,93

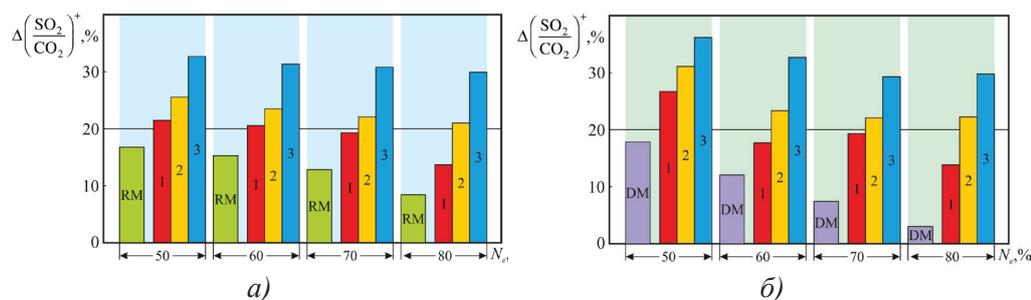


Рис. 3. Екологічна стійкість  $\Delta \left( \frac{SO_2}{CO_2} \right)^+$  за емісією  $SO_x$ , %, під час різних умов експлуатації суднових дизелів Wartsila 6L32:

- а – під час використання палива RMG350 та його суміші з паливом HVO;
- б – під час використання палива DMA20 та його суміші з паливом HVO;
- RM – паливо RMG350; DM – паливо DMA20; 1, 2, 3 – суміші палива RMG350 (або DMA20) та 10 %, 20 %, 30 % палива HVO відповідно

**Висновки.** Експериментальними дослідженнями, що виконувались на суднових дизелях Wartsila 6L32, підтвердили можливість управління емісією оксидів

сірки з випускними газами шляхом використання палива біологічного походження HVO.

Для паливних сумішей, які становили 70...90 % палива нафтового походження RMG350 або DMA20 та палива 30...10 % палива HVO в діапазоні експлуатаційних навантажень на дизелі 50...80 %, було встановлено зниження емісії оксидів сірки на 4,43...23,59 % під час знаходження судна поза SECAs та на 8,91...27,21 % під час знаходження судна всередині SECAs.

У разі використання лише палива нафтового походження RMG350 або DMA20 екологічна стійкість морських суден за емісією  $SO_x$  перебуває в межах 9,35...17,83 % та 5,12...19,07 % відповідно. Використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження HVO, яке становлять гідровані рослинні мастила, збільшує екологічну стійкість морських суден за емісією  $SO_x$ . Значення цього показника для різного складу паливної суміші та різного навантаження на дизелі досягає значень 17,37...33,73 % під час знаходження судна поза SECAs та використання палива RMG350, а також 14,65...36,74 % під час знаходження судна всередині SECAs та використання палива DMA20.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Sagin S., Kuropyatnyk O., Matieiko O., Razinkin R., Stoliaryk T., Volkov O. Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. 12. 1440. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.
2. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами судових дизелів. *Водний транспорт* : збірник наукових праць. 2024. Вип. 2(40). С. 173–185. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16>.
3. 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. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
4. Varbanets R., Fomin O., Píštěk V., Klymenko V., Minchev D., Khrulev A., Zalozh V., Kučera P. Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9. № 3. P. 321. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
5. Sagin S., Kuropyatnyk O. Determination of optimal operating modes of the selective catalytic reduction system for marine diesel exhaust gases. *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. № 5(3(85)). P. 12–22. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.340411>.
6. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 40. С. 49–54. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf340.2020.49-54>.
7. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економичності дизелів морських та річкових засобів транспорту. *Суднові*

- енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2023. Вип. 46. С. 118–131. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf46.2023.118-131>.
8. Sagin S., Kuropyatnyk O., Rusnak D. Improvement of the process of cleaning exhaust gases of marine diesels from sulfur oxides. *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. № 4 (1 (84)). P. 72–79. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.337616>.
  9. Petrychenko O., Levynskyi 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: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-2>.
  10. Kuropyatnyk O.A. Reduction of NO<sub>x</sub> emission in the exhaust gases of low-speed marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, Vienna, 2018. № 7–8. P. 37–42. DOI: <https://doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-37-42>.
  11. 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. P. 14–17. DOI: <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
  12. Сагін С.В., Суворов П.С., Бондар С.А. Розробка методу оцінки ризиків виникнення аварійних подій під час експлуатації дизелів морських суден. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2023. Вип. 47. С. 122–130. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf47.2023.122-130>.
  13. Zablotskyi Yu.V., Sagin A.S. Applying of fuel additives in marine diesel engines. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2021. Вип. 43. С. 5–17. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf343.2021.5-17>.
  14. Varbanets R., Shumylo O., Marchenko A., Minchev D., Kyrnats V., Zalozh V., Aleksandrovska N., Brusnyk R., Volovyk K. Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. *Polish maritime research*. 2022. № 29 (4). P. 88–96. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
  15. Сагін С.В., Побережний Р.В. Аналіз основних способів зниження емісії оксидів азоту дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2022. Вип. 44. С. 132–141. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf44.2022.132-141>.
  16. Заблоцький Ю.В. Підвищення економічності роботи суднових дизелів. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 40. С. 12–16. <https://doi.org/10.31653/smf340.2020.12-16>.
  17. Заблоцький Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок. *Вісник Одеського національного морського університету* : збірник наукових праць. 2020. № 2 (62). С. 106–119. DOI: <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2020-1-106-119>.
  18. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний

- збірник. 2020. Вип. 41. С. 10–14. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf341.2020.10-14>.
19. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 41. С. 5–9. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf340.2020.5-9>.
  20. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін А.С. Робота судового дизеля на біодизельному паливі. *Автоматизація судових технічних засобів* : науково-технічний збірник. 2021. Вип. 27. С. 93–107. DOI: <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107>.
  21. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines. *Technology Audit and Production Reserves*. 2023. № 5 (1(73)). P. 37–43. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.
  22. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін С.С., Чимшир В.І., Разінкін Р.О. Аналіз екологічної стійкості та енергетичної ефективності використання скрубного очищення випускних газів дизелів суден морського транспорту. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2023. Вип. 47. С. 157–171. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf47.2023.157-171>.
  23. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка судових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками. *Автоматизація судових технічних засобів* : науково-технічний збірник. 2021. Вип. 27. С. 108–119.
  24. Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури судових дизелів. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2022. Вип. 44. С. 121–131. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf44.2022.121-131>.
  25. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 41. С. 20–25. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf341.2020.20-25>.
  26. Сагін С.В., Бондар С.А. Метод попередження аварійних ситуацій під час експлуатації судових дизелів за аналізом потоку відмов його основних вузлів. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2023. Вип. 46. С. 101–109. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf46.2023.101-109>.
  27. 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. DOI: <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
  28. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів експлуатації судових двигунів внутрішнього згорання під час використання біодизельного палива. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2024. Вип. 48. С. 100–113. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf48.2024.100-113>.

29. Sagin S., Chymshyr V., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Madey V., Rusnak D. Using Ultrasonic Fuel Treatment Technology to Reduce Sulfur Oxide Emissions from Marine Diesel Exhaust Gases. *Energies*. 2025. Vol. 18 (17). P. 4756. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18174756>.

## REFERENCES

1. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Matieiko, O., Razinkin, R., Stoliaryk, T., Volkov, O. (2024). Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel. *Journal of Marine Science and Engineering*. 12. 1440. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.
2. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2024). Vznachennya optimalnih rezhimiv procesiv upravlinnya vipusknimi gazami sudnovih duzeliv. *Water transport*. 2 (40). 173–185. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16>.
3. Petrychenko, O., Levinskyi, M., Goolak, S., Lukoševičius, V. (2025). Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport. *Sustainability*. 17. 2141. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
4. Varbanets, R., Fomin, O., Pištek, V., Klymenko, V., Minchev, D., Khrulev, A., Zalozh, V., Kučera, P. (2021). Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters. *Journal of Marine Science and Engineering*. 9 (3). 321. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
5. Sagin, S., Kuropyatnyk, O. (2025). Determination of optimal operating modes of the selective catalytic reduction system for marine diesel exhaust gases. *Technology Audit and Production Reserves*. 5 (3 (85)). 12–22. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.340411>.
6. Rusnak, D.Y., Sagin, S.V. (2020). Zabezpechennya ekologichnich vumog pri ultrazvukovii desulphurizacii vuglevodnich paliv. *Ship power plants*. 40. 49–54. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf340.2020.49-54>.
7. Sagin, S.V., Sagin, A.S. (2023). Control ta diagnostuvannya nadiinosti ta ekonomichnosti dizeliv morskih ta richkovih zasobiv transportu. *Ship power plants*. 46. 118–131. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf46.2023.118-131>.
8. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Rusnak, D. (2025). Improvement of the process of cleaning exhaust gases of marine diesels from sulfur oxides. *Technology Audit and Production Reserves*. 4 (1 (84)). 72–79. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.337616>.
9. Petrychenko, O., Levinskyi, M. (2024). Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport. *Transport Systems and Technologies*. 43. 21–36. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-2>.
10. Kuropyatnyk, O.A. (2018). Reduction of NO<sub>x</sub> emission in the exhaust gases of low-speed marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 7–8. 37–42.
11. Sagin, A.S., Zablotskyi, Yu.V. (2021). Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels. *Austrian Journal*

- of Technical and Natural Sciences*. 7–8. 14–17. DOI: <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
12. Sagin, S.V., Suvorov, P.S., Bondar, S.A. (2023). Rozrobka metodu ocinki rizikiv vineknennya avariynih podii pid chas eksplyataciyi dizeliv morskih suden. *Ship power plants*. 47. 122–130. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf47.2023.122-130>.
  13. Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. (2021). Applying of fuel additives in marine diesel engines. *Ship power plants*. 43. 5–17. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf343.2021.5-17>.
  14. Varbanets, R., Shumylo, O., Marchenko, A., Minchev, D., Kyrnats, V., Zalozh, V., Aleksandrovska, N., Brusnyk, R., Volovyk, K. (2022). Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. *Polish maritime research*. 29 (4). 88–96. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
  15. Sagin, S.V., Poberezhniy, R.V. (2022). Analiz osnovnich sposobiv znizhennya emisii oksidiv azotu dizeliv suden morskogo ta vnutrishnego vodnogo transportu. *Ship power plants*. 44. 132–141. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf44.2022.132-141>.
  16. Zablotskyi, Yu.V. (2020). Pidvishennya ekonomichnosti roboti sudnovih dizeliv. *Ship power plants*. 40. 12–16. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf340.2020.12-16>.
  17. Zablotskyi, Yu.V. (2020). Pidvishennya palivnoi ekonomichnosti sudnovih dizelnih ustanovok. *Visnik Odeskogo nacionalnogo morskogo universytetu*. 2. 106–119. DOI: <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2020-1-106-119>.
  18. Marchenko, O.O., Sagin, S.V. (2020). Vdoskonalennya procesu ochishennya sudnovih vazhkih paliv. *Ship power plants*. 41. 10–14. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf341.2020.10-14>.
  19. Poberezhniy, R.V., Sagin, S.V. (2020). Zabezpechennya ekologichnykh pokaznikiv dizeliv suden richkovogo ta morskogo transportu. *Ship power plants*. 41. 5–9. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf340.2020.5-9>.
  20. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, A.S. (2021). Robota sudnovogo dizelya na biodizelnomu palivi. *Automation of ship technical facilities*. 27. 93–107. DOI: <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107>.
  21. Sagin, S., Sagin, A. (2023). Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines. *Technology Audit and Production Reserves*, 5 (1 (73)). 37–43. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.
  22. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, S.S., Chimshir, V.I., Razinkin, R.O. (2023). Analiz ekologichnoi stiicosti ta energetichnoi effektivnosti vicoristannya scrubernogo ochishennya vipusknich gaziv dizeliv sudden morskogo transportu. *Ship power plants*. 47. 157–171. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf47.2023.157-171>.
  23. Sagin, S.V., Stolyaryk, T.O. (2021). Dinamika sudnovih dizeliv pid chas vikoristannya motornich mastil z rizmimi structurnimi karakteristikami. *Automation of ship technical facilities*. 27. 108–119. DOI: <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119>.

24. Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. (2022). Vznachennya dunamichnih navantazhen pid chas zmini rezhimiv mashchennya preciziinich par palivnoi aparaturi sudnovih diziliv. *Ship power plants*. 44. 121–131. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf44.2022.121-131>.
25. Zverkov, D.O., Sagin, S.V. (2020). Znizhennya mechanichnich vtrat u sudnovich dizelyach. *Ship power plants*. 41. 20–25. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf341.2020.20-25>.
26. Sagin, S.V., Bondar, S.A. (2023). Metod poperedzhennya avariinich situacii pid chas ekspluatacii sudnovih dizeliv za analizom potocu vidmov iogo osnovnih vuzliv. *Ship power plants*. 46. 101–109. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf46.2023.101-109>.
27. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2021). Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 7–8. 36–43. DOI: <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
28. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2024). Vznachennya optimalnih rezhimiv ekspluatacii sudnovih dviguniv vnutrashnogo zgoryannya pid chas vikoristannya biodizelnogo paliva. *Ship power plants*. 48. 100–113. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf48.2024.100-113>.
29. Sagin, S., Chymshyr, V., Karianskyi, S., Kuropyatnyk, O., Madey, V., Rusnak, D. (2025). Using Ultrasonic Fuel Treatment Technology to Reduce Sulfur Oxide Emissions from Marine Diesel Exhaust Gases. *Energies*. 18 (17). 4756. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18174756>.

Дата першого надходження статті до видання: 23.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.11.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.12.2025