

ВИЗНАЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ СКРУБЕРНОГО ОЧИЩЕННЯ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ВІД ДОМІШОК СІРКИ

Наведені результати досліджень щодо визначення експлуатаційних характеристики гібридних систем скрубєрного очищення випускних газів суднових дизелів від домішок сірки. Зазначено, що згоряння палива в циліндрі суднового дизеля супроводжується не тільки виділенням теплоти та її трансформацією в крутний момент, але й також утворенням і викидом в атмосферу випускних газів. Однією зі найбільш шкідливих складових випускних газів суднових дизелів є оксиди сірки, які утворюються під час згоряння палива через наявність у ньому сірки (у чистому вигляді, або у сполученнях з іншими елементами та речовинами). Відповідно до Annex VI MARPOL вміст сірки в морському паливі не повинен перевищувати 0,1 % під час експлуатації суден у спеціальних екологічних районах – Sulphur Emission Control Areas (SECAs) та бути не більшим за 0,5 % під час експлуатації суден поза цих районів. У випадку, коли випускні гази суднових дизелів додатково очищуються у спеціальних пристроях (найбільш поширеними з яких є скрубєри), дозволяється використання палива з вмістом сірки до 3,5 %. Дослідження виконувались на судні класу Bulk Carrier дедвейтом 81780 тонн. До складу суднової енергетичної установки судна входили головний двигун STX-MAN B&W 6S60ME-C та три допоміжні двигуна Yanmar 6EY18ALW2. Випускні гази всіх дизелів (головного та допоміжних) спрямовувались до загального скрубєра, у якому відбувалось очищення газів від домішок сірки. Експлуатація скрубєрної системи виконувалась за відкритим, або за гібридним способом. У першому випадку очищення випускних газів здійснювалось лише з використанням морської води. У другому – до морської води додавався розчин каустичної соди NaOH. Встановлено, що використання гібридного контуру підвищує ефективність роботи скрубєрної системи очищення випускних газів. Це відображається в покращенні екологічних показників роботи суднових дизелів – зниженні емісії діоксиду вуглецю CO₂, діоксиду сірки SO₂, а також їх відношення SO₂/CO₂. Саме відношення SO₂/CO₂ є показником, яке регламентується вимогами Додатку VI MARPOL у разі використання систем очищення випускних газів від оксидів сірки. Крім того, саме це відношення контролюється під час перевірки екологічності роботи суднової енергетичної установки. Найбільш ефективну дію гібридний контур створює на сірковмісні компоненти палива. Це відображається в суттєвому зниженні викидів оксидів сірки, яке під час експлуатації судна всередині SECAs досягає 15,41...20,01 %; під час експлуатації судна поза SECAs досягає 8,72...13,12 %.

Ключові слова: випускні гази, емісія оксидів сірки, екологічні показники, емісія оксиду вуглецю, емісія оксидів сірки, морське паливо, морський транспорт, скрубєр, система очищення випускних газів, судновий дизель

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Перевезення, що забезпечуються морськими суднами, займають домінуючу позицію серед перевезень іншими типами транспортних засобів – автомобільним, залізничним та авіаційним [1-3].

На теперішній час дизелі встановлюються на всіх без винятку морських суднах та виконують функції головних або допоміжних двигунів [4-6]. У першому випадку вони передають свою потужність рушю (гвинту фіксованого кроку або гвинту, крок якого регулюється) та в такий спосіб забезпечують рух судна. У другому – їх механічна енергія перетворюється в електричну та через це забезпечується живлення та подальше функціонування суднових допоміжних механізмів, палубного та навігаційного

обладнання, а також освітлення судна [7-9]. У першому випадку дизелі характеризують як головні двигуни, у другому – як допоміжні двигуни [10-12]. Лише дуже невелика частина морських суден як джерело механічної енергії використовує газові або парові турбіни. На ще меншій частині суден ці теплові двигуни виконують функції головних двигунів [13-15].

Основним джерелом енергії всіх теплових двигунів, що використовуються в судових енергетичних установках (дизелях, котлах, газових турбінах) є рідке паливо нафтового походження [16-18]. Варіанти використання газового палива в судових дизелях на теперішній час мають лише поодинокий характер, при цьому майже відсутні варіанти використання газового палива в котлах та газових турбінах [19-21].

Згоряння палива в циліндрі судового дизеля супроводжується не тільки виділенням теплоти та її трансформацією в крутний момент, але й також утворенням і викидом в атмосферу випускних газів [22, 23]. Випускні гази є багатокомпонентною газовою сумішшю, до складу якої входять токсичні компоненти (передусім оксиди азоту NO_x , оксиди сірки SO_x , монооксид вуглецю CO) [24, 25]. Таким чином, основним негативним фактором, що пов'язаний з використанням палива нафтового походження, є його шкідливий вплив на довкілля. Перш за все це пов'язано з емісією оксидів вуглецю CO та CO_2 , оксидів сірки SO_x , а також оксидів азоту NO_x [26, 27]. У зв'язку з цим саме ці екологічні показники роботи судових дизелів регламентуються та контролюються з боку міжнародних організацій та класифікаційних товариств [28-30].

Основним міжнародним документом, що обмежує емісію оксидів азоту NO_x та оксидів сірки SO_x з випускними газами, є International Convention for the Prevention of Pollution from Ships – MARPOL 73/78. Відповідно до Annex VI MARPOL концентрація оксидів азоту у випускних газах не повинна перевищувати значень, що визначаються залежно від року побудови судна та частоти обертання дизеля. Також відповідно до Annex VI MARPOL вміст сірки в морському паливі не повинен перевищувати 0,1 % під час експлуатації суден у спеціальних екологічних районах – Sulphur Emission Control Areas (SECAs) та бути не більшим за 0,5 % під час експлуатації суден поза SECAs. У випадку, коли випускні гази судових дизелів додатково очищуються у спеціальних пристроях (найбільш поширеними з яких є скрубери), дозволяється використання палива з вмістом сірки до 3,5 %. При цьому повинне бути підтверджена еквівалентність коефіцієнту викидів SO_2/CO_2 вмісту сірки в судовому паливі (табл. 1). При цьому у відношенні SO_2/CO_2 емісія діоксиду сірки SO_2 визначається у частках на мільйон – ppm, емісія діоксиду вуглецю CO_2 – визначається у об'ємних відсотках – %v [31-33].

Таблиця 1 – Відповідність вмісту сірки в паливі максимальним значенням коефіцієнту викидів

Вміст сірки в паливі, S, %	Коефіцієнт викидів, SO_2/CO_2 , ppm/%v
0,50	21,7
0,10	4,3

Забезпечення вимог Annex VI MARPOL щодо емісії оксидів сірки з випускними газами судових дизелів, є актуальним завданням, розв'язанню якого присвячено багато наукових та технологічних досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Забезпечення вимог Annex VI MARPOL щодо емісії оксидів сірки може бути досягнуте двома шляхами:

перший – використанням палива зі вмістом сірки, що не перебільшує 0,5 % за масою у випадку експлуатації морського судна поза SECAs та складає менш за 0,1 % за масою під час знаходження судна всередині SECAs

другий – використання додаткового очищення випускних газів у спеціальних системах очищення з забезпеченням необхідного значення відношення SO_2/CO_2 .

До першого також відноситься десульфурізація палива – процес, що спрямований на видаленні з палива певної кількості компонентів, що містять сірку. Десульфурізації палива сприяють методи тонкої фільтрації, гідродинамічного очищення, а також кавітаційної та ультразвукової обробки [34-36].

Недоліком тонкої фільтрації, як способу прямого видалення сірки з палива, є менший розмір компонентів, що містять сірку, порівняно з іншими домішками (насамперед з усіма металевими складовими, а також з органічними сполуками). При цьому через свої великі розміри «не сірчисті» домішки поступово накопичуються в осередках фільтра. У зв'язку з цим використання тонкої фільтрації (як способу десульфуризації палива) сприяє підвищенню гідравлічного опору в паливній системі. Це призводить до необхідності збільшення тиску в паливній магістралі, а також скорочує час між очищенням елементів фільтра від забруднень. Наслідком цього є підвищення енергетичних втрат на процес підготовки палива та збільшення його тривалості [37-39].

У разі використання гідроочищення виконується попереднє додавання до палива дистильованої води. Отримана в такий спосіб суміш палива та води спочатку піддається гідродинамічній обробці, після чого або обстоюється або сепарується. І в першому, і в другому випадку частина сірки, пов'язана з водою, осаджується і зливається. До негативних характеристик даного методу відноситься необхідність збору та подальшої утилізації осаду сірковмісної суміші палива та води. Крім того, як і у разі використання будь-яких сепараційних установок, суттєво підвищується енергоспоживання даних блоків системи очищення [40-42].

Під час тонкої фільтрації та гідродинамічного очищення забезпечується максимальне видалення сірки з палива. Але при цьому (через те, що сірка під час згоряння виділяє теплоту) знижується теплотворна здатність палива. Це призводить до підвищення питомої витрати палива, змушує збільшувати його циклову подачу та тривалість впорскування. Наслідком цього стає підвищення теплової напруженості дизеля. Як спосіб попередження цих негативних явищ використовується кавітаційна обробка палива, за допомогою якої руйнуються міжмолекулярні зв'язки між сіркою S та вуглецем C, а також сіркою S та воднем H. Це сприяє активації вказаних структурних складових палива та призводить до покращення процесу згоряння [43, 44].

Під час кавітаційної обробки за допомогою ультразвуку паливо піддається високим змінним тискам. У разі використання ультразвукової обробки на паливо діють звукові хвилі спеціально визначеної частоти та амплітуди [45, 46].

Найбільш розповсюдженим варіантом спеціальних система очищення випускних газів від компонентів, що містять сірку, є скрубєрні системи. В цих систем випускні газі додатково спрямовуються у скрубєр, в якому в зустрічному напрямку до потоку випускних газів подається морська (забортна) вода до складу якої можуть входити спеціальні реагенти [48-50]. Таки системи можуть експлуатуватися за «відкритим», «закритим» та «гібридним» принципом. У відкритому морська вода після її використання у скрубєрі та, відповідно, очищення випускних газів від оксидів сірки видаляється за борт. У закритому морська вода після використання у скрубєрі залишається у спеціальному танку [51-53]. У гібридному – морська вода спрямовується до очисного танку та після додаткового очищення видаляється за борт. Саме у гібридних системах до морської води додаються спеціальні реагенти (у більшості випадків каустична сода NaOH), це підвищує рівень очищення випускних газів від оксидів сірки, але змушує виконувати додаткове очищення води, яка виходить зі скрубєра. При цьому гібридні системи можуть експлуатуватися також і за відкритим принципом [54-55]. Можливий варіант комплектації гібридної системи скрубєрного очищення випускних газів судових дизелів від оксидів сірки надана на рис. 1. Основні компоненти, що входять до складу системи, позначені на рис. 1, їх функціональне призначення зрозуміло, тому не потребує додаткового пояснення.

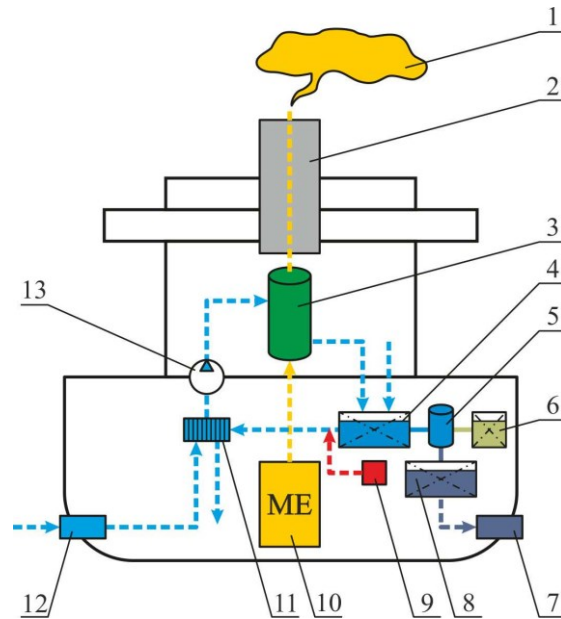


Рисунок 1 – Принципова схема гібридної системи скрубберного очищення випускних газів суднових дизелів від оксидів сірки:

- 1 – випускні гази; 2 – глушник; 3 – скруббер; 4 – технологічний танк; 5 – очищувач скрубберної води; 6 – танк збору осаду (шламовий танк); 7 – зливна труба;
 8 – накопичувальний танк; 9 – танк з лужним розчином (каустичної соди NaOH);
 10 – головний двигун ME (Main Engine); 11 – теплообмінний апарат; 12 – бортовий кінгстон; теплообмінний апарат; 13 – циркуляційний насос заборотної води

Формулювання цілей статті. Ціллю статті є визначення експлуатаційних характеристики гібридних систем скрубберного очищення випускних газів суднових дизелів від домішок сірки.

Виклад основного матеріалу. Дослідження виконувались на судні класу Bulk Carrier дедвейтом 81780 тонн. До складу суднової енергетичної установки судна входили головний двигун STX-MAN B&W 6S60ME-C з ефективною потужністю 9950 кВт та три допоміжні дизель-генератори Yanmar 6EY18ALW2 з потужністю 800 кВт кожний. Випускні гази всіх дизелів (головного та допоміжних) спрямовувались до загального скрубера SO_x – Exhaust Gas Cleaning System. Скруберне очищення випускних газів дозволяло використовувати під час експлуатації дизелів палива з вмістом сірки до 3,5 %.

Exhaust Gas Cleaning System забезпечувала очищення випускних газів від домішок сірки на різних експлуатаційних режимах роботи суднової енергетичної установки. При цьому за мінімальний приймався режим, що відповідав 25% навантаженню на один з допоміжних дизель-генераторів Yanmar 6EY18ALW2. Як максимальний – режим, на якому головний двигун STX-MAN B&W 6S60ME-C експлуатувався з навантаженням 85 %, три одночасно працюючих дизель-генератори Yanmar 6EY18ALW2 з навантаженням 75 %.

Під час експлуатації суднової енергетичної установки та, відповідно, проведення досліджень, суднові дизелі використовували паливо, основні характеристики якого надані в табл. 2. Під час проведення досліджень суднова енергетична установка експлуатувалась на різних режимах, які наведені в табл. 3.

Таблиця 2 – Основні характеристики палив під час проведення досліджень

Характеристика	RMG450	DMA10
Густина за 15°C, кг/м ³	972,6	832,3
В'язкість за 50,0°C, мм ² /с	234,5	6,12
Вміст сірки, %	3,28	0,093
Температура спалаху, °C	126	83
Теплотворна здатність, кДж/кг	40862	43438

Таблиця 3 – Експлуатаційні режими суднової енергетичної установки

Режим	Варіант роботи суднової енергетичної установки
1	60% навантаження головного двигуна STX-MAN B&W 6S60ME-C + 65% навантаження допоміжного двигуна Yanmar 6EY18ALW2
2	75% навантаження головного двигуна STX-MAN B&W 6S60ME-C + 70% навантаження допоміжного двигуна Yanmar 6EY18ALW2
3	70% навантаження головного двигуна STX-MAN B&W 6S60ME-C + 55% навантаження двох допоміжних двигунів Yanmar 6EY18ALW2
4	75% навантаження головного двигуна STX-MAN B&W 6S60ME-C + 65% навантаження двох допоміжних двигунів Yanmar 6EY18ALW2

На всіх експлуатаційних режимах суднові дизелі (як головний STX-MAN B&W 6S60ME-C, також допоміжні Yanmar 6EY18ALW2) використовували на паливо RMG450 (характеристики якого надані у табл. 2). У деяких морських портах та територіальних водах країн, національні вимоги яких не дозволяли використовувати скрубберне очищення випускних газів від оксидів сірки, експлуатація дизелів виконувалась на паливі DMA (з характеристиками, що відповідають наданим у табл. 2).

Експлуатація Exhaust Gas Cleaning System виконувалось за відкритим, або за гібридним способом. У першому випадку очищення випускних газів здійснювалось лише з використанням морської води, яка після використання у скруббері видалялась за борт. У другому – до морської води додавався розчин каустичної соди NaOH. Це змушувало виконувати очищення води після її використання у скруббері, після чого здійснювалось її видалення за борт.

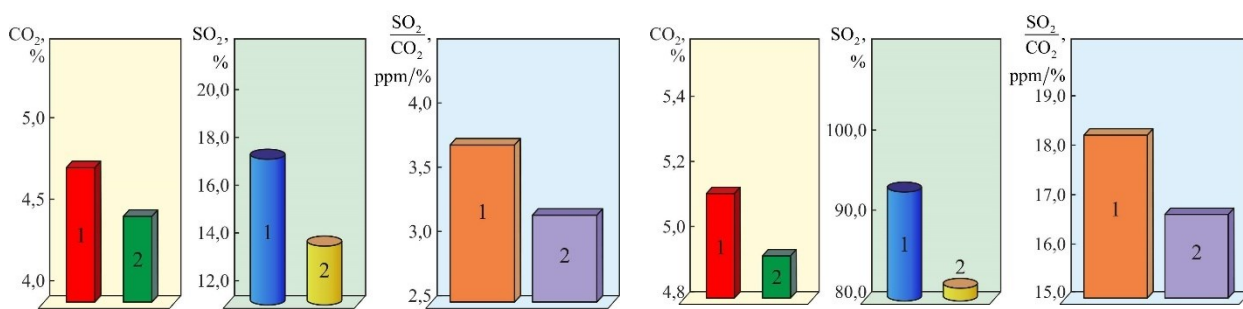
Результати досліджень наведені у табл. 4.

Таблиця 4 – Визначення показників скрубберної системи очищення випускних газів

Експлуатаційний режим*	Скрубберне очищення випускних газів			Скрубберне очищення випускних газів з додатковим додаванням NaOH		
	CO ₂ , %	SO ₂ , ppm	SO ₂ /CO ₂ , ppm/%	CO ₂ , %	SO ₂ , ppm	SO ₂ /CO ₂ , ppm/%
Під час знаходження всередині SECAs						
1	4,7	17,3	3,68	4,4	13,7	3,11
2	4,8	18,7	3,90	4,5	14,2	3,16
3	5,0	19,3	3,86	4,6	15,4	3,35
4	5,3	21,6	4,08	5	16,3	3,26
Під час знаходження поза SECAs						
1	5,1	92,7	18,18	4,9	81,3	16,59
2	5,3	103,4	19,51	5,0	86,2	17,24
3	5,3	105,2	19,85	5,1	88,8	17,41
4	5,5	108,6	19,75	5,2	89,2	17,15

Примітка: режими 1, 2, 3, 4 відповідають наведеним в табл. 3

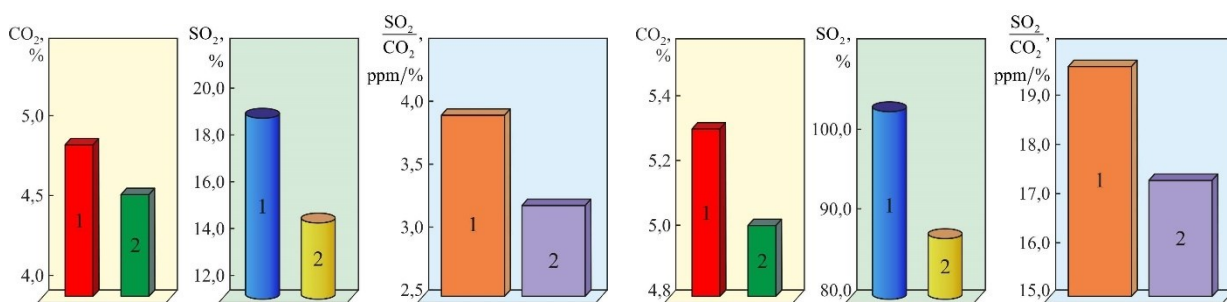
Для кращої візуалізації результати, що наведені в табл. 4, подані у вигляді рис. 2–5.



експлуатація всередині SECAs

експлуатація поза SECAs

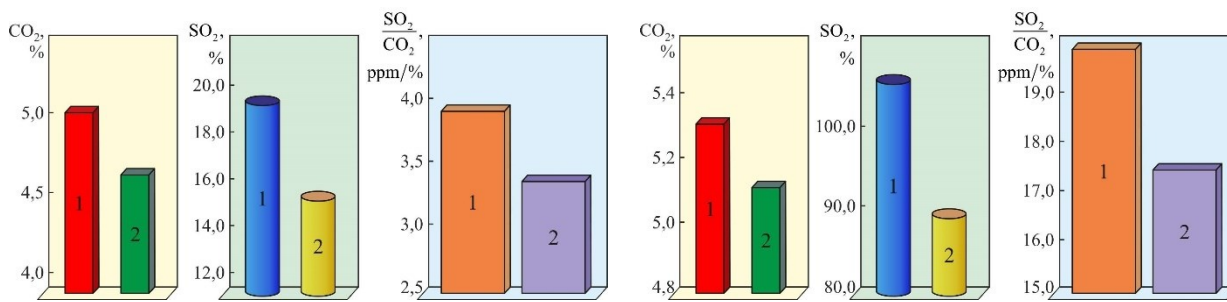
Рисунок 2 – Показники роботи скрубберної систем очищення випускних газів (режим 1): 1 – відкритий спосіб; 2 – гібридний спосіб



експлуатація всередині SECAs

експлуатація поза SECAs

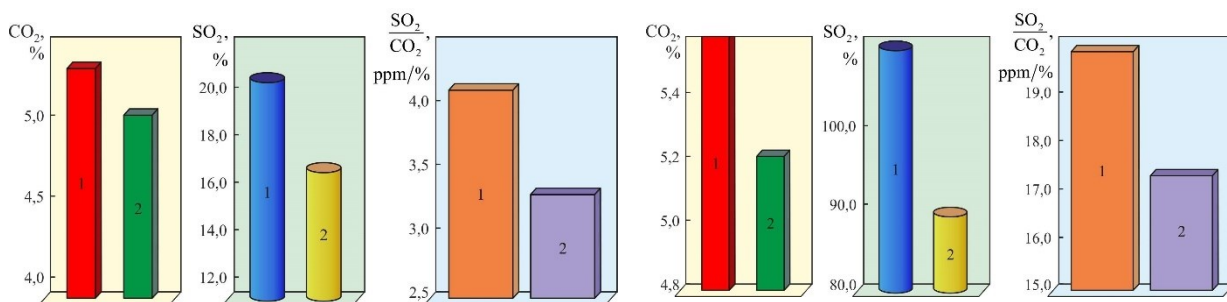
Рисунок 3 – Показники роботи скрубберної систем очищення випускних газів (режим 2): 1 – відкритий спосіб; 2 – гібридний спосіб



експлуатація всередині SECAs

експлуатація поза SECAs

Рисунок 4 – Показники роботи скрубберної систем очищення випускних газів (режим 3): 1 – відкритий спосіб; 2 – гібридний спосіб



експлуатація всередині SECAs

експлуатація поза SECAs

Рисунок 5 – Показники роботи скрубберної систем очищення випускних газів (режим 4): 1 – відкритий спосіб; 2 – гібридний спосіб

Відносне зменшення емісії шкідливих речовин – діоксиду вуглецю ΔCO_2 , діоксиду сірки ΔSO_2 , а також їх відношення $\Delta(\text{SO}_2/\text{CO}_2)$, розраховувалось за виразами:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\text{CO}_2 &= \frac{\text{CO}_2^{\text{Scr}} - \text{CO}_2^{\text{NaOH}}}{\text{CO}_2^{\text{Scr}}} \cdot 100\%, \\ \Delta\text{SO}_2 &= \frac{\text{SO}_2^{\text{Scr}} - \text{SO}_2^{\text{NaOH}}}{\text{SO}_2^{\text{Scr}}} \cdot 100\%, \\ \Delta\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right) &= \frac{\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)^{\text{Scr}} - \left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)^{\text{NaOH}}}{\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)^{\text{Scr}}} \cdot 100\%, \end{aligned} \right\} (1)$$

де CO_2^{Scr} , SO_2^{Scr} , $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)^{\text{Scr}}$ – емісія діоксиду вуглецю, діоксиду сірки, а також їх відношення для відповідного режиму роботи системи очищення випускних газів за відкритим контуром;

$\text{CO}_2^{\text{NaOH}}$, $\text{SO}_2^{\text{NaOH}}$, $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)^{\text{NaOH}}$ – значення цих же показників під час використання замкнутого контуру.

З урахуванням чисельних значень, що наведені в табл. 4, за виразами (1) отримані значення, які подані в табл. 5.

Таблиця 5 – Відносне зменшення емісії шкідливих речовин під час використання гібридної системи очищення випускних газів від оксидів сірки

Експлуатаційний режим*	Під час знаходження всередині SECAs			Під час знаходження поза SECAs		
	ΔCO_2 , %	ΔSO_2 , %	$\Delta(\text{SO}_2/\text{CO}_2)$, %	ΔCO_2 , %	ΔSO_2 , %	$\Delta(\text{SO}_2/\text{CO}_2)$, %
1	6,38	20,81	15,41	3,92	12,30	8,72
2	6,25	24,06	19,00	5,66	16,63	11,63
3	8,00	20,21	13,27	3,77	15,58	12,28
4	5,66	24,54	20,01	5,45	17,86	13,12

Примітка: режими 1, 2, 3, 4 відповідають наведеним в табл. 3

Висновки. Наведені результати досліджень дозволяють зробити наступні висновки.

1. Проведені дослідження підтверджують доцільність використання гібридного контуру скрубєрної системи як методу, що сприяє вдосконаленню процесу очищення випускних газів суднових дизелів від оксидів сірки.

2. Використання гібридного контуру підвищує ефективність роботи скрубєрної системи очищення випускних газів. Це (в порівнянні з очищенням за відкритим контуром) відображається у покращенні екологічних показників роботи суднових дизелів – зниженні емісії діоксиду вуглецю CO_2 , діоксиду сірки SO_2 , а також відношення SO_2/CO_2 . Саме відношення SO_2/CO_2 є показником, яке регламентується вимогами Додатку VI MARPOL у разі використання систем очищення випускних газів від оксидів сірки. Найбільш ефективну дію гібридний контур створює на сірковмісні компоненти палива. Це відображається в суттєвому зниженні викидів оксидів сірки, яке під час експлуатації судна всередині SECAs досягає 20,81...24,54 %; під час експлуатації судна поза SECAs досягає 12,30...17,86 %.

4. Додатково підкреслимо більшу ефективність використання гібридного контуру під час знаходження суден всередині SECAs, тобто в прибережних акваторіях. Саме ці морські райони піддають під найбільший негативний впливу з боку засобів транспорту та саме в них діють найбільш суворі екологічні вимоги та норми.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
2. Petrychenko O., Levynskiy M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // Transport systems and technologies. – 2024. – № 43. – С. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.
3. Левченко О.В., Маранов О.В. Інтеграція комбінованих систем підтримки ухвалення рішень для забезпечення навігаційної безпеки та оптимізації руху суден у портових акваторіях // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 99-108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
4. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи суднових середньооборотних дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
5. Сагін С.В., Сагін С.С. Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – С. 187-197. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
6. Gorb S., Popovskii A., Budurov M. Adjustment of speed governor for marine diesel generator engine // International Journal of GEOMATE. – 2023. – Vol. 25. – N 109. – Pp. 125-132. DOI: https://doi.org/10.21660/2023.109.m2312.
7. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 10-14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
8. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2014. – Вып. 20. – С. 74-83.
9. Petrychenko O., Levynskiy M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. – 2023. – № 41. – P. 96-106. https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8.
10. Сагін С.В., Куропятник О.А. Аналіз впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21.
11. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУОМА. – С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
12. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.
13. Petrychenko O., Levynskiy M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // Sustainability. – 2025. – № 17. – P. 2141. https://doi.org/10.3390/su17052141.
14. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів експлуатації суднових двигунів внутрішнього згорання під час використання біодизельного палива // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2024. – Вип. 48. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 100-113. doi: 10.31653/smf48.2024.100-113.
15. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pīst'ek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745.
16. Сагин С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ«ОМА». – С. 79-89.
17. 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(8). – P. 1440. https://doi.org/10.3390/jmse12081440
18. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.

19. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – № 13. – P. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse1303058924>.
20. 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.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
21. 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. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
22. Сагін С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // *Universum: Технические науки*. – 2018. – Вып. 3(48). – С. 67-71.
23. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка судових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками // *Автоматизація судових технічних засобів : наук.-техн. зб.* – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
24. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
25. Сагін С.В., Сагін С.С. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
26. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Діагностування технічного стану судових енергетичних установок засобів водного транспорту // *Водний транспорт*. – 2023. – № 2(38). – С. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
27. Левінський М.В., Левінський В.М. Вибір параметрів системи стабілізації курсу судна при дії воднохвильових збурень // *Автоматизація судових технічних засобів : наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
28. Даки О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунів В.М. Особливості та вимоги щодо навігаційного забезпечення безпеки судноводіння на внутрішніх судноплавних шляхах // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
29. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 40. – Одеса : НУ«ОМА». – С. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
30. Тимочко О.І., Левченко О.В., Руденко В.М., Сітков О.М. Використання гібридних роботизованих комплексів для інспекції морських нафтогазових об'єктів // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
31. Сагін С. В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий // *Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту*. – 2018. – Вип. 4(57). – С. 109-120.
32. Левченко О.В. Синтез варіантів дій судноводія у небезпечних ситуаціях з урахуванням часових та ресурсних обмежень у судових СППР // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.
33. Сагін С.В., Мацкевич Д.В. Оптические характеристики граничных смазочных слоев масел, применяемых в циркуляционных системах судовых дизелей // *Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб.* – 2011. – № 26. – С.116-125.
34. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // *Проблемы техники: наук.-виробн. журнал*. – 2012. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 84-103.
35. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // *Проблемы техники : наук.-виробн. журнал*. – 2011. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 78-88. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
36. Сагін С.В., Поповский Ю.М., Гребенюк М.Н. Влияние ориентационной упорядоченности в граничных смазочных слоях на триботехнические характеристики узлов трения // *Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб.* – 1998. – Вып. 1. – Одесса: ОГМА. – С.102-104.
37. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.

38. Sagin S.V. 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”* – 2019. – P. 139–145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.
39. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // *Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб.* – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120.
40. 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. DOI: 10.48077/scihor.24(11).2021.9-19.
41. Сагин С. В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // *Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту.* – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89-100.
42. Левченко О.В., Ганношина І.М., Остапчук Т.В. Система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень на мостіку судна // *Водний транспорт: Збірник наукових праць.* – 2025. – Вип. 1(42). – С. 24-27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
43. Petrychenko O.O., Levinskyi M.N., Prytula D.A., Vynohradova A.S. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // *Transport Systems and Technologies*. – 2023. – № 41. – P. 96–106. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
44. 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>.
45. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.
46. Сагін С.С., Сагін С.В. Забезпечення безпеки маневрування великотоннажних суден в стиснених портових водах // *Водний транспорт. Збірник наукових праць.* – 2024. – Вип. 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
47. Левченко О.В., Маранов О.В. Поточний стан дослідження питання прогнозування маневреності суден та їхньої гідродинаміки в обмежених водах // *Водний транспорт: Збірник наукових праць.* – 2025. – Вип. 1(42). – С. 55-60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
48. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // *Lubricants*. – 2025. – № 13. – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.
49. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр суднових дизелів // *Водний транспорт. Збірник наукових праць.* – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21.
50. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // *Проблеми техніки : наук.-виробн. журнал.* – 2012. – № 4. – Одеса : ОНМУ. – С. 68-81.
51. Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності суднових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення // *Водний транспорт.* – 2023. – № 1(37). – С. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
52. Сагін С.В., Сагін С.С. Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження // *Водний транспорт: Збірник наукових праць.* – 2023. – Вип. 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
53. Kurdiuk S., Dremluk V., Melnyk O., Onishchenko O., Fomin O., Pištěk V., & Kučera P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions // *Drones*. – 2025. – № 9 (3). – P. 174. <https://doi.org/10.3390/drones9030174>.
54. Melnyk O., Bulgakov M., Fomin O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Pulyaev I. Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects // *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. – 2025. – № 127. – P. 165–188. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>.
55. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.

REFERENCES

1. Sagin S.V., Sagin A.S. Control and diagnosis of reliability and economy of diesel engines of sea and river means of transport // *Ship power plants*. – 2023. – Vol. 46. – P. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.

2. Petrychenko O., Levynskiy M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // *Transport systems and technologies*. – 2024. – № 43. – С. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.
3. Levchenko O.V., Maranov O.V. Integration of combined decision support systems to ensure navigational safety and optimize vessel traffic in port areas // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 99–108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
4. Sagin S.V., Zablotskiy Y.V., Sagin A.S. Increasing the efficiency of ship's medium-speed diesel engines // *Water transport*. – 2025. – Вып. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
5. Sagin S.V., Sagin S.S. Determination of the method of controlling the movement of marine transport vessels while ensuring their safe divergences // *Water transport*. – 2023. – № 2(38). – P. 187–197. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
6. Gorb S., Popovskii A., Budurov M. Adjustment of speed governor for marine diesel generator engine // *International Journal of GEOMATE*. – 2023. – Vol. 25. – № 109. – P. 125-132. DOI: <https://doi.org/10.21660/2023.109.m2312>.
7. Marchenko O.O., Sagin S.V. Improving the process of cleaning marine heavy fuels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 41. – P. 10-14. DOI: 10.31653/smf340.2020.10-14.
8. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // *Automation of ship facilities*. – 2014. – №20. – P. 74-83.
9. Petrychenko O., Levynskiy M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // *Transport Systems and Technologies*. – 2023. – № 41. – P. 96-106. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
10. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Analysis of the impact of biodiesel fuel on the environmental and economic performance of marine diesel engines // *Water transport*. – 2025. – Вып. 1(42). – С. 180-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21.
11. Poberezhniy R.V., Sagin S.V. Ensuring the environmental performance of diesel engines in river and sea transport vessels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 41. – P. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
12. Madey V.V., Sagin S.V., Volkov O.M. Direction of the injection process during the use of fuel mixture that include fuel of biological origin in marine diesel engines // *Water transport*. – 2024. – Vol. 1(39). – P. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.
13. Petrychenko O., Levynskiy M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // *Sustainability*. – 2025. – № 17. – P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
14. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Determining the optimal operating modes of marine internal combustion engines when using biodiesel fuel // *Ship power plants*. – 2011. – Vol. 48. – P. 100-113. doi: 10.31653/smf48.2024.100-113.
15. Sagin S.V., Karianskiy S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskiy Y., Fomin O., Pí'st'ek V., Ku'cera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // *Applied Ocean Research*. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
16. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Optimization of operating modes of the exhaust gas bypass system of marine medium-speed diesel engines // *Automation of ship facilities*. – 2019. – № 25. – P. 79-89.
17. 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(8). – P. 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>
18. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Ship power plants*. – 2022. – № 45. – P. 5–16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
19. Sagin S., Haichenia O., Karianskiy S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – № 13. – P. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse1303058924>.
20. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Determination of optimal modes of exhaust gas control processes for marine diesel engines // *Water transport*. – 2024. – № 1(39). – P. 173–185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
21. 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. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
22. Sagin S.V. Rheology of motor oils in start-up and reverse modes of marine low-speed diesel engines // *Universum: Technical sciences*. – 2018. – № 3(48). – P. 67-71.
23. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Dynamics of marine diesel engines when using motor oils with different structural characteristics // *Automation of ship facilities*. – 2021. – № 27. – P. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
24. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
25. Sagin S.S., Sagin S.V. Use of artificial intelligence in the situations of excessive vessels approaching // *Water Transport*. – 2024. – №. 1(39). – P. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.

26. Sagin S.V., Zablotskyi Yu.V. Development of a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport // *Water transport*. – 2023. – Vol. 2(38). – P. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
27. Levinskyi M.V., Levinskyi V.M. Choosing the structure and parameters of vessel's course automatic control system under the influence of water-wave disturbances // *Automation of ship technical facilities*. – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
28. Daki O.A., Plita L.L., Trofymenko I.V., Fedunov V.M. Feature and requirements for navigational safety of navigation on inland waterways // *Water transport*. – 2022. – № 2(36). – P. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
29. Rusnak D.Y., Sagin S.V. Ensuring environmental requirements during ultrasonic desulfurization of hydrocarbon fuels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 40. – P. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
30. Tymochko O.I., Levchenko O.V., Rudenko V.M., Sitkov O.M. Use of hybrid robotic complex for inspection of marine oil and gas facilities // *Water transport*. – 2024. – Vol. 2(40). – P. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
31. Sagin S.V. Increasing the reliability of precision pairs of marine diesel fuel equipment through the use of organic coatings // *Herald of the Odessa National Maritime University*. – 2018. – № 4(57). – P. 109–120.
32. Levchenko O. Synthesis of vessels' options in dangerous situations taking into account time and resource restrictions in vessel DSS. // *Water transport*. – 2021. – № 3(34). – P. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.
33. Sagin S.V., Matskevych D.V. Optical characteristics of boundary lubricating layers of oils used in circulation systems of marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2011. – Vol. 26. – P. 116-125.
34. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V., Perunov R.V. Technology of use and test results of fuel additives for marine diesel engines // *Problems of technical*. – 2012. – Vol. 3. – P. 84-103.
35. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V. Determination of tribological characteristics of surfaces by the degree of ordering of wall layers of hydrocarbon liquids // *Problems of technical*. – 2011. – Vol. 3. – P. 78-88.
36. Sagin S.V., Popovskii Y.M., Grebenuk M.N. The influence of orientation ordering in boundary lubricant layers on the tribological characteristics of friction units // *Ship power plants*. – 1998. – Vol. 1. – P. 102-104.
37. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2020. – № 41. – P. 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
38. Sagin S.V. 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”* – 2019. – P. 139–145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.
39. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // *Automation of ship technical facilities*. – 2023. – № 28. – P. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120
40. 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. DOI: 10.48077/scihor.24(11).2021.9-19.
41. Sagin S.V. Determination of the range of lubricant viscosity stratification in tribological systems of marine diesel engines // *Herald of the Odessa National Maritime University*. – 2019. – № 1(58). – P. 89–100.
42. Levchenko O.V., Hannoshyna I.M., Ostupchuk T.V. Information support system for decision-making processes on the bridge of a ship // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 24–27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
43. Petrychenko O.O., Levinskyi M.N., Prytula D.A., Vynohradova A.S. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // *Transport Systems and Technologies*. – 2023. – №41. – P.96-106. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
44. 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>.
45. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.
46. Sagin S.S., Sagin S.V. Ensuring the safe maneuvering of large-tonnage vessels in confined port waters // *Water transport*. – 2024. – № 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
47. Levchenko O.V., Maranov O.V. The current state of research on predicting the manoeuvrability of ships and their hydrodynamics in confined waters // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 55–60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
48. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // *Lubricants*. – 2025. № 13. – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.
49. Sagin A.S., Sagin S.V. Experimental determination of optimal phases of fuel supply to the cylinder of marine diesel engines // *Water transport*. – 2024. – Vol. 1(39). – P. 206-215. doi.org.10.33298/2226-8553.2024.1.39.21.
50. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V. The influence of anisotropic fluids on the operation of friction units of marine diesel engines // *Problems of technical*. – 2012. – Vol. 4. – P. 68-81.

51. Sagin S.V., Bondar S.A., Stoliaryk T.O. Assessment of the reliability of marine diesel engines according to the technical condition of engine oil of circulating lubrication systems // Water transport. – 2023. – Vol. 1(37). – P. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
52. Sagin S.V., Sagin S.S., Determination of the method of controlling the movement of marine transport vessels while ensuring their safe divergences // Water transport. – 2023. – № 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
53. Kurdiuk S., Dremliuk V., Melnyk O., Onishchenko O., Fomin O., Píštěk V., & Kučera P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions // Drones. – 2025. – № 9 (3). – P. 174. <https://doi.org/10.3390/drones9030174>.
54. Melnyk O., Bulgakov M., Fomin O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Pulyaev I. Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. – 2025. – № 127. – P. 165–188. <https://doi.org/10.20858/sjstut.2025.127.10>.
55. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píštěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.

Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A.

DETERMINATION OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF HYBRID SCRUBBER SYSTEMS FOR CLEANING EXHAUST GASES FROM SULFUR IMPURITIES FROM MARINE DIESEL ENGINES

The results of research on determining the operational characteristics of hybrid scrubber systems for cleaning exhaust gases of marine diesel engines from sulfur impurities are presented. It is noted that the combustion of fuel in the cylinder of a marine diesel engine is accompanied not only by the release of heat and its transformation into torque, but also by the formation and emission into the atmosphere of exhaust gases. One of the most harmful components of marine diesel engine exhaust gases is sulfur oxides, which are formed during the combustion of fuel due to the presence of sulfur in it (in pure form or in combinations with other elements and substances). According to Annex VI MARPOL, the sulfur content in marine fuel should not exceed 0.1 % during the operation of vessels in special environmental areas – Sulphur Emission Control Areas (SECAs) and be no more than 0.5 % during the operation of vessels outside these areas. In the case when the exhaust gases of marine diesel engines are additionally cleaned in special devices (the most common of which are scrubbers), the use of fuel with a sulfur content of up to 3.5 % is allowed. The studies were performed on a Bulk Carrier class vessel with a deadweight of 81,780 tons. The ship's power plant included the main STX-MAN B&W 6S60ME-C engine and three auxiliary Yanmar 6EY18ALW2 engines. The exhaust gases of all diesel engines (main and auxiliary) were directed to a common scrubber, in which the gases were cleaned of sulfur impurities. The scrubber system was operated in an open or hybrid way. In the first case, exhaust gas cleaning was carried out using only seawater. In the second, a solution of caustic soda NaOH was added to the seawater. It was established that the use of a hybrid circuit increases the efficiency of the scrubber system for cleaning exhaust gases. This is reflected in the improvement of the environmental performance of marine diesel engines – a reduction in carbon dioxide CO₂, sulfur dioxide SO₂, as well as their SO₂/CO₂ ratio. The SO₂/CO₂ ratio is the indicator regulated by the requirements of Annex VI MARPOL in the case of using exhaust gas purification systems from sulfur oxides. In addition, this ratio is monitored during the verification of the environmental friendliness of the ship's power plant. The hybrid circuit has the most effective effect on sulfur-containing fuel components. This is reflected in a significant reduction in sulfur oxide emissions, which during the operation of the ship inside SECAs reaches 15.41–20.01 %; during the operation of the ship outside SECAs reaches 8.72–13.12 %.

Keywords: carbon monoxide emissions, environmental indicators, exhaust gas cleaning system, exhaust gases, marine diesel, marine fuel, maritime transport, scrubber, sulfur oxide emissions, sulfur oxide emissions

Стаття прийнята 10.10.2025