

DOI:10.31653/smf51.2025. 45-58

Отримана в редакції 10.10.2025

Прийнята до друку 20.10.2025

Куропятник О.А.

Національний університет «Одеська морська академія»

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ СУДЕН МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Морський та внутрішній водний транспорт є суттєвою складовою економіки будь якої країни, територія якої з'єднується з іншими водними шляхами. Корисна транспортна робота, яка забезпечується під час перевезення вантажу або пасажирів, пов'язана з неминучим утворенням шкідливих викидів з випускними газами теплових двигунів (на сам перед – дизелів, як самих розповсюджених генераторів механічної енергії, що встановлюються на морських та річкових судах) [1-4].

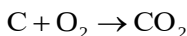
Двигуни внутрішнього згоряння / дизелі займають в суднової енергетики домінуюче положення в порівнянні з іншими типами теплових двигунів – паровими котлами та газовими турбінами. Перш за все це пов'язано з найменшою питомою ефективною витратою палива та найбільшим коефіцієнтом корисної дії, що характерні саме для дизелів [5-7]. Значення коефіцієнту корисної дії сучасних дизелів на номінальному навантаженні досягає 50...52 %, що на 7...10 % перебільшує подібний показник для паротурбінних або газотурбінних установок [8, 9]. Пропорційно коефіцієнту корисної дії дизелі суден морського транспорту характеризуються меншими значеннями питомої та годинної витрати палива. Системи підготовки палива та паливна апаратура високого тиску сучасних дизелів дозволяють використання в них палива з підвищеною в'язкістю – ця перевага в недалекому минулому була характерна лише для судових котлів паротурбінних установок.

Дизелі, що встановлюються на судах морського та внутрішнього водного транспорту, виконують функції головних та допоміжних двигунів, забезпечуючи рух судна та роботу судових систем, механізмів та обладнання. Отримання корисної роботи та ефективної потужності в судових дизелях неможливо без спалювання в їхніх циліндрах рідкого палива нафтового походження. При цьому в результаті його згоряння в атмосферу викидаються випускні гази. Більшу частину випускних газів (до 99,0...99,2 %) складають нейтральні та

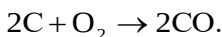
нетоксичні компоненти – продукти неповного згоряння (більшою частиною яких є діоксид вуглецю CO_2 і водяна пара H_2O) та повітря зі зниженим вмістом кисню. Невелику решту зі загальної частини випускних газів складають токсичні компоненти, які поділяються на дві групи. До першої групи відносяться продукти неповного згоряння палива – монооксид вуглецю CO , вуглеводні C_nH_m , альдегіди R-CHO та сажа C . Токсичні компоненти другої групи утворюються в результаті повного окислення хімічних елементів, що входять до складу палива та повітря – це оксиди азоту NO_x та сірки SO_x [10-12].

Суднові дизелі, що знаходяться в експлуатації, вимагають постійного пошуку ефективних способів зниження токсичності випускних газів, насамперед викидів оксидів азоту NO_x [13, 14], оксидів сірки SO_x [15, 16] та монооксиду вуглецю CO [17, 18]. Також актуальним є завдання зниження викидів діоксиду вуглецю CO_2 , які збільшують парниковий ефект та зменшують енергетичну ефективність суден морського та внутрішнього водного транспорту [19, 20].

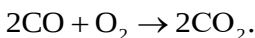
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Отримання корисної роботи в теплових двигунах (дизелях, котлах, газових турбінах) неможливо без використання палива, найбільш розповсюдженим видом якого на сьогодні є рідке паливо нафтового походження [21-24]. Під час згоряння рідкого палива нафтового походження (до складу якого входить 83...87 % вуглецю C) неминуче утворюється діоксиду вуглецю CO_2



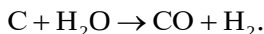
та оксид вуглецю CO



При цьому утворення CO_2 відбувається в зонах згоряння з достатньою кількістю повітря / кисню (тобто на зовнішній границі паливного струменя), утворення CO – в зонах з зниженою кількістю кисню (тобто в середині паливного струменя) [25-27]. У випадку потрапляння оксиду вуглецю CO в зону з підвищеною кількістю кисню, перебігає реакція, за якою CO перетворюється до CO_2



Утворення оксиду вуглецю CO можливо також в разі реакції вуглецю на водяній парі



На судах морського та внутрішнього водного транспорту майже не використовуються технології, що забезпечують очищення випускних газів від оксиду CO чи діоксиду CO₂ вуглецю. При цьому постійно впроваджуються заходи, що спрямовані на декарбонізацію морських перевезень. Перш за все це досягається шляхом зменшення витрати палива, оптимізації навігаційних переходів та використанню альтернативних видів палива [28, 29].

Одночасно з цим, емісія діоксиду вуглецю CO₂ є складовою, що визначає конструктивний коефіцієнт енергетичної ефективності судна (EEDI). Цей коефіцієнт представляє собою відношення емісії діоксиду вуглецю CO₂ з випускними газами суднових дизелів, що встановлені на судні, до транспортній роботі судна. Загальна формула для визначення EEDI має вигляд

$$\text{EEDI} = \frac{\text{Emission CO}_2}{\text{Capacity} \cdot v} \cdot \left[\frac{\text{г}}{\text{тонн} \cdot \text{миля}} \right];$$

де Emission CO₂ – загальні викиди діоксиду вуглецю головних та допоміжних дизелів, г;

Capacity – дедвейт судна під час здійснення окремого рейсу, тонн;

v – швидкість судна під час навігаційного переходу, вузли.

Відповідно до вимог ІМО значення EEDI розраховується для всіх суден, що збудовані після 01.01.2013. Для кожного з суден визначається максимально можливий коефіцієнт EEDI_{max} перебільшення якого свідчить про те, що судно не відповідає вимогам до енергоефективності [30, 31].

Основними шляхами, що сприяють зменшенню витрати палива, є вдосконалення робочого циклу та визначення оптимальних фаз подачі палива та випуску газів. Це може забезпечити 3,0...3,5 % зниження питомої витрати палива b_e , кг/(кВт·год), а також відповідне зменшення годинної витрати $B_{\text{год}}$, кг/год, та витрати палива на пройдений шлях B_m (тонн/миля) [32, 33].

Оптимізація навігаційних переходів полягає в визначенні не найкоротшої відстані, а шляху, яким забезпечуються менші витрати енергії головних та допоміжних двигунів, а також менший час навігаційного переходу. При цьому як основний показник враховується

змінна гідрометеорологічна обстановка, а також постійно діючи на обраному шляху вітри та морські течії.

До альтернативних видів палива, що сприяють декарбонізації суден морського та внутрішнього водного транспорту, відносяться водень, зріджений природний газ, аміак, метанол, а також гідроване рослинне мастило (HVO – Hydrotreated Vegetable Oil) [34, 35].

Постановка завдання. Завданням дослідження було визначення впливу палива класу HVO на екологічні показники роботи морського судна, зокрема на рівень емісії діоксиду вуглецю.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження виконувались на судні класу Gas Carrier водотоннажністю 127645 тонн. Як головні двигуни на судні було встановлено два однотипних малообертових дизеля 5X72DF Hyundai-WinGD (Winterthur Gas & Diesel Ltd. Winterthur, Switzerland). Основні характеристики судна та енергетичної установки наведені у таблиці 1.

Таблиця 1. Основні характеристики судна на енергетичної установки

Характеристика	Розмірність	Значення
Судно		
Довжина максимальна	м	299,0
Ширина за міделъшпангоутом	м	46,4
Осадка	м	12,5
Водотоннажність	тонн	127645
Швидкість руху	вузли	19,5
Головний двигун 5X72DF Hyundai-WinGD		
Діаметр циліндра	м	0,72
Хід поршня	м	3,155
Кількість циліндрів	–	5
Номінальна частота обертання	хв ⁻¹	73
Номінальна потужність	кВт	11000
Питома витрата палива	г/(кВт·год)	168
Кількість	–	2

Експлуатація дизелів під час навігаційних переходів здійснювалась на двох основних сортах палива – DMA20 та RME380. Паливо DMA20 використовувалось під час пускових режимів роботи дизелів, а також під час знаходження судна в районах спеціального екологічного контролю. Паливо RME380 – під час сталих режимів роботи дизелів та в разі знаходження судна поза районів спеціального екологічного контролю. Як альтернативне паливо на судні використовувалися

лось та було досліджене паливо HVO, яке є гідрованим рослинним мастилом. Основні характеристики палив DMA20, RME380 та HVO наведені у таблиці 2.

Таблиця 2. Характеристики моторних палив

Характеристика	DMA20	RME380	HVO
Густина при 20°C, кг/м ³	863	902	765
В'язкість при 40°C, мм ² /с	7,2	164	3,6
Температура спалаху, °C	76	154	66
Вміст, %			
вуглецю	84	83,5	82,7
водню	11,5	10,4	14,7
кисню	1,6	1,7	0,3
сірки	0,1	0,4	0
вологі	2,5	2,8	2,3
азоту	0,3	1,2	0
Нижча теплотворна здатність, кДж/кг	42459	40915	46453

Комплектація паливних систем та конструкція паливної апаратури дизелів 5X72DF Hyundai-WinGD дозволяла в одному з них використовувати основні сорти палива DMA20 та RME380, в іншому – паливну суміш, яка складалась з основного палива RME380 та палива HVO. Співвідношення палива RME380 та палива HVO під час проведення експериментів у відсотках їх вмісту в паливній суміші складали 90 / 10, 80 / 20, 70 / 30, 60 / 40.

Дослідження виконувались на експлуатаційних режимах, що відповідали навантаженню на дизелі 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 % та 100 % від номінального. Під час досліджень навантаження на обидва дизеля збігались між собою та регулювалися та підтримувалися у необхідних межах за допомогою системи автоматичного регулювання частоти обертання дизелів. Під час дослідження на дизелях підтримувались відповідні один одному режими мащення та охолодження.

Дослідження виконувались під час навігаційного переходу між портами Південної Америки та країн Середземномор'я, тривалість якого складала 16 діб. Це дозволяло виконати експерименти у повному обсязі для всіх режимів роботи дизелів та всіх характеристик паливної суміші RME380 / HVO. Всі дослідження виконувались під час знаходження судна поза спеціальними екологічними районами – Sulfur emission control areas (SECAs) та Nitrogen oxide emission control

areas (NECAs). Це дозволяло використовувати в дизелях паливо RME380 зі вмістом сірки 0,4 % за масою та встановлювало максимальну концентрацію оксидів азоту у випускних газах 14,4 г/(кВт·год).

Критерієм економічності роботи дизеля була обрана питома ефективна витрата палива b_e [31]. Як екологічні показники роботи судових дизелів приймалися концентрація оксидів азоту C_{NO_x} та об'ємний вміст діоксиду вуглецю C_{CO_2} в випускних газах [32, 33].

Питома ефективна витрата палива b_e визначалась за допомогою судових вимірювальних засобів – витратомірів, встановлених на магістралях підведення палива до форсунок дизеля та відсічного палива.

Під час проведення експериментів концентрація оксидів азоту NO_x , а також об'ємний вміст CO_2 в випускних газах контролювались за допомогою газоаналізатора Testo350XL (виробництва Німеччини), що дозволяє визначати концентрації наступних речовин: CO_2 , O_2 , N_2 , NO_x , CH_4 , HC , SO_2 , H_2S , а також температуру, вологість, швидкість і диференціальний тиск вимірюваного середовища [34].

Витрата випускних газів вимірювалась за допомогою витратоміра MT100S фірми «Siemens AG» (Німеччина). Витратоміри серії MT100 відносяться до багатоточкових (із кількістю вимірювальних зондів від 2 до 8) масових витратомірів повітря і газів, які працюють за принципом теплового розсіювання. Чутливість витратомірів MT100 становить 0,07.. 0,2 м³/с, робоча температура – до 450° С, що забезпечує їх функціональність у всьому діапазоні експлуатаційних навантажень дизеля. Витратоміри MT100 та газоаналізатори Testo350XL відповідають вимогам Системи безперервного моніторингу викидів (Continuous Emission Monitoring System – CEMS) Агентства з охорони навколишнього середовища (Environmental Protection Agency – EPA).

Аналіз випускних газів виконувався в газовипускній магістралі на відстані 10 м від місця виходу газів з газотурбонагнетача, що відповідало вимогам Технічного кодексу за NO_x .

Похибка у вимірюванні витрати газів, що визначався витратоміром MT100S, не перевищувала $\pm 0,5$ %; похибка у вимірі емісії оксидів азоту NO_x та діоксидів вуглецю CO_2 у випускних газах, що виконувалась газоаналізатором Testo350XL, становила $\pm 1,0$ %; похибка у визначенні питомої ефективної витрати палива не перевищувала

$\pm 1,0$ %. Всі вимірювання забезпечувались та контролювались судновою системою діагностики ProPower (Norway).

Результати розрахунків питомої ефективної витрати палива, а також вимірювань емісії оксидів азоту та діоксиду вуглецю наведені у таблицях 3-5.

Таблиця 3. Питома ефективна витрата палива, b_e , г/(кВт·год), для палива RME380 та для паливних сумішей різного складу

Режим роботи	RME380	Співвідношення RME380 / HVO у суміші, % / %			
		90 / 10	80 / 20	70 / 30	60 / 40
$0,5N_{\text{еном}}$	208	202	198	194	191
$0,6N_{\text{еном}}$	195	190	186	183	181
$0,7N_{\text{еном}}$	183	178	175	174	172
$0,8N_{\text{еном}}$	177	173	170	168	167
$0,9N_{\text{еном}}$	171	168	165	162	160
$N_{\text{еном}}$	173	170	168	165	164

Таблиця 4. Концентрація оксидів азоту у випускних газах, г/(кВт·год), для палива RME380 та для паливних сумішей різного складу

Режим роботи	RME380	Співвідношення RME380 / HVO у суміші, % / %			
		90 / 10	80 / 20	70 / 30	60 / 40
$0,5N_{\text{еном}}$	12,75	12,36	11,62	11,35	12,69
$0,6N_{\text{еном}}$	13,03	12,41	11,85	11,44	12,95
$0,7N_{\text{еном}}$	13,18	12,63	11,96	11,52	13,08
$0,8N_{\text{еном}}$	13,31	12,72	12,02	11,62	13,18
$0,9N_{\text{еном}}$	13,52	12,88	12,12	11,71	13,38
$N_{\text{еном}}$	13,61	12,94	12,18	11,73	13,45

Таблиця 5. Об'ємний вміст оксиду вуглецю в випускних газах, %, для палива RME380 та для паливних сумішей різного складу

Режим роботи	RME380	Співвідношення RME380 / HVO у суміші, % / %			
		90 / 10	80 / 20	70 / 30	60 / 40
$0,5N_{\text{еном}}$	7,25	5,96	5,83	5,40	4,81
$0,6N_{\text{еном}}$	7,75	6,15	5,97	5,57	4,86
$0,7N_{\text{еном}}$	7,88	6,37	6,05	5,74	5,00
$0,8N_{\text{еном}}$	8,21	6,55	6,23	5,82	5,15
$0,9N_{\text{еном}}$	8,43	6,61	6,42	5,97	5,24
$N_{\text{еном}}$	8,77	6,85	6,62	6,15	5,37

Візуалізація даних таблиць 3-5 подана на діаграмах рис. 1-3.

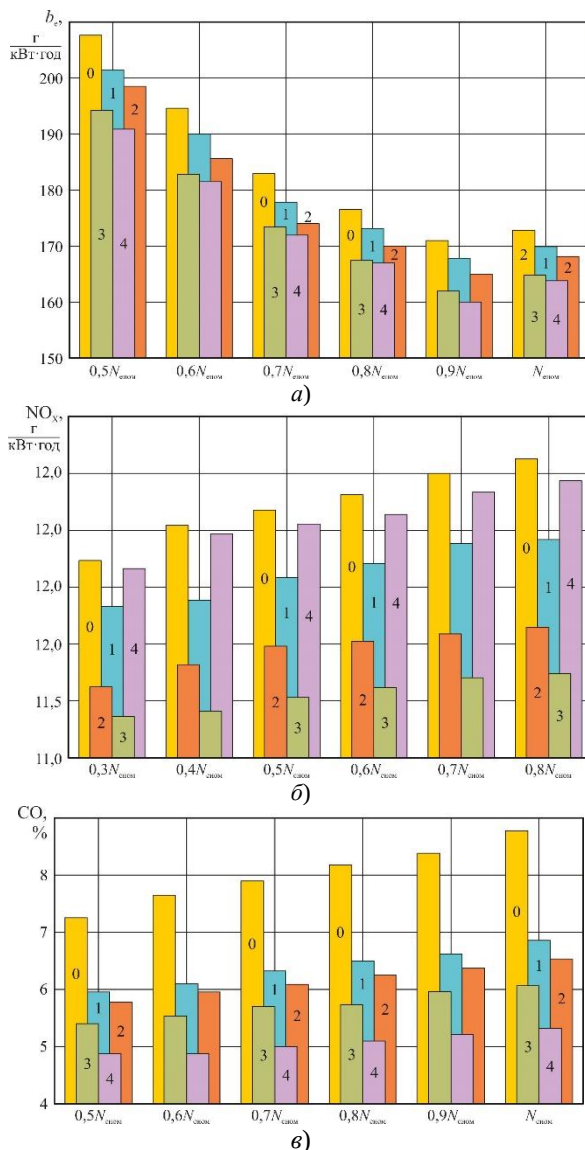


Рис. 2. Залежності показників роботи дизеля 5X72DF Hyundai-WinGD від навантаження під час використання палива RME380 та паливних сумішей різного складу: 0 – RME380; 1 – 90 % RME380+10 % HVO; 2 – 80 % RME380+20 % HVO;

3 – 70 % RME380+30 % HVO; 4 – 60 % RME380+40 % HVO;

а – питома витрата палива; б – емісія оксидів азоту; в – об'ємний вміст оксиду вуглецю в випускних газах

Відносні зміни концентрації оксидів азоту ΔNO_x та об'ємного вмісту оксиду вуглецю ΔCO_2 в випускних газах, а також питомої ефективної витрати палива Δb_e розраховувались за виразами

$$\Delta\text{NO}_x = \frac{\text{NO}_x^{\text{RME}} - \text{NO}_x^{\text{HVO}}}{\text{NO}_x^{\text{RME}}} \cdot 100\%, \quad \Delta\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2^{\text{RME}} - \text{CO}_2^{\text{HVO}}}{\text{CO}_2^{\text{RME}}} \cdot 100\%,$$

$$\Delta b_e = \frac{b_e^{\text{RME}} - b_e^{\text{HVO}}}{b_e^{\text{RME}}} \cdot 100\%,$$

де NO_x^{RME} , NO_x^{HVO} , b_e^{RME} , b_e^{HVO} – концентрація оксиду азоту в випускних газах та питома ефективна витрата палива під час експлуатації дизеля на паливі RME380 та його суміші з HVO, г/(кВт·год);

CO_2^{RME} , CO_2^{HVO} – об'ємний вміст оксиду вуглецю в випускних газах під час експлуатації дизеля на паливі RME380 та його суміші з HVO, %.

Отримані значення узагальнені у таблицях 6-8.

Таблиця 6. Відносне зменшення питомої ефективної витрати палива Δb_e , %, для паливної суміші різного складу

Режим роботи дизеля	Співвідношення RME380 / HVO у суміші, % / %			
	90 / 10	80 / 20	70 / 30	60 / 40
$0,5N_{\text{еном}}$	0,99	1,98	2,48	2,48
$0,6N_{\text{еном}}$	1,63	3,26	4,89	4,35
$0,7N_{\text{еном}}$	1,69	3,37	5,06	5,06
$0,8N_{\text{еном}}$	1,71	3,43	5,71	5,14
$0,9N_{\text{еном}}$	1,98	3,47	5,45	4,95
$N_{\text{еном}}$	1,73	2,89	4,62	4,62

Таблиця 7. Відносне зменшення емісії оксидів азоту з випускними газами ΔNO_x , %, для паливної суміші різного складу

Режим роботи дизеля	Співвідношення RME380 / HVO у суміші, % / %			
	90 / 10	80 / 20	70 / 30	60 / 40
$0,5N_{\text{еном}}$	3,06	8,86	10,98	0,47
$0,6N_{\text{еном}}$	4,76	9,06	12,21	0,62
$0,7N_{\text{еном}}$	4,17	9,26	12,59	0,76
$0,8N_{\text{еном}}$	4,43	9,69	12,70	0,98
$0,9N_{\text{еном}}$	4,73	10,36	13,39	1,04
$N_{\text{еном}}$	4,92	10,51	13,81	1,18

Таблиця 8. Відносне зменшення емісії діоксиду вуглецю в випускних газах ΔCO_2 , %, для паливної суміші різного складу

Режим роботи дизеля	Співвідношення RME380 / HVO у суміші, % / %			
	90 / 10	80 / 20	70 / 30	60 / 40
0,5 $N_{\text{ном}}$	17,79	19,59	25,52	33,66
0,6 $N_{\text{ном}}$	20,65	22,97	28,13	37,29
0,7 $N_{\text{ном}}$	19,16	23,22	27,16	36,55
0,8 $N_{\text{ном}}$	20,22	24,12	29,11	37,27
0,9 $N_{\text{ном}}$	21,59	23,84	29,18	37,84
$N_{\text{ном}}$	21,89	24,52	29,87	38,77

Висновки і перспективи подальших досліджень. Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки.

1. Використання в судових дизелях паливних сумішей до складу яких входить гідроване рослинне мастило (HVO – Hydrotreated Vegetable Oil) сприяє поліпшенню екологічних показників їх роботи.

2. Дослідженнями (які були виконані на судових дизелях 5X72DF Hyundai-WinGD) встановлено, що для паливних сумішей, до складу яких входить паливо нафтового походження RME380 та паливо RME380 призводить до зменшення емісії оксидів азоту та діоксиду вуглецю з випускними газами.

3. В діапазоні експлуатаційних навантажень 50...100 % на дизеля 5X72DF Hyundai-WinGD та за умови використання паливних сумішей, для яких відсоткове відношення RME380 / HVO змінювалось як 90 / 10, 80 / 20, 70 / 30, 60 / 40, встановлено, що зниження емісії оксидів азоту складає 0,5...13,8 %, зниження емісії діоксиду вуглецю становить 17,8...38,8 %. При цьому зменшення емісії діоксиду вуглецю залежно від збільшення в паливній суміші палива HVO має пропорційний характер; зменшення емісії оксидів азоту – характеризується наявністю оптимуму, який відповідає 20...30 % вмісту палива HVO в його паливній суміші з паливом RME380.

4. Зниження емісії діоксиду вуглецю призводить до рівнозначного підвищення конструктивного коефіцієнту енергетичної ефективності судна (EEDI) та сприяє декарбонізації морського судна.

5. Подальші дослідження доцільно спрямовувати на визначення впливу палива HVO на якість процесу згоряння паливної суміші, на термодинамічні показники процесу згоряння та зміну температурного напруження основних елементів дизеля.

Перелік використаних джерел

1. 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)). – С. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.

2. Левінський М.В., Левінський В.М. Вибір параметрів системи стабілізації курсу судна при дії водно-хвильових збурень // *Автоматизація суднових технічних засобів : наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.

3. 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)). – С. 37-43. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.

4. Заблоцький Ю.В. Зниження втрат енергії під час забезпечення процесів мащення суднових двигунів внутрішнього згоряння // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. – 2023. – Вип. 47. – С. 23-31. doi: 10.31653/smf47.2023.23-31.

5. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами суднових дизелів // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 173-185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.

6. 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

7. 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/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.

8. Заблоцький Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок // *Вісник Одеського національного морського університету: зб. наук. праць*. – 2020. – № 2(62). – С. 106-119. DOI: 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.

9. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 40. – С. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.

10. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.

11. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка суднових дизелів під час використанні моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація суднових технічних засобів: наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.

12. Рибальченко М.Є., Білоусов Є.В. Використання числових профілів робочого процесу для аналізу ефективності роботи суднового малообертового двигуна в умовах сучасної тенденції щодо зниження експлуатаційної швидкості суден. // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 1-13. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.06.

13. Petrychenko O., Levinskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // Transport Systems and Technologies. – 2024. – Vol. 43. – P. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2

14. 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. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.

15. 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.

16. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – С. 10-14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.

17. Levinskyi M.V., Shapo V.F. Adaptive control for technological type control objects // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – Vol. 1231. – P. 565–575. https://doi.org/10.1007/978-3-030-52575-0_47.

18. Goolak S.; Riabov I.; Petrychenko O.; Kyrychenko M.; Pohosov O. The simulation model of an induction motor with consideration of instantaneous magnetic losses in steel // Advances in Mechanical Engineering. – 2025. – Vol. 17(2). doi:10.1177/16878132251320236.

19. Мацкевич Д.В., Сагин С.В., Ханмамедов С.А. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 25. – С.109-118.

20. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в судових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.21.

21. Сагин С.В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. Наук. праць. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89-100.

22. 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. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.337616>.

23. 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. – P. 4756. <https://doi.org/10.3390/en18174756>.

24. 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>.

25. 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.

26. Kuropyatnyk O.A. Selection of optimal operating modes of exhaust gas recirculation system for marine low-speed diesel engines // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 203-211. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52992.

27. Сагін А.С., Заблоцький Ю.В. Регенерація змащувальних властивостей моторних палив і мастил під час експлуатації судових

дизелів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – С. 17-30. doi: 10.31653/smf45.2022.17-30.

28. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2022. – Вип. 45. – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.

29. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – 2021. – № 7-8. – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

30. Заблоцкий Ю.В., Солодовников В.Г. Снижение энергетических потерь в топливной аппаратуре судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2013. – № 3. – С. 46-56.

31. Petrychenko O. Levinskyi 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>.

32. 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.

33. Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури судових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2022. – Вип. 44. – С. 121-131. doi: 10.31653/smf44.2022.121-131.

34. Kuropyatnyk O.A. Reduction of NO_x emission in the exhaust gases of low-speed marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – 2018. – № 7-8. – P. 37-42. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-37-42.

35. Petrychenko, O.; Levinskyi, M.; Goolak, S.; Lukoševičius, V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // Sustainability. – 2025. – Vol. 17. – P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.