

DOI:10.31653/smf51.2025. 22-44

Отримана в редакції 11.10.2025

Прийнята до друку 22.10.2025

Куропятник О.А.

Національний університет «Одеська морська академія»

ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОСТІ МОРСЬКИХ СУДЕН ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕКСНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ВИПУСКНИМИ ГАЗАМИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Головними та допоміжними двигунами на морських судах є двигуни внутрішнього згоряння / дизелі [1-4]. Саме цей тип теплових двигунів має найвищий коефіцієнт корисної дії та найнижчу питому витрату палива [5-8]. Дизелі – основний тип теплових двигунів, що забезпечує рух морських суден, а також функціонування їх систем та механізмів [9-12]. Сучасні альтернативи судновим дизелям (сонячні батареї, вітрогенератори, жорсткі вітрила та скайт вітрила, акумуляторні батареї, паливні елементи) можуть забезпечити енергетичні потреби морських суден лише за певних умов та обмежений період часу [13-17].

Функціонування суднових дизелів неможливе без використання рідкого палива нафтового походження, що є основним джерелом енергії всіх теплових двигунів [18-20]. Спалювання палива в циліндрах дизеля призводить до неминучого утворення випускних газів, до складу яких входять токсичні речовини, насамперед оксиди азоту, оксиди сірки та діоксид вуглецю. Відповідно до вимог Annex VI MARPOL встановлено три рівні викидів оксидів азоту – Tier I, Tier II, Tier III, які обмежують максимальну концентрацію оксидів азоту у випускних газах залежно від року побудови судна та частоти обертання дизеля [21-23]. Зниження емісії оксидів азоту з випускними газами суднових дизелів безпосередньо впливає на екологічність роботи морських суден та є актуальним прикладним завданням, розв'язання якого сприяє підвищенню ефективності морських перевезень та попередженню забруднення довкілля [24-27]. Особливу актуальність це завдання набуває під час знаходження морських суден в районах спеціального екологічного контролю викидів оксидів азоту NO_x (Nitrogen oxides Emission Control Areas – NECAs).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підтримання необхідного рівня емісії оксидів азоту для подібних суден можливо лише за умовою використання додаткових методів очищення випускних

газів, які поділяються на первинні [28-30] та вторинні [31-33]. Первинні забезпечують створення сприятливих умов, які перешкоджають ланцюгової реакції утворення оксидів азоту під час згоряння палива [34-37]. Перш за все вони спрямовані на зниження максимальної температури згоряння в циліндрі дизеля [38-40]. Найбільш розповсюдженими з первинних методів є зволоження наддувного повітря, використання водопаливних емульсій, безпосереднє впорскування води в циліндр дизеля, рециркуляція випускних газів [41, 42]. Найбільш поширеним серед вторинних методів є селективне каталітичне відновлення [43, 44]. Вторинні методи спрямовані на безпосереднє очищення випускних газів від оксидів азоту.

Постановка завдання. Завданням дослідження була оцінка екологічності морських суден під час використання комплексних систем управління випускними газами судових дизелів. Подібні науково-прикладні завдання виникають під час експлуатації потужних судових дизелів, що обладнані двохступеневою системою наддува. В цих випадках кожна ступінь наддува комплектується окремою системою рециркуляції випускних газів, через це виникає завдання визначення найбільш раціональних режимів експлуатації подібних систем.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження виконувались на спеціалізованому морському судні, призначеному для перевезення скрапленого природного газу. Як головний двигун на судні використовувався судовий дизель 6UEC60LS фірми Kobe Diesel Mitsubishi Heavy Industries з двохступеневою системою наддува. Основні характеристики дизеля надані у таблиці 1.

Таблиця 1. Основні характеристики судового дизеля 6UEC60LS фірми Kobe Diesel Mitsubishi Heavy Industries

Показник	Позначення	Розмірність	Величина
Діаметр циліндра	D	м	0,6
Хід поршня	S	м	2,4
Кількість циліндрів	i		6
Потужність	N_e	кВт	10590
Частота обертання валу	n	об/хв	100
Питома витрата палива	b_e	г/(кВт·год)	0,173
Відповідність вимогам ІМО щодо емісії NO _x			Tier III – під час знаходження у NE-CAs; Tier II – під час знаходження поза NECAs

Для забезпечення вимог Додатку VI MARPOL щодо концентрації оксидів азоту у випускних газах дизель обладнаний комплексною системою рециркуляції випускних газів – високого (High pressure – HP-EGR) та низького (Low pressure – LP-EGR) тиску. Принципова схема системи рециркуляції надана на рис. 1.

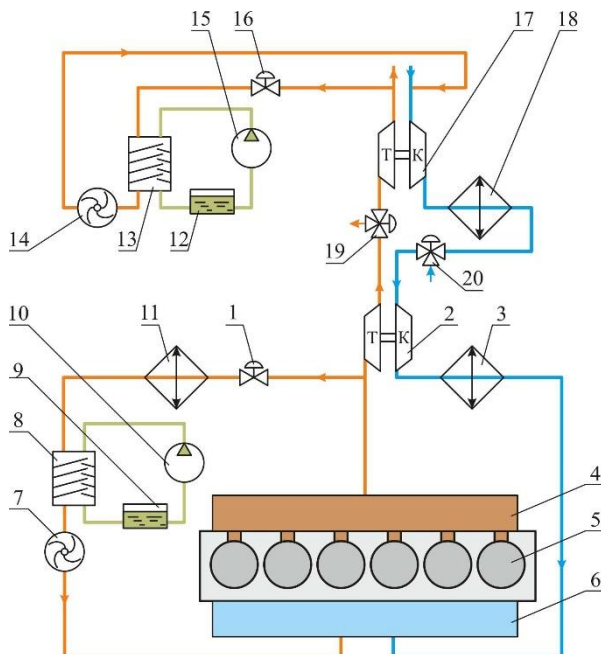


Рис. 1. Принципова схема системи рециркуляції випускних газів суднового дизеля 6UEC60LS фірми Kobe Diesel Mitsubishi Heavy Industries:

- 1, 16 – керуючий клапан; 2, 17 – газотурбонагнітач; 3, 18 – охолоджувач наддувного повітря; 4 – випускний колектор; 5 – дизель; 6 – продувний колектор; 7, 14 – додатковий нагнітач випускних газів; 8, 13 – скруббер очищення випускних газів; 9, 12 – цистерна прісної води; 10, 15 – насос прісної води; 11 – охолоджувач випускних газів; 19, 20 – трьохходовий клапан; Т, К – газова турбіна та повітряний компресор газотурбонагнітача

Судновий дизель обладнаний двохступеневою системою наддуву, яку забезпечують газотурбонагнітачі 2 та 17. Ступінь наддуву (одноступеневий або двохступеневий) регулюється положенням трьохходових клапанів 19 та 20. Охолодження наддувного повітря забезпечується у охолоджувачах 18 (для першого ступеню наддува) та 3 (для другого ступеню наддува).

В разі використання одноступеневого наддуву випускні гази з випускного колектору 4 дизеля 5 рухаються до газової турбіни Т газотурбонагнітача 2. Далі випускні гази з клапану 19 спрямовуються до випускної труби та в такий спосіб мінують газотурбонагнітач 17. За цією схемою повітря потрапляє до повітряного компресору К газотурбонагнітача 2 через клапан 20, після цього охолоджуються у охолоджувачі наддувного повітря 3 та потрапляють до продувного колектору 6 дизеля 5.

В разі використання двохступеневого наддуву випускні гази проходять скрізь клапан 19 до газової турбіни Т газотурбонагнітача 17 та після розширення у газової турбіні Т рухаються або до випускної труби. За такою схемою повітряний компресор К газотурбонагнітача 17 спрямовує повітря скрізь охолоджувач наддувного повітря 18 до повітряного компресору К газотурбонагнітача 2.

До системи рециркуляції HP-EGR входять керуючий клапан 1, охолоджувач випускних газів 11, скруббер очищення випускних газів 8, насос 10 та цистерна 9 прісної води системи охолодження скрубера 8, додатковий нагнітач випускних газів 7. Випускні гази, що виходять з випускного колектору 4 дизеля 5 потрапляють або у газову турбіну Т газотурбонагнітача 2, або переспрямовуються системою рециркуляції (через елементи 1, 11, 8, 7) до продувного колектору 6.

Ступінь рециркуляції системи високого тиску HP-EGR δ_{HT} визначається кількістю газів, що повертаються до циліндрів дизеля

$$\delta_{\text{HT}} = \frac{G_{\text{HTrec}}}{G_{\text{HTmax}}} \cdot 100\%; \quad (1)$$

де G_{HTrec} – кількість випускних газів, що повертаються до циліндрів дизеля (вимірюється витратоміром після керуючого клапану 1);

G_{HTmax} – максимальна кількість випускних газів, що виходять з дизеля (вимірюється витратоміром до керуючого клапану 1).

Основними складовими системи рециркуляції LP-EGR є керуючий клапан 16, скруббер очищення випускних газів 13, насос 15 та цистерна 12 прісної води системи охолодження скрубера 13, додатковий нагнітач випускних газів 14. Випускні гази, що виходять з газової турбіни Т газотурбонагнітача 17 потрапляють або у газувипускную трубу, або переспрямовуються системою рециркуляції (через елементи 16, 13, 14) до повітряного компресору К газотурбонагнітача 17.

Ступінь рециркуляції системи низького тиску LP-EGR δ_{LP} визначається кількістю газів, що повертаються до повітряного компресору

$$\delta_{LP} = \frac{G_{LPrec}}{G_{LPmax}} \cdot 100\%; \quad (2)$$

де G_{LPrec} – кількість випускних газів, що повертаються до повітряного компресору К газотурбонагнітача 17 (вимірюється витратоміром після керуючого клапану 16);

G_{LPmax} – максимальна кількість випускних газів, що виходять газової турбіни Т газотурбонагнітача (вимірюється витратоміром до керуючого клапану 16).

В разі використання двохступеневого наддуву можливо використання окремо кожної з систем рециркуляції – високого HP-EGR чи низького LP-EGR тиску, а також їх комплексне / послідовне використання HP-EGR – LP-EGR. В разі використання одноступеневого наддуву можливе використання лише системи рециркуляції високого HP-EGR тиску.

Відповідно та технічних характеристики системи EGR, в залежності від положення керуючого клапану 16 ступінь рециркуляції δ_{LP} системи LP-EGR знаходиться у межах $\delta_{LP}=0...25\%$ (що забезпечує повернення до повітряного компресору К газотурбонагнітача 17 та далі до циліндрів дизеля до 25 % випускних газів). Також згідно технічних характеристик в залежності від положення керуючого клапану 1 ступінь рециркуляції δ_{HP} системи HP-EGR знаходиться у межах $\delta_{HP}=0...25\%$ (що забезпечує повернення до продувного колектору 6 та далі до циліндрів дизеля до 25 % випускних газів).

Екологічність морських переходів під час знаходження судна поза NECAs забезпечувалась роботою однієї з двох систем – HP-EGR або LP-EGR. При цьому в обох випадках значення концентрації оксидів азоту у випускних газах відповідало вимогам Tier II.

Результати досліджень з визначення впливу систем рециркуляції HP-EGR або LP-EGR на рівень емісії оксидів азоту NO_x з випускними газами наведені у таблицях 2-5. При цьому в таблицях 2, 3 наведені усереднені значення емісії оксидів азоту NO_x , які вимірювались на протязі 30...60 хв на кожному з досліджуваних режимів. відхилення в визначенні значення концентрації NO_x не перевищувала $\pm 0,5\%$ відповідно до технічних характеристик газоаналізатору, яким виконувались вимірювання.

Таблиця 3. Емісія оксидів азоту NO_x , г/(кВт·год), з випускними газами судового дизеля 6UEC60LS за різних умов експлуатації системи HP-EGR

Навантаження на дизель, N_e , %	Ступінь рециркуляції системи HP-EGR δ_{HP} , %					
	0	5	10	15	20	25
25	10,35	9,52	9,15	7,68	7,62	7,54
50	10,92	10,02	9,64	7,85	7,72	7,63
75	11,68	10,66	10,22	8,03	7,97	7,92
100	12,84	11,68	10,95	8,32	8,25	8,16

Таблиця 2. Емісія оксидів азоту NO_x , г/(кВт·год), з випускними газами судового дизеля 6UEC60LS за різних умов експлуатації системи LP-EGR

Навантаження на дизель, N_e , %	Ступінь рециркуляції системи LP-EGR δ_{LP} , %					
	0	5	10	15	20	25
25	10,35	9,81	9,24	8,53	7,65	7,17
50	10,92	10,17	9,32	8,63	7,76	7,27
75	11,68	10,74	9,63	8,88	7,83	7,41
100	12,84	11,47	10,01	9,17	8,22	7,71

Відносне зменшення рівню емісії оксидів азоту під час використання систем рециркуляції високого HP-EGR або низького LP-EGR тиску розраховується за рівнянням

$$\Delta \text{NO}_x = \frac{\text{NO}_x^0 - \text{NO}_x^{\text{LP}(\text{i})}}{\text{NO}_x^0}, \quad \Delta \text{NO}_x = \frac{\text{NO}_x^0 - \text{NO}_x^{\text{HP}(\text{i})}}{\text{NO}_x^0}; \quad (3)$$

де NO_x^0 – емісія оксидів азоту без використання системи EGR;

$\text{NO}_x^{\text{HP}(\text{i})}$, $\text{NO}_x^{\text{LP}(\text{i})}$ – емісія оксидів азоту в разі використання системи рециркуляції високого HP-EGR або низького LP-EGR тиску з різним ступенем рециркуляції (5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %).

З урахуванням експериментальних даних, що наведені у таблицях 2, 3, за виразами (1) отримані значення відносного зменшення рівню емісії оксидів азоту, які узагальнені у таблицях 4, 5.

Таблиця 4. Відносне зменшення емісії оксидів азоту ΔNO_x , %, з випускними газами судового дизеля 6UEC60LS за різних умов експлуатації системи HP-EGR

Навантаження на дизель, N_e , %	Ступінь рециркуляції системи HP-EGR δ_{HP} , %				
	5	10	15	20	25
25	8,02	11,59	25,80	26,38	27,15
50	8,24	11,72	28,11	29,30	30,13
75	8,73	12,50	31,25	31,76	32,19
100	9,03	14,72	35,20	35,75	36,45

Таблиця 5. Відносне зменшення емісії оксидів азоту ΔNO_x , %, з випускними газами суднового дизеля 6UEC60LS за різних умов експлуатації системи LP-EGR

Навантаження на дизель, N_e , %	Ступінь рециркуляції системи LP-EGR δ_{LP} , %				
	5	10	15	20	25
25	5,22	10,72	17,58	26,09	30,72
50	6,87	14,65	20,97	28,94	33,42
75	8,05	17,55	23,97	32,96	36,56
100	10,67	22,04	28,58	35,98	39,95

Для кращої візуалізації результати, що наведені у таблицях 2-5, подані у вигляді діаграм – рис. 2, 3.

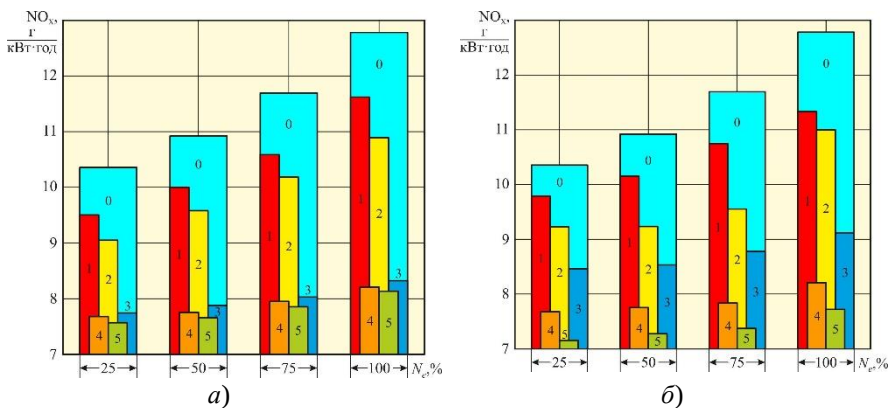


Рис. 2. Емісія оксидів азоту NO_x , $\text{г}/(\text{кВт} \cdot \text{год})$, з випускними газами суднового дизеля 6UEC60LS за різних умов експлуатації системи EGR високого (а) та низького (б) тиску:

0 – $\delta_{LP}=0$ %, $\delta_{HP}=0$ % (експлуатація без рециркуляції); 1 – $\delta_{LP}=5$ %, $\delta_{HP}=5$ %;
 2 – $\delta_{LP}=10$ %, $\delta_{HP}=10$ %; 3 – $\delta_{LP}=15$ %, $\delta_{HP}=15$ %; 4 – $\delta_{LP}=20$ %, $\delta_{HP}=20$ %;
 5 – $\delta_{LP}=25$ %, $\delta_{HP}=25$ %

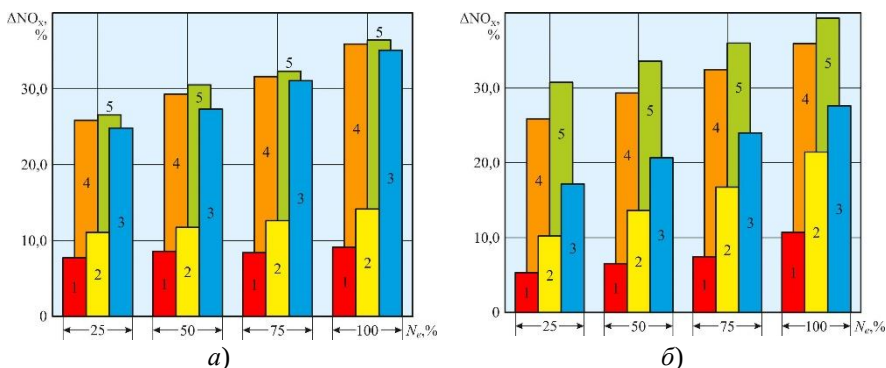


Рис. 3. Відносне зменшення емісії оксидів азоту ΔNO_x , %, з випускними газами суднового дизеля 6UEC60LS за різних умов експлуатації системи EGR високого (а) та низького (б) тиску:

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

До основних недоліків систем рециркуляції відноситься підвищення температури випускних газів дизелів. Це пов'язане з уповільненням процесу згоряння палива (через зниження вмісту кисню у повітряно-газової суміші, що потрапляє до циліндрів дизеля) та зсувом процесу згоряння на лінію розширення. Результати вимірювань, що підтверджують збільшення температури випускних газів t_r для різного ступеню рециркуляції систем високого δ_{HP} та низького δ_{LP} тиску, наведені у таблицях 6, 7. При цьому в таблицях вказані значення усередненої температури випускних газів t_r за всіма циліндрами дизеля. У таблицях 8, 9 надано значення збільшення температури випускних газів Δt_r у порівнянні з експлуатацією дизеля без використання системи рециркуляції.

Таблиця 6. Температура випускних газів t_r , °C, суднового дизеля 6UEC60LS за різних умов експлуатації системи EGR високого тиску

Навантаження на дизель, N_e , %	Ступінь рециркуляції системи HP-EGR δ_{HP} , %					
	0	5	10	15	20	25
25	412	424	436	446	449	462
50	392	403	411	423	426	439
75	370	381	387	395	398	411
100	358	367	372	376	379	392

Таблиця 7. Температура випускних газів t_r , °C, суднового дизеля 6UEC60LS за різних умов експлуатації системи EGR низького тиску

Навантаження на дизель, N_e , %	Ступінь рециркуляції системи HP-EGR δ_{LP} , %					
	0	5	10	15	20	25
25	412	421	433	443	446	455
50	392	400	409	418	421	424
75	370	378	383	390	394	397
100	358	365	368	373	376	380

Таблиця 8. Збільшення температури випускних газів Δt_r , °C, суднового дизеля 6UEC60LS за різних умов експлуатації системи EGR високого тиску

Навантаження на дизель, N_e , %	Ступінь рециркуляції системи HP-EGR δ_{HP} , %				
	5	10	15	20	25
25	12	24	34	37	50
50	11	19	31	34	47
75	11	17	25	28	41
100	9	14	18	21	34

Таблиця 9. Збільшення температури випускних газів Δt_r , °C, суднового дизеля 6UEC60LS за різних умов експлуатації системи EGR низького тиску

Навантаження на дизель, N_e , %	Ступінь рециркуляції системи HP-EGR δ_{LP} , %				
	5	10	15	20	25
25	9	21	31	34	43
50	8	17	26	29	32
75	8	13	20	24	27
100	7	10	15	18	22

Графічна візуалізація даних таблиць 6, 7 подана у вигляді діаграм на рис. 4. Зростання температури випускних газів під час використання систем рециркуляції високого HP-EGR та LP-EGR низького тиску подано на діаграмах рис. 5.

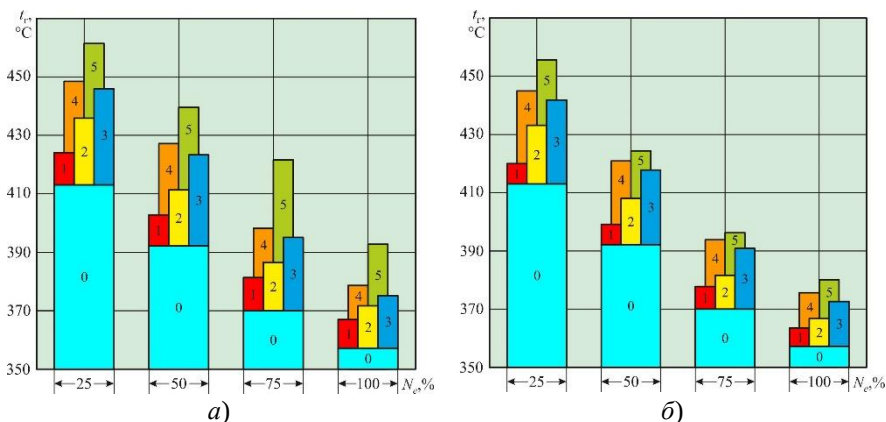


Рис. 4. Температура випускних газів t_g , °C, суднового дизеля 6UEC60LS за різних умов експлуатації системи EGR високого (а) та низького (б) тиску: 0 – $\delta_{HP}=0\%$, $\delta_{LP}=0\%$ (експлуатація без рециркуляції); 1 – $\delta_{HP}=5\%$, $\delta_{LP}=5\%$; 2 – $\delta_{HP}=10\%$, $\delta_{LP}=10\%$; 3 – $\delta_{HP}=15\%$, $\delta_{LP}=15\%$; 4 – $\delta_{HP}=20\%$, $\delta_{LP}=20\%$; 5 – $\delta_{HP}=25\%$, $\delta_{LP}=25\%$

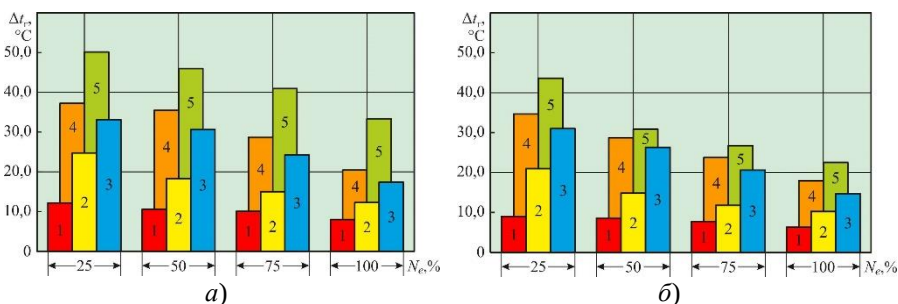


Рис. 5. Зростання температури випускних газів Δt_g , °C, суднового дизеля 6UEC60LS під час використання систем рециркуляції високого HP-EGR (а) та низького LP-EGR (б) тиску: 1 – $\delta_{HP}=5\%$, $\delta_{LP}=5\%$; 2 – $\delta_{HP}=10\%$, $\delta_{LP}=10\%$; 3 – $\delta_{HP}=15\%$, $\delta_{LP}=15\%$; 4 – $\delta_{HP}=20\%$, $\delta_{LP}=20\%$; 5 – $\delta_{HP}=25\%$, $\delta_{LP}=25\%$

Аналіз результатів, що надані у таблицях 2-5 та представлені на рис. 2-3, свідчить, що процес рециркуляції з використанням системи високого тиску в порівнянні з рециркуляцією низького тиску відрізняється більшою експоненційністю та характеризується наявністю певного насичення. Для обраного діапазону ступеню рециркуляції ця ділянка для всіх навантажень на дизель відповідає значенням

$\delta_{\text{HP}}=15\%$, $\delta_{\text{HP}}=20\%$ та $\delta_{\text{HP}}=25\%$. При цьому відносно зменшення емісії оксидів азоту ΔNO_x (таблиця 5) складає 25,80...27,15 %; 28,11...30,13 %; 31,25...32,19 % та 35,20...36,45 % для навантажень на дизель 25 %, 50 %, 75 % та 100 % відповідно. Тобто збільшення ступень рециркуляції з $\delta_{\text{HP}}=15\%$ до $\delta_{\text{HP}}=20\%$ та з $\delta_{\text{HP}}=20\%$ до $\delta_{\text{HP}}=25\%$ призводить лише до 1,5...2,0 % зниження відносного рівня емісії оксидів азоту ΔNO_x . На відміну в діапазоні $\delta_{\text{HP}}=15\ldots25\%$ у діапазонах $\delta_{\text{HP}}=5\ldots10\%$ та $\delta_{\text{HP}}=10\ldots15\%$ спостерігається стрибкоподібне зменшення емісії оксидів. Системи рециркуляції низького тиску характеризується меншою експоненційністю – стрибкоподібна зміна емісії оксидів азоту в цьому випадку характерна для всього діапазону значень ступеню рециркуляції δ_{LP} .

Саме з цих причин під час вивчення комплексного впливу систем рециркуляції високого HP-EGR та низького LP-EGR тиску на екологічність роботи суден морського транспорту першочергово визначався найбільш раціональний діапазон зміни ступеню рециркуляції високого тиску δ_{HP} . Далі ці значення залишалися незмінними та виконувались дослідження для всього можливого діапазону зміни ступеню рециркуляції низького тиску δ_{LP} .

Також визначимо важливість врахування такого показника як температура випускних газів. Саме цей параметр характеризує теплове навантаження якому піддаються елементи циліндрової групи та газо-випускної системи дизеля. Через це, максимальне можливе значення температури випускних газів лімітується вимогами інструкції з експлуатації дизеля, постійно контролюється та у випадку необхідності регулюється під час роботи дизеля. Для системи рециркуляції високого тиску критичне збільшення температури випускних газів Δt_r спостерігається для значень ступеню рециркуляції $\delta_{\text{HP}}=25\%$, за якою майже на всіх навантаженнях на дизель значення t_r підвищується на 35...45 °C та досягає 50 °C для навантаження 25 % від номінального.

За наведених обстав експлуатаційні режими роботи дизеля, що відповідають ступеню рециркуляції високого тиску $\delta_{\text{HP}}=25\%$ були виключені з подальших випробувань з комплексного визначення впливу систем рециркуляції високого HP-EGR та низького LP-EGR тиску на екологічність роботи суден морського транспорту. Також другий цикл досліджень не проводився для експлуатаційних режимів роботи дизеля, що відповідають ступеню рециркуляції високого тиску $\delta_{\text{HP}}=5\%$ та $\delta_{\text{HP}}=10\%$ – через меншу ефективність зниження емісії

оксидів азоту ΔNO_x за цих умов. Викладене дозволило як оптимальні режими експлуатації системи рециркуляції високого тиску визнати такі, що відповідають ступеню рециркуляції високого тиску $\delta_{HP}=15\%$ та $\delta_{HP}=20\%$. Для кожного з цих режимів виконувались дослідження з визначення впливу системи рециркуляції низького тиску на екологічність роботи суднового дизеля 6UEC60LS фірми Kobe Diesel Mitsubishi Heavy Industries. Результати цих досліджень наведені у таблицях 10-13.

Таблиця 10. Емісія оксидів азоту NO_x , г/(кВт·год), суднового дизеля 6UEC60LS під час комплексного управління випускними газами (за умовою постійного ступеню рециркуляції високого тиску $\delta_{HP}=15\%$ та змінного ступеню рециркуляції системи низького тиску δ_{LP})

Навантаження на дизель, N_e , %	Ступінь рециркуляції системи LP-EGR δ_{LP} , %					
	0	5	10	15	20	25
25	7,68	2,76	2,65	2,52	2,48	2,45
50	7,85	2,85	2,72	2,64	2,61	2,59
75	8,03	2,97	2,81	2,72	2,68	2,66
100	8,32	3,11	2,97	2,81	2,77	2,75

Таблиця 11. Емісія оксидів азоту NO_x , г/(кВт·год), суднового дизеля 6UEC60LS під час комплексного управління випускними газами (за умовою постійного ступеню рециркуляції високого тиску $\delta_{HP}=20\%$ та змінного ступеню рециркуляції системи низького тиску δ_{LP})

Навантаження на дизель, N_e , %	Ступінь рециркуляції системи LP-EGR δ_{LP} , %					
	0	5	10	15	20	25
25	7,62	2,65	2,52	2,38	2,35	2,33
50	7,67	2,75	2,61	2,51	2,47	2,45
75	7,97	2,82	2,70	2,58	2,52	2,50
100	8,25	2,88	2,76	2,65	2,63	2,61

Візуалізація значень, що наведені у таблицях 10-11, виконана на діаграмах, що подані на рис. 6.

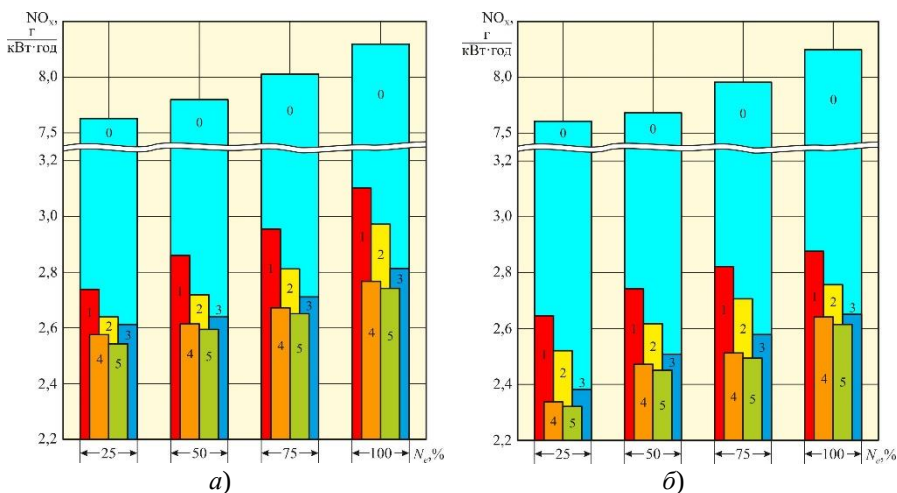


Рис. 6. Емісія оксидів азоту NO_x , г/(кВт·год), суднового дизеля 6UEC60LS під час комплексного управління випускними газами:

$a - \delta_{\text{HP}}=15\%$; $b - \delta_{\text{HP}}=20\%$

0 – $\delta_{\text{LP}}=0\%$ (експлуатація без рециркуляції); 1 – $\delta_{\text{LP}}=5\%$, 2 – $\delta_{\text{LP}}=10\%$,
3 – $\delta_{\text{LP}}=15\%$, 4 – $\delta_{\text{LP}}=20\%$, 5 – $\delta_{\text{LP}}=25\%$

Ефективність комплексного / послідовного очищення випускних газів від оксидів азоту може бути оцінено як відносне зменшення NO_x під використання комплексного / послідовного очищення у системах HP-EGR – LP-EGR в порівнянні з їх очищенням лише у системі HP-EGR або у системі LP-EGR за виразами

$$\Delta \text{NO}_x^{\text{LP}} = \frac{\text{NO}_x^{\text{LP(i)}} - \text{NO}_x^{\text{HP-LP(i)}}}{\text{NO}_x^{\text{LP(i)}}}, \quad \Delta \text{NO}_x^{\text{HP}} = \frac{\text{NO}_x^{\text{HP(i)}} - \text{NO}_x^{\text{HP-LP(i)}}}{\text{NO}_x^{\text{LP(i)}}}; \quad (4)$$

де $\text{NO}_x^{\text{HP-LP(i)}}$ – емісія оксидів азоту в разі використання їх комплексного / послідовного очищення у системах HP-EGR – LP-EGR;

$\text{NO}_x^{\text{LP(i)}}$, $\text{NO}_x^{\text{HP(i)}}$ – емісія оксидів азоту в разі їх очищення лише у системі рециркуляції низького LP-EGR або високого HP-EGR тиску.

З урахуванням даних, що наведені у таблицях 2, 3, 10, 12, значення $\Delta \text{NO}_x^{\text{LP}}$ та $\Delta \text{NO}_x^{\text{HP}}$ відповідно до виразу (4) знаходяться у інтервалі 62,6...69,6 %.

Екологічність роботи судна може бути оцінена за виразом, який визначає відносну різницю між поточним значенням емісії оксидів азоту для певних умов експлуатації системи EGR та максимального можливим, яке регламентується вимогами Annex VI MARPOL. Цей вираз має вигляд

$$Eco(NO_x) = \frac{NO_x^{TierIII} - NO_x^{HP-LP}}{NO_x^{TierIII}}; \quad (5)$$

де $Eco(NO_x)$ – екологічність робота судна за емісією оксидів азоту, %;

$NO_x^{TierIII} = 3,4 \text{ г/(кВт·год)}$ – максимальна концентрація оксидів азоту у випускних газах під час знаходження судна всередині NECAs;

NO_x^{HP-LP} – поточне значення концентрації оксидів азоту у випускних газах під час використання комплексної системи очищення HP-EGR – LP-EGR.

Відповідно до експериментальних значень, що наведені у таблицях 10, 11, за виразом (5) були отримані величини $Eco(NO_x)$, що надані у таблицях 12, 13

Додатково зазначимо, що під час знаходження судна всередині NECAs екологічність судна задовольняла вимогам Tier III, це забезпечувалось послідовним, комплексним очищенням випускних газів в системах HP-EGR та LP-EGR.

Таблиця 12. Екологічність робота судна за емісією оксидів азоту $Eco(NO_x)$, %, під час комплексного управління випускними газами (за умовою постійного ступеню рециркуляції високого тиску $\delta_{HP}=15$ % та змінного ступеню рециркуляції системи низького тиску δ_{LP})

Навантаження на дизель, N_e , %	Ступінь рециркуляції системи LP-EGR δ_{LP} , %				
	5	10	15	20	25
25	18,82	22,06	25,88	27,06	27,94
50	16,18	20,00	22,35	23,24	23,82
75	12,65	17,35	20,00	21,18	21,76
100	8,53	12,65	17,35	18,53	19,12

Таблиця 13. Екологічність робота судна за емісією оксидів азоту $Eco(NO_x)$, %, під час комплексного управління випускними газами (за умовою постійного ступеню рециркуляції високого тиску $\delta_{HP}=20$ % та змінного ступеню рециркуляції системи низького тиску δ_{LP})

Навантаження на дизель, N_e , %	Ступінь рециркуляції системи LP-EGR δ_{LP} , %				
	5	10	15	20	25
25	22,06	25,88	30,00	30,88	31,47
50	19,12	23,24	26,18	27,35	27,94
75	17,06	20,59	24,12	25,88	26,47
100	15,23	18,82	22,06	22,65	23,24

Візуалізація значень, що наведені у таблицях 12-13, виконана на діаграмах, що подані на рис. 7.

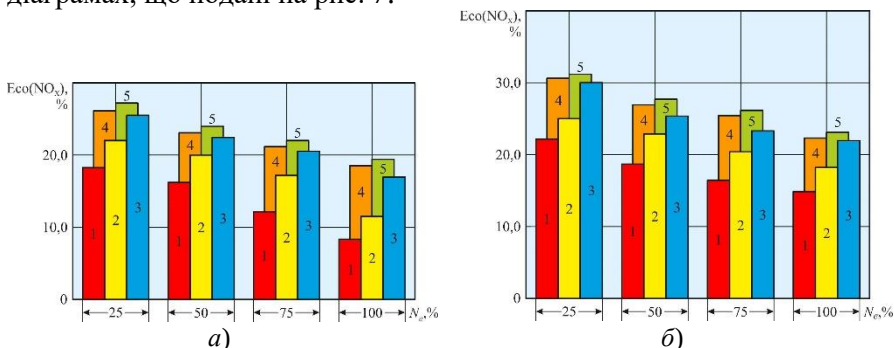


Рис. 7. Екологічність роботи судна за емісією оксидів азоту $Eco(NO_x)$, %, під час комплексного управління випускними газами:

$a - \delta_{HP}=15$ %; $b - \delta_{HP}=20$ %;

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

Аналогічно випадку використання лише систем рециркуляції високого або низького тиску комплексна система рециркуляції також призводить до збільшення температури випускних газів t_r . Усереднені значення цього показника для різних умов експлуатації системи EGR наведені у таблицях 14, 15. Збільшення температури випускних газів Δt_r судового дизеля 6UEC60LS фірми Kobe Diesel Mitsubishi Heavy Industries під час різних умов комплексного управління випускними газами наведені у таблицях 16, 17.

Таблиця 14. Температура випускних газів t_r , °C, суднового дизеля 6UEC60LS під час комплексного управління випускними газами (за умовою постійного ступеню рециркуляції високого тиску $\delta_{HP}=15\%$ та змінного ступеню рециркуляції системи низького тиску δ_{LP})

Навантаження на дизель, N_e , %	Ступінь рециркуляції системи LP-EGR δ_{LP} , %					
	0	5	10	15	20	25
25	446	456	463	466	468	473
50	423	431	437	440	443	447
75	395	402	408	412	416	418
100	376	383	388	392	396	399

Таблиця 15. Температура випускних газів t_r , °C, суднового дизеля 6UEC60LS під час комплексного управління випускними газами (за умовою постійного ступеню рециркуляції високого тиску $\delta_{HP}=20\%$ та змінного ступеню рециркуляції системи низького тиску δ_{LP})

Навантаження на дизель, N_e , %	Ступінь рециркуляції системи LP-EGR δ_{LP} , %					
	0	5	10	15	20	25
25	451	464	467	472	476	479
50	429	439	445	446	449	452
75	403	412	417	419	422	424
100	380	389	392	394	397	400

Таблиця 16. Збільшення температури випускних газів Δt_r , °C, суднового дизеля 6UEC60LS під час комплексного управління випускними газами (за умовою постійного ступеню рециркуляції високого тиску $\delta_{HP}=15\%$ та змінного ступеню рециркуляції системи низького тиску δ_{LP})

Навантаження на дизель, N_e , %	Ступінь рециркуляції системи LP-EGR δ_{LP} , %					
	0	5	10	15	20	25
25	34	44	51	54	56	61
50	31	39	45	48	51	55
75	25	32	38	42	46	48
100	18	25	30	34	38	41

Таблиця 17. Збільшення температури випускних газів Δt_r , °C, суднового дизеля 6UEC60LS під час комплексного управління випускними газами (за умовою постійного ступеню рециркуляції високого тиску $\delta_{HP}=20\%$ та змінного ступеню рециркуляції системи низького тиску δ_{LP})

Навантаження на дизель, N_e , %	Ступінь рециркуляції системи LP-EGR δ_{LP} , %					
	0	5	10	15	20	25
25	39	52	55	60	64	61
50	37	47	53	54	57	55
75	33	42	47	49	52	48
100	22	31	34	36	39	41

Графічна візуалізація даних таблиць 14-17 подана у вигляді діаграм на рис. 5, 6.

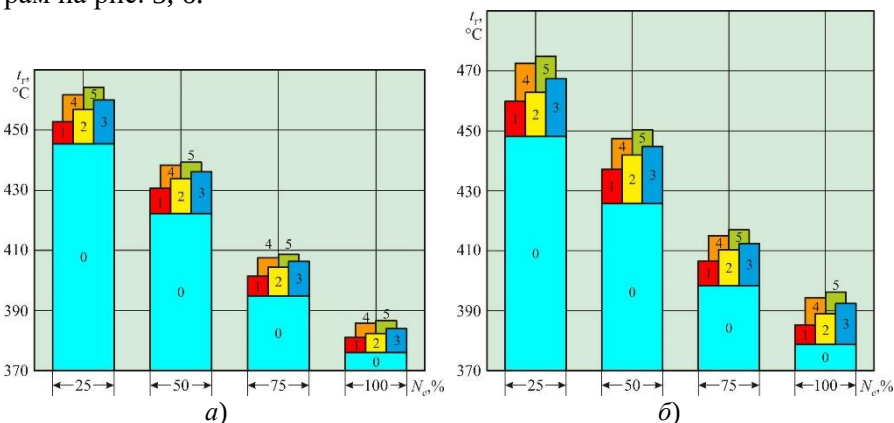


Рис. 8. Температура випускних газів t_g , °C, суднового дизеля 6UEC60LS під час комплексного управління випускними газами:

$a - \delta_{HP} = 15\%$; $b - \delta_{HP} = 20\%$;

0 – $\delta_{LP} = 0\%$ (експлуатація без рециркуляції); 1 – $\delta_{LP} = 5\%$, 2 – $\delta_{LP} = 10\%$,
3 – $\delta_{LP} = 15\%$, 4 – $\delta_{LP} = 20\%$, 5 – $\delta_{LP} = 25\%$

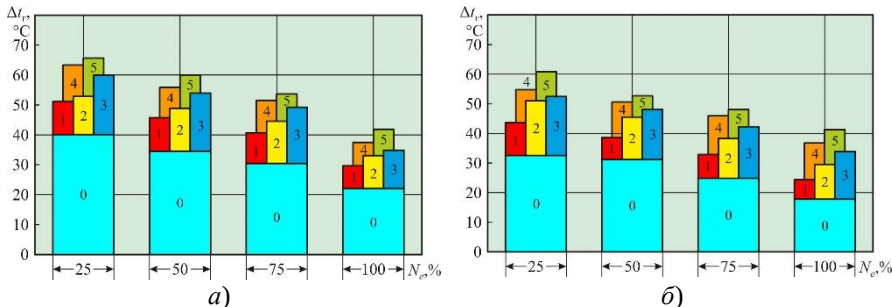


Рис. 9. Збільшення температури випускних газів Δt_g , °C, суднового дизеля 6UEC60LS під час комплексного управління випускними газами:

$a - \delta_{HP} = 15\%$; $b - \delta_{HP} = 20\%$;

0 – $\delta_{LP} = 0\%$ (експлуатація без рециркуляції); 1 – $\delta_{LP} = 5\%$, 2 – $\delta_{LP} = 10\%$,
3 – $\delta_{LP} = 15\%$, 4 – $\delta_{LP} = 20\%$, 5 – $\delta_{LP} = 25\%$

Висновки і перспективи подальших досліджень. Сучасні потужні суднові дизелі, що обладнані двохступеневою системою наддува та, відповідно, комплексною системою рециркуляції випускних газів, вимагають визначення раціональних режимів експлуатації цих систем. При цьому основне завдання полягає у визначенні таких зна-

чень ступені рециркуляції системи рециркуляції високого та низького тиску, за якими забезпечується максимальне зниження емісії оксидів азоту з одночасним мінімальним підвищенням температурної напруженості дизеля.

Для суднового дизеля 6UEC60LS фірми Kobe Diesel Mitsubishi Heavy Industries, який з метою забезпечення вимог Annex VI MARPOL щодо емісії оксидів азоту обладнаний комплексною системою рециркуляції високого HP-EGR та низького LP-EGR тиску експериментальним шляхом встановлено наступне.

1. Найбільшим раціональним діапазоном ступеню рециркуляції системи HP-EGR визначено 15...20 %. За цих умов для 25...100 % навантажень на судновий дизель зменшення емісії оксидів азоту складає 25,80...35,75 %, з відповідним збільшенням температури випускних газів на 21...34 °C. Збільшення ступеню рециркуляції до 25 % сприяє зменшенню емісії оксидів азоту на 27,15... 36,45 %, але при цьому температура випускних газів на деяких експлуатаційних режимах підвищується на 47...50 °C, що суттєво збільшує температурну напруженість дизеля, тому не є рекомендованим.

2. Оцінку ефективності комплексного управління емісією оксидів азоту шляхом рециркуляції випускними газами та екологічність роботи судна може бути оцінена за виразом, який визначає відносну різницю між поточним значенням емісії оксидів азоту для певних умов експлуатації системи рециркуляції та максимально можливим, яке регламентується вимогами Annex VI MARPOL.

3. Найбільша ефективність комплексного управління випускними газами (яке складається з послідовного використання систем рециркуляції високого та низького тиску) забезпечується:

для експлуатаційних режимів, що відповідають 25...50 % навантаженню на судновий дизель – ступень рециркуляції системи HP-EGR 15 %, ступень рециркуляції системи LP-EGR 10 %; при цьому екологічність роботи судна досягає 20,0...22,1 % з допустимим значенням збільшення температури випускних газів на 45...51 °C;

для експлуатаційних режимів, що відповідають 75...100 % навантаженню на судновий дизель – ступень рециркуляції системи HP-EGR 20 %, ступень рециркуляції системи LP-EGR 2 %; при цьому екологічність роботи судна досягає 22,7...26,9 % з допустимим значенням збільшення температури випускних газів на 39...52 °C.

Перелік використаних джерел

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

2. 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.

3. 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.

4. Сагін А.С. Корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час переведення суднових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки // *Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб.* – 2023. – Вип. 28. – С. 67 – 78. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-67-78.

5. 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.

6. 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.

7. 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>.

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

9. 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>.

10. 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.

11. Двуліт З.П., Тимошук О.М., Левченко О.В. Вдосконалення бізнес-процесів сучасних судноплавних компаній в сфері міжнародних морських вантажних перевезень // Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку. – 2021. – № 3 (1). – С. 1-12.

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

13. 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](https://doi.org/10.1177/16878132251320236).

14. 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.

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

16. 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>.

17. 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>.

18. Заблоцкий Ю.В. Підвищення економічності роботи судових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 12-16. DOI: 10.31653/smf340.2020.12-16.

19. 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.

20. 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.

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

22. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.

23. 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.

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

25. Мацкевич Д.В., Сагін 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.

26. 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.

27. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр судових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.

28. Заблоцький Ю. В. Зниження теплової напруженості суднових дизелів за рахунок використання присадок до палива // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – С. 76-87.

29. 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.

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

31. Сагін А.С., Заблоцький Ю.В. Регенерація змащувальних властивостей моторних палив і мастил під час експлуатації суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – С. 17-30. doi: 10.31653/smf45.2022.17-30.

32. 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.

33. Заблоцкий Ю.В. Исследование влияния органических покрытий на работу элементов топливной аппаратуры высокого давления судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2015. – № 35. – С. 83-92.

34. 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.

35. 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.

36. 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

37. 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 Develop-

ments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 203-211. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52992

38. 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>.

39. 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>.

40. 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>.

41. Gorb S., Levinskyi M., Budurov M. Sensitivity Optimisation of a Main Marine Diesel Engine Electronic Speed Governor // *Scientific Horizons*. – 2021. – Vol. 24(11). – P. 9-19. [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(11\).2021.9-19](https://doi.org/10.48077/scihor.24(11).2021.9-19).

42. 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>.

43. 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.

44. 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.