

Сагін С.В., Куропятник О.А.

## ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ВИПУСКНИМИ ГАЗАМИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Розглянута система рециркуляції випускних газів суднового дизеля, використання якої забезпечує зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах. Висвітлені особливості систем рециркуляції випускних газів високого та низького тиску, а також система перепуску випускних газів. Метою дослідження було визначення оптимальних режимів експлуатації суднових систем управління випускними газами. При цьому як критерії оптимальності приймалися сукупність двох факторів – максимальне зменшення емісії оксидів азоту (як одного з основних джерел забруднення довкілля) та мінімально підвищення питомої витрати палива (як головного економічного показника роботи суднових дизелів).

Експериментальні дослідження, що виконувались на судновому дизелі 16V32 фірми Wartsila-Sulzer, система рециркуляції якого дозволяла варіювати ступінь рециркуляції випускних газів у діапазоні 0...21 %, визначили що: підвищення ступеню рециркуляції випускних газів сприяє підвищенню екологічності роботи суднових дизелів, що виражається в зниженні емісії оксидів азоту до 28,25...29,83 % в порівнянні з роботою дизеля без використання системи рециркуляції газів; з підвищенням ступеню рециркуляції випускних газів погіршується економічність роботи суднових дизелів, що виражається в збільшенні питомої витрати палива, при цьому на деяких експлуатаційних режимів та деякого ступеню перепуску збільшення питомої витрати палива досягає 11,00...12,30 % в порівнянні з роботою дизеля без використання системи рециркуляції газів. Як оптимальні запропоновані режими експлуатації системи рециркуляції випускних газів що відповідають 12...15 % ступеню рециркуляції випускних газів, які забезпечують зниження емісії оксидів азоту в діапазоні 16,6...26,6 % при цьому підвищення питомої витрати палива знаходиться в діапазоні 2,17...4,81 %.

**Ключові слова:** екологічність роботи дизеля, економічність роботи дизеля, емісія оксидів азоту, морський транспорт, перепуск випускних газів, питома витрата палива, рециркуляція випускних газів, судновий дизель.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Експлуатація суден морського транспорту завжди пов'язана з виникненням різноманітних дилем:

- зменшення часу транспортування вантажів (яке досягається шляхом збільшення швидкості судна) з одночасним зменшенням витрати палива (яка, на жаль, підвищується сама через збільшення швидкості судна) [1-3];
- збільшення потужності головної енергетичної установки (що можливо лише завдяки підвищенню циклової подачі палива) з одночасним зменшенням шкідливих викидів в довкілля (кількість яких стає більшою саме через підвищення циклової подачі палива) [4-6];
- підвищення комфортних умов роботи та відпочинку суднового екіпажу (що досягається через додаткову потужність допоміжної енергетичної установки через витрачання палива для забезпечення функціонування систем кондиціонування, охолодження та освітлення) з одночасним скороченням викидів вуглецю (об'ємна та масова частина яких пропорційно збільшується разом з збільшенням потужності суднових електричних генераторів) [7-9].

Стабілізація в необхідних межах або зниження значень практично всіх екологічних показників суднових двигунів внутрішнього згорання (емісії оксидів вуглецю, сірки та азоту, а також незгорілих вуглеводнів, сажі і диму) пов'язана:

- або з конструкційними змінами двигунів і систем, що забезпечують їх функціонування [10, 11];
- або з використанням більш дорогих (на сьогоднішній момент) джерел енергії (наприклад, водню, природного газу, палива з низьким вмістом сірки) [12, 13];
- або з застосуванням технологій сонячної та вітрової енергетики [14, 15].

Названі способи вимагають не тільки попередньої розробки та експериментального визначення оптимальних режимів, але також додаткових фінансових вкладень на їх впровадження, експлуатацію та обслуговування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним із способів підтримання екологічних показників роботи суден морського транспорту та судових двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) є управління випускними газами, які в більшій кількості потрапляють в атмосферу [16-18]. Управління випускними газами ДВЗ здійснюється їх рециркуляцією (Exhaust gas recirculation – EGR) або їх перепуском / скиданням – (Exhaust gas wastergate – EGW) [19-21]. Системи EGR передбачають повернення частити випускних газів, що рухаються від випускного колектора в бік газового турбоагнітача (ГТН) назад в циліндр дизеля. При цьому можливі два варіанти системи – високого тиску (High pressure EGR – HP-EGR) – в разі, коли до циліндра повертається частина газів, яка ще не потрапила до ГТН; та низького тиску (Low pressure EGR – LP-EGR) – в разі, коли до циліндра повертається частина газів, вже після ГТН. Системи EGW передбачають перепуск / скидання газів, що рухаються в бік ГТН, безпосередньо в випускную трубу. Основне призначення систем EGW – попередження надмірної частоти обертання ротору ГТН у випадку раптового підвищення потужності дизеля та, відповідно, раптового збільшення кількості випускних газів. При цьому системи EGW можуть бути використані як додатковий спосіб підтримання екологічності роботи ДВЗ [22, 23].

Підвищення екологічності роботи ДВЗ суден морського транспорту неможливе без збільшення витрати палива, віднесеного як до часу роботи дизеля (тобто годинної –  $B_r$ , кг/год) також і до його потужності тобто (питомої –  $b_e$ , кг/кВт-год) або до пройденної судном відстані (тобто на милю плавання –  $B_m$ , кг/миля) [24, 25].

Також необхідно визначити, що експлуатація пропульсивних комплексів суден морського транспорту може чимало часу, а іноді й постійно, відбуватися в особливих екологічних районах (на внутрішніх водних шляхах, на рейдах та території річкових / морських портів, у прибережних акваторіях) [26, 27]. Екологічні характеристики судових дизелів в таких районах додатково обмежуються вимогами Міжнародних та національних конвенції та контролюються з боку берегових наглядових організацій.

Аналогічна дилема виникає також під час підвищення екологічності роботи суден морського транспорту за рахунок використання системи керування випускними газами – HP-EGR, LP-EGR, EGW. Всі три системи забезпечують зниження емісії оксидів азоту, але при цьому неминуче підвищується питома витрата палива та знижується ефективна потужність дизеля.

Різноманіття експлуатаційних режимів роботи дизеля, особливі вимоги до судового пропульсивного комплексу залежно від районів його експлуатації, необхідність виконання комерційних завдань із транспортування вантажу або перевезення пасажирів зумовлює адаптивне керування способами, що забезпечують екологічні показники роботи ДВЗ морського транспорту. Для комплексної системи керування випускними газами, принципова схема якої показана на рис. 1, під поняттям «адаптивне керування» мається на увазі комбінація систем рециркуляції випускних газів (що здійснюється за принципом HP-EGR або LP-EGR) і системи перепуску газів – EGW.

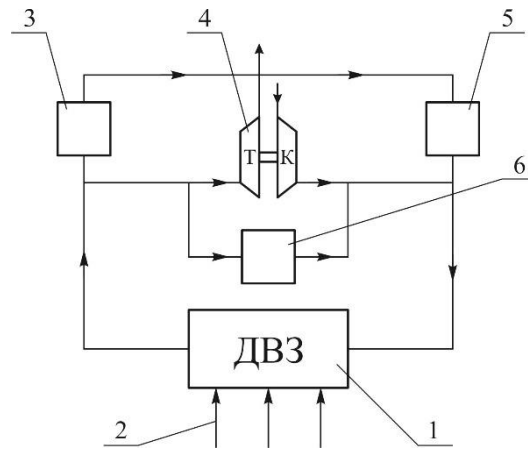


Рисунок 1 – Принципова схема комплексної системи керування випускними газами:  
1 – ДВЗ; 2 – підвід робочих рідин; 3 – система EWG; 4 – ГТН; 5 – система LP-EGR;  
6 – система HP-EGR

**Формулювання цілей статті.** Викладене зумовлює мету досліджень – визначення оптимальних режимів експлуатації суднових систем управління випускними газами. При цьому як критерії оптимальності приймалися сукупність двох факторів – максимальне зменшення емісії оксидів азоту (як одного з основних джерел забруднення довкілля) та мінімально підвищення питомої витрати палива (як головного економічного показника роботи ДВЗ).

**Виклад основного матеріалу.** Експерименти по визначенню оптимальних експлуатаційних режимів системи управління випускними газами (а саме системами LP-EGR та EWG) виконувались на судовому дизелі 16V32 фірми Wartsila-Sulzer, що був встановлено на спеціалізованому морському судні дедвейтом 60800 тонн з забезпечення технологічних операцій з видобутку нафти (рис. 2).



Рисунок 2 – Спеціалізоване морське судно дедвейтом 60800 тонн

Особливістю експлуатації дизелів 16V32 фірми Wartsila-Sulzer у складі СЕУ зазначеного морського судна є великий експлуатаційний період роботи на часткових режимах – у діапазоні потужностей  $N_{\text{реж}}=(0,50\dots0,80)N_{\text{ном}}$ . Дані дизелі були обладнані системою рециркуляції газів низького тиску (LP-EGR), у якій гази після газової турбіни ГТН повертаються в продувний ресивер дизеля через охолоджувач наддувного повітря, а також системою перепуску випускних газів – EWG. Схема газоповітряної системи дизеля 16V32 фірми Wartsila-Sulzer з системами рециркуляції газів низького тиску та перепуску випускних газів наведена на рис. 3.

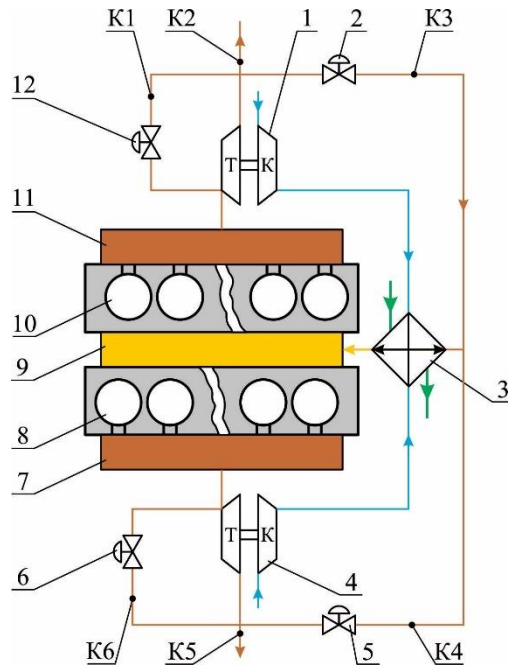


Рисунок 3 – Схема газоповітряної системи дизеля 16V32 фірми Wartsila-Sulzer:

- 1, 4 – ГТН; 2, 5 – керуючий клапан системи рециркуляції газів ; 3 – охолоджувач наддувного повітря; 6, 12 – керуючий клапан системи перепуску газів; 7, 11 – випускний колектор; 9, 10 – робочі циліндри; 9 – ресивер наддувного повітря; К1, К2, К3, К4, К5, К6 – точки контролю показників газоповітряної системи

V-подібна конструкція дизеля передбачає двостороннє розташування рядів циліндрів 8 та 10, продувне повітря до яких надходить із загального ресивера 9. Нагнітання повітря здійснюється компресорами ГТН 1 та 4, а його охолодження – у загальному охолоджувачі 3 до якого подавалася забортна вода. Випускні гази від циліндрів дизеля 8 та 10 надходять до випускних колекторів 7 і 11 та далі до газової турбіни ГТН 1 та 4 (відповідно). Рециркуляція випускних газів до циліндрів дизеля здійснюється за допомогою клапанів 2 та 5, керування якими здійснюється контролером. При цьому частина газів (до 25 %) може повертатися в ресивер наддувного повітря 9 через охолоджувач 3.

Суднові дизелі фірми Wartsila-Sulzer характеризуються високим ступенем наддуву (зі ступенем підвищення тиску повітря після ГТН – до 4,0...4,5), це забезпечує рівномірний розподіл залишкових газів та газів, що надходять на рециркуляцію, за об'ємом продувного ресивера і за робочими циліндрами. Під час проведення експерименту температура повітря, що надходить після охолоджувача 3 в продувний ресивер і далі в циліндри дизеля, підтримувалась в діапазоні 40...45° С з точністю  $\pm 1^\circ$  С за рахунок зміни кількості забортної води, що надходить до охолоджувача 3.

Газові потоки після ГТН 1 і 4 об'єднувались в одній газовипускній трубі з подальшим використанням енергії випускних газів в утилізаційному котлі. Це сприяло нівелюванню виникнення можливих відхилень в аеродинамічних опорах між окремими рядами циліндрів і сприяло однакової цикловій подачі палива на кожен ряд циліндрів.

Контроль витрати випускних газів, що прямували в випускну трубу, забезпечувався за допомогою газового витратоміру в точках К2 та К5. Контроль витрати випускних газів, що спрямовувались на рециркуляцію – в точках К3 та К4. Контроль витрати випускних газів, що спрямовувались на перепуск – в точках К1 та К6.

Система автоматичного регулювання і контролю, що встановлена на дизелі, дозволяла виконувати фіксацію всіх основних показників його, в тому числі ефективної потужності дизеля  $N_e$ , кВт.

Паливна апаратура високого тиску дозволяла з точністю до 0,5 % встановити циклову подачу палива  $b_{\text{цикл}}$ , кг/цикл, (однакову для кожного з циліндрів дизеля), що давало можливість за відомими залежностями [28-30] визначити питому ефективну витрату палива  $b_e$ , кг/(кВт·год).

Шляхом регулювання прохідного перетину клапана рециркуляції випускних газів (позиції 2 та 5 на рис. 3) забезпечувалася зміна ступеня рециркуляції системи EGR у діапазоні  $\delta_{\text{EGR}}=(0...21)$  %, який розраховувався за виразом

$$\delta_{\text{EGR}} = \frac{G_{\text{EGR}}}{G_{\Sigma}}$$

де  $G_{\text{EGR}}$  – витрата випускних газів, що прямують на рециркуляцію (визначалася в контрольних точках К3 та К4 для відповідних рядів циліндрів дизеля);

$G_{\Sigma}$  – загальна витрата випускних газів, що прямують в випускную трубу (визначалася в контрольних точках К2 та К5 за умовою відсутності потоків рециркуляції або перепуску газів).

Значення емісії  $\text{NO}_x$  у випускних газах контролювалося за допомогою газоаналізатора Testo350XL в випускній трубі на відстані більш ніж 10 м від ГТН, що відповідало вимогам Технічного кодексу з  $\text{NO}_x$ .

Результати вимірювань і розрахунків, що дозволили визначити величини емісії  $\text{NO}_x$  з випускними газами і питомої ефективної витрати палива  $b_e$ , наведені в таблицях 1 і 2.

Таблиця 1 – Емісія  $\text{NO}_x$ ,  $\text{гNO}_x/(\text{кВт}\cdot\text{год})$  суднового дизеля 16V32 фірми Wartsila-Sulzer при різних навантаженнях та ступені рециркуляції газів

Навантаження на дизель, %	Ступінь рециркуляції газів $\delta_{\text{EGR}}$ , %							
	0	3	6	9	12	15	18	21
50	8,28	7,78	7,17	6,72	6,52	6,08	5,86	5,81
60	8,58	8,18	7,53	6,98	6,83	6,43	6,13	6,04
70	8,74	8,41	7,84	7,49	7,21	6,62	6,31	6,24
80	8,92	8,67	8,28	7,66	7,44	6,82	6,56	6,40

Таблиця 2 – Питомі ефективна витрата палива  $b_e$ ,  $\text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$  суднового дизеля 16V32 фірми Wartsila-Sulzer при різних навантаженнях та ступені рециркуляції газів

Навантаження на дизель, %	Ступінь рециркуляції газів $\delta_{\text{EGR}}$ , %							
	0	3	6	9	12	15	18	21
50	195	197,5	200	202	205	208	213	219
60	191	193	195	197	200	203	207	212
70	187	188,5	190	192	194	196	199	203
80	184	185	186	187	188	189	192	196

За результатами експериментів, наведених у таблицях 1, 2, побудовані залежності емісії оксидів азоту  $\text{NO}_x=f(\delta_{\text{EGR}})$  і питомої ефективної витрати палива  $b_e=f(\delta_{\text{EGR}})$ , що показані на рис. 4, 5.

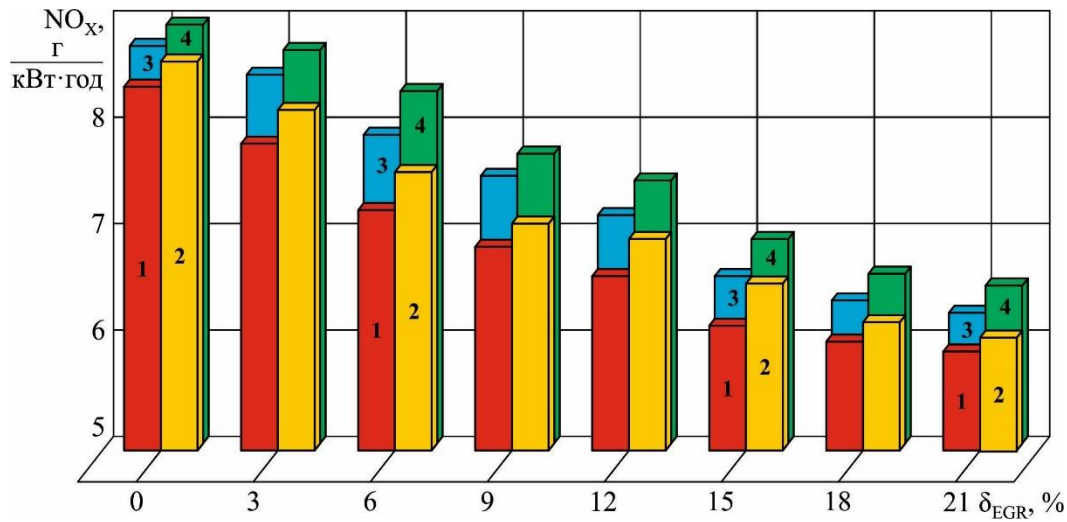


Рисунок – 4. Вплив ступеня рециркуляції випускних газів  $\delta_{EGR}$  на емісію  $NO_x$  під час різних навантажень суднового дизеля 16V32 фірми Wartsila-Sulzer:  
 1 –  $0,5N_{ном}$ ; 2 –  $0,6N_{ном}$ ; 3 –  $0,7N_{ном}$ ; 4 –  $0,8N_{ном}$

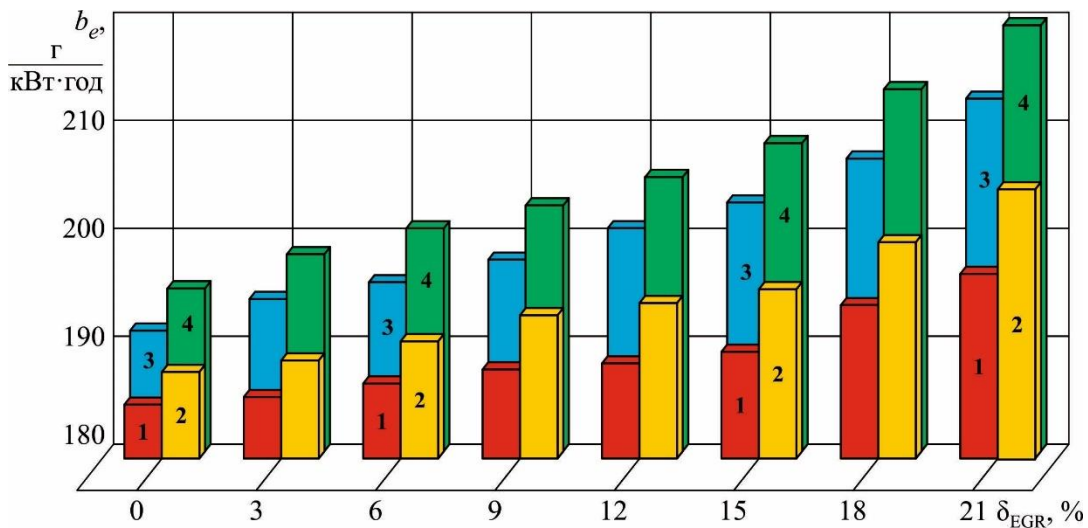


Рисунок 5 – Вплив ступеня рециркуляції випускних газів  $\delta_{EGR}$  на питому ефективну витрату палива  $b_e$  під час різних навантажень суднового дизеля 16V32 Wartsila-Sulzer:  
 1 –  $0,5N_{ном}$ ; 2 –  $0,6N_{ном}$ ; 3 –  $0,7N_{ном}$ ; 4 –  $0,8N_{ном}$

Ефективність використання системи EGR щодо зменшення викидів оксиду азоту з випускними газами на різних режимах її експлуатації (тобто під час різного ступеня рециркуляції випускних газів  $\delta_{EGR}$ ) оцінювалась за виразом

$$\Delta NO_x = \frac{NO_x^0 - NO_x^{EGR}}{NO_x^0} \cdot 100\%,$$

де  $\Delta NO_x$  – відносне зменшення емісії оксидів азоту, %

$NO_x^0, NO_x^{EGR}$  – відповідно, концентрація оксидів азоту у випускних газах без використання та під час використання системи EGR з різним значенням ступеня рециркуляції випускних газів  $\delta_{EGR}$ , кг/(кВт·год).

Величина  $\Delta NO_x$  також характеризує екологічність роботи суден морського транспорту на різних експлуатаційних режимах. Її збільшення свідчить про зниження емісії оксидів азоту та про покращення екологічності роботи судна.

Зниження економічності роботи ДВЗ під час використання системи EGR оцінювалось через відносне збільшення питомої ефективної витрати палива, яке визначалося за виразом

$$\Delta b_e = \frac{b_e^0 - b_e^{EGR}}{b_e^0} \cdot 100\%,$$

де  $\Delta b_e$  – відносне збільшення питомої витрати палива на відповідному режимі роботи дизеля та під час відповідного ступеню рециркуляції випускних газів  $\delta_{EGR}$ , %;

$b_e^0$ ,  $b_e^{EGR}$  – відповідно, питома ефективна витрата палива без використання та під час використання системи EGR з різним значенням ступеню рециркуляції випускних газів  $\delta_{EGR}$ , кг/(кВт·год) [31-33].

Значення  $\Delta NO_x$  і  $\Delta b_e$  для різних  $\delta_{EGR}$  на різних навантаженнях суднового дизеля 16V32 фірми Wartsila-Sulzer наведено в таблицях 3 та 4.

Таблиця 3 – Екологічна ефективність суднового дизеля 16V32 фірми Wartsila-Sulzer під час використання системи EGR

Навантаження на дизель, %	Ступінь рециркуляції газів $\delta_{EGR}$ , %						
	3	6	9	12	15	18	21
50	6,04	13,41	18,84	21,26	26,57	29,23	29,83
60	4,66	12,24	18,65	20,40	25,06	28,55	29,60
70	3,78	10,30	14,30	17,51	24,26	27,80	28,60
80	2,80	7,175	14,13	16,59	23,54	26,46	28,25

Таблиця 4 – Паливна економічність суднового дизеля 16V32 фірми Wartsila-Sulzer під час використання системи EGR

Навантаження на дизель, %	Ступінь рециркуляції газів $\delta_{EGR}$ , %						
	3	6	9	12	15	18	21
50	1,30	2,56	3,59	5,13	6,67	9,23	12,30
60	1,00	2,09	3,14	4,71	6,28	8,38	11,00
70	0,80	1,60	2,67	3,74	4,81	6,42	8,56
80	0,50	1,09	1,63	2,17	2,72	4,35	6,52

За результатами таблиць 3, 4 побудовані діаграми, що відображають зміну екологічності та економічності роботи суднового дизеля 16V32 фірми Wartsila-Sulzer під час використання системи EGR з різним ступенем рециркуляції – рис. 6, 7.

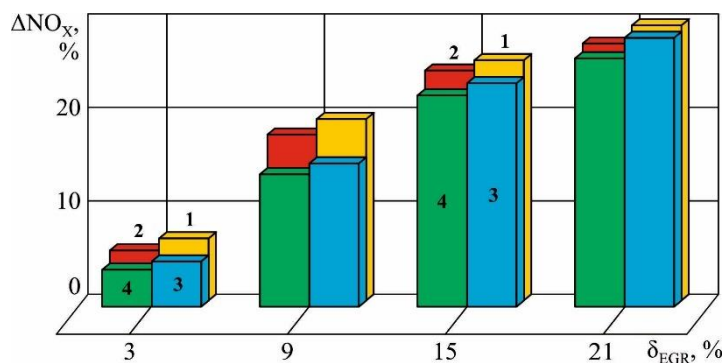


Рисунок 6 – Зміна екологічності роботи суднового дизеля 16V32 фірми Wartsila-Sulzer

під час використання системи EGR з різним ступенем рециркуляції:

1 –  $\delta_{EGR}=21\%$ ; 2 –  $\delta_{EGR}=15\%$ ; 3 –  $\delta_{EGR}=9\%$ ; 4 –  $\delta_{EGR}=3\%$

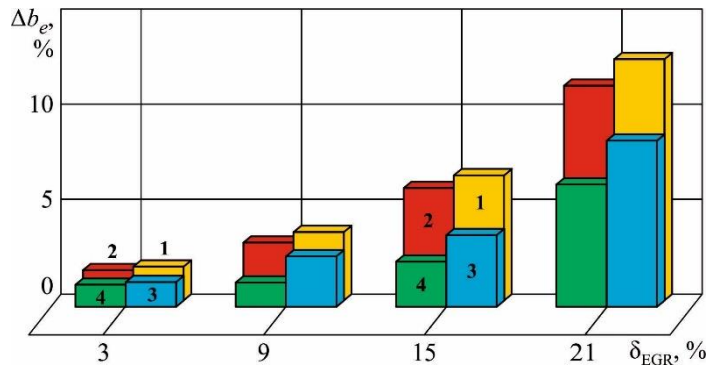


Рисунок 6 – Зміна економічності роботи суднового дизеля 16V32 фірми Wartsila-Sulzer під час використання системи EGR з різним ступенем рециркуляції:

1 –  $\delta_{EGR}=21\%$ ; 2 –  $\delta_{EGR}=15\%$ ; 3 –  $\delta_{EGR}=9\%$ ; 4 –  $\delta_{EGR}=3\%$

**Висновки.** Експлуатація суден морського транспорту нерозривно пов’язана з забезпеченням екологічних показників роботи суднових дизелів, зокрема щодо викидів оксидів азоту. Одним із способів, що спрямовані на зниження емісії оксидів азоту, є управління випускними газами суднових дизелів, які поділяється на системи рециркуляції високого та низького тиску, а також системи перепуску. Експериментальні дослідження, що виконувались на судновому дизелі 16V32 фірми Wartsila-Sulzer, система рециркуляції якого дозволяла варіювати ступінь рециркуляції випускних газів у діапазоні 0...21 %, визначили наступне:

- підвищення ступеню рециркуляції випускних газів (тобто збільшення кількості випускних газів, що повертаються до циліндрів дизеля після газового турбонагнітача) сприяє підвищенню екологічності роботи суднових дизелів, що виражається в зниженні емісії оксидів азоту – для передбаченого конструкцією дизеля діапазону ступеню рециркуляції 0...21 % концентрація оксидів азоту в випускних газах змінюється в діапазоні 8,28...5,81 г/(кВт·год) – для навантаження 50 % від номінального, 8,58...6,04 г/(кВт·год) – для навантаження 60 % від номінального, 8,73...6,24 г/(кВт·год) – для навантаження 70 % від номінального, 8,92...6,40 г/(кВт·год) – для навантаження 80 % від номінального;

- у відносному відношенні зміна цих показників складає 6,04...29,83 % – для навантаження 50 %, 4,66...29,60 % – для навантаження 60 %, 3,78...28,60 % – для навантаження 70 %, 2,80...28,25 % – для навантаження 80 % від номінального;

- з підвищенням ступеню рециркуляції випускних газів погіршується економічність роботи суднових дизелів, що виражається в збільшенні питомої витрати палива – під час зміни ступеню рециркуляції випускних газів в діапазоні 0...21 % питома витрата палива змінюється в діапазоні 195...219 г/(кВт·год) – для навантаження 50 % від номінального, 191...212 г/(кВт·год) – для навантаження 60 % від номінального, 187...203 г/(кВт·год) – для навантаження 70 % від номінального, 184...196 г/(кВт·год) – для навантаження 80 % від номінального;

- у відносному відношенні зміна цих показників складає 1,30...12,30 % – для навантаження 50 %, 1,00...11,00 % – для навантаження 60 %, 0,80...8,56 % – для навантаження 70 %, 0,50...6,52 % – для навантаження 80 % від номінального;

- визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами суднових дизелів необхідно виконувати з врахуванням як екологічного (зниження емісії оксидів азоту) також й економічного (збільшення питомої витрати палива) критеріїв; з погляду на це, як оптимальні режими управління випускними газами запропоновані такі, що відповідають 12...15 % ступеню рециркуляції випускних газів, які забезпечують зниження емісії оксидів азоту в діапазоні 16,6...26,6 % (що відноситься до одних з найбільших показників) при цьому

підвищення питомої витрати палива знаходиться в діапазоні 2,17...4,81 % (для навантаження 70.80 % від номінального – найбільш розповсюдженого зі всіх експлуатаційних режимів дизеля) та 4,71...6,67 % (для навантаження 50.60 % від номінального).

## ЛІТЕРАТУРА

1. Дакі 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.
2. 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.
3. Burmaka I., Vorokhobin I., Melnyk O., Burmaka O., Sagin S. Method of Prompt Evasive Manuever Selection to Alter Ship's Course or Speed // Transactions on Maritime Science. – 2022. – Vol. 11(1). – P. 1-9. https://doi.org/10.7225/toms.v11.n01.w01.
4. Тимошук О.М., Боріна М.В. Дослідження методів підвищення екологічності судових енергетичних установок у водному середовищі // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
5. Головань А.І. Концептуальна модель планування та оптимізації графіків технічного обслуговування вантажних суден. // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 107-115. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.12.
6. Тимошук О.М., Дакі О.А., Бойко О.А., Карадобрій Т.А. Аналітичний огляд адаптивних систем керування судном та шляхи їх побудови // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2020. – Вип. 3(31). – С. 120-125. https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13.
7. Тимошук О.М., Мельник О.В. Аналіз можливості використання маневру розходження зміною курсу // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 96-102. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.10.
8. Гончарук І.П., Никифоров Ю.О., Кошарська Л.В., Головань А.І. Особливості впливу відновлюваної енергетики на ефективність і екологічність морського транспорту. // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 2(38). – С. 73-80. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.08.
9. 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.
10. 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. 89-101.
11. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Оценка эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих жидкостей судовых технических средств // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2016. – Вып. 22. – С. 66-74.
12. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991.
13. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskiy Y., Pí'st'ek V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // Renewable Energy. – 2024. – Vol. 224. – P. 120221. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221.
13. Дакі О.А., Якусевич Ю.Г., Тришин В.В., Дороф'єєва З.Я. Розроблення пропозицій щодо декомпозиції судової холодильної установки та математичної моделі компресора. // Водний

- транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 194-200. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.22.
14. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10(9), 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.
15. 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.
16. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. 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.
17. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // *Nase More : International Journal of Maritime Science & Technology.* – 2022.– Vol.69. – Iss.1. – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.
18. Куропятник А. А., Сагін С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник, 2018. – Вып. 24. – С. 72-80.
19. 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.
20. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // *Applied Ocean Research*, 2023. – Vol. 140. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
21. Vorokhobin I. Determination of the Law of Probability Distribution of Navigation Measurements / I. Vorokhobin, A. Golikov, O. Haichenia, V. Sikirin, V. Severin / Kaunas, Lithuania, 2020. – P. 707-710.
22. Дакі О.А., Якусевич Ю.Г., Колесник В.В., Тришин В.В. Методика обґрунтування моделі для аналізу роботи двоступінчастої суднової холодильної установки в нестационарних режимах. // Водний транспорт – 2023. – Вип. 1(37). – С. 188-193. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.21.
23. Сагін С.В., Заблоцкий 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.
24. Богом'я В.І. Метод розпізнавання підводних об'єктів за допомогою багатопроменевого сонара для забезпечення безпеки безпілотного підводного апарату. // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 2(38). – С. 96-102. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.10.
25. Дакі О.А., Якусевич Ю.Г., Ліганенко В.В., Тришин В.В. Модель системи кондиціонування та охолодження повітря на сучасних нафтоналивних судах і газовозах. // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 1(35). – С. 121-127. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.15.
26. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10(10), 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.
27. Поповський А.Ю., Сагін С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2014. – Вып. 20. – С. 74-83.
28. 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.
29. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – С. 132-142.

30. 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.
31. Сагин С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури судових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – С. 132-142.
32. Рибальченко М.Є., Білоусов Є.В. Використання числових профілів робочого процесу для аналізу ефективності роботи судового малооборотного 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.
33. 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>.

## REFERENCES

1. 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.
2. 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.
3. Burmaka I., Vorokhobin I., Melnyk O., Burmaka O., Sagin S. Method of Prompt Evasive Manuever Selection to Alter Ship's Course or Speed // Transactions on Maritime Science. – 2022. – Vol. 11(1). – P. 1-9. <https://doi.org/10.7225/toms.v11.n01.w01>.
4. Tymoshchuk O., Borina M. Research of methods of enhancing the environmental facility of ship power plants in the aquatic environment // Water transport. – 2022. – № 2(36). – P. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
5. Golovan A.I. Conceptual model of planning and optimization of cargo vessel maintenance schedules. // Water transport. – 2023. – № 1(37). – P. 107-115. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.12.
6. Honcharuk I.P., Nykyforov Yu.O., Kosharska L.B., Golovan A.I. Features of the influence of renewable energy on the efficiency and environmental safety of maritime transport. // Water transport. – 2023. – № 2(38). – P. 73-80. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.08.
7. Tymoshchuk O., Daki O., Boyko O., Karadobriy T. Analytical Inspection of adaptive vessel control systems and ways of their construction // Water Transport: Collection of scientific works. – 2020. – № 3(31). – P. 120-125. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13.
8. Sagin S.S., Sagin S.V., Use of artificial intelligence in the situations of excessive vessel // Water transport. – 2024. – № 1(39). – P. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
9. 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>.
10. 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. – Vol. 4(57). – P. 109-120.
11. 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. – Vol. 1(58). – P. 89-100.
12. 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.

13. Daki O.A., Yakusevych Yu.H., Tryshyn V.V., Dorofieieva Z.Ia. Development of proposals for the decomposition of the ship refrigeration unit and the compressor mathematical model. // *Water transport*. – 2023. – № 1(37). – P. 194-200. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.22.
14. 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 // *J. Mar. Sci. Eng.* – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331.
15. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Píštěk V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // *Renewable Energy*. – 2024. – Vol. 224. – P. 120221. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221.
16. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Ship power plants*. – 2022. – Vol. 45. – P. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
17. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // *Nase More : International Journal of Maritime Science & Technology*. – 2022.– Vol. 69. – Iss.1. – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.
18. Kuropyatnyk O.O., Sagin S.V. Controlling the exhaust gases of marine diesel engines to ensure environmental performance // *Automation of ship technical facilities*. –2018. – № 24. – P. 72-80.
19. 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). – C. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
20. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Píštěk V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // *Applied Ocean Research*, 2023. – Vol. 140. 103745. https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745.
21. Vorokhobin I. Determination of the Law of Probability Distribution of Navigation Measurements / I. Vorokhobin, A. Golikov, O. Haichenia, V. Sikirin, V. Severin / Kaunas, Lithuania, 2020. – P. 707-710.
22. Daki O.A., Yakusevych Yu.H., Kolesnyk V.V., Tryshyn V.V. Methodology of model substantiation for analysis of operation of a two-stage ship refrigeration unit in non-stationary modes. // *Water transport*. – 2023. – № 1(37). – P. 188-193. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.21.
23. Sagin S., Madey V., Sagin,A., Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // *J. Mar. Sci. Eng.* –2022. – Vol. 10(10). – P. 1373. https://doi.org/10.3390/jmse10101373.
24. Bohomia V.I. A method for recognizing underwater objects using multibeam sonar to ensure the safety of an unmanned underwater vehicle. // *Water transport*. – 2023. – № 2(38). – P. 96-102. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.10.
25. Daki O.A., Yakusevych Yu.H., Lihanenko V.V., Tryshyn V.V. Model of air conditioning and cooling system on modern oil-filling ships and gas carriers. // *Water transport*. – 2022. – № 1(35). – P. 121-127. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.15.
26. Tymoshchuk O., Melnyk O. Analysis of the possibility of using the divergence maneuver by changing the course // *Water Transport: Collection of scientific works*. – 2023 – № 1(37). – P.96-102. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.10.
27. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // *Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments”* (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991.
28. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // *Automation of ship facilities*. – 2014. – №20. – P. 74-83.
29. Sagin S.V. Reduction of energy losses in precision steam fuel equipment of marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2018. – Vol. 38. – P. 132-142.

30. Matskevych D.V., Sagin S.V., Hanmamedov S.A. Changes in the rheological characteristics of lubricants in the circulating oil system during operation of a medium-speed engine // Ship power plants. – 2010. – Vol. 25. – P. 109-118.
31. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Evaluation of operational properties of lubricating and cooling liquids of marine technical equipment // Automation of ship technical facilities. – 2016. – Vol. 22. – P. 66-74.
32. Rybalchenko M.E., Bilousov E.V. Use of numerical profiles of the working process for the analysis of the efficiency of work of a ship's low-speed engine under the conditions of the current tendencies to reduce the operating speed of vessels. // Water transport. – 2022. – № 2(36). – P. 1-13. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.06.
33. 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>.

*Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A.*

### **DETERMINATION OF THE OPTIMAL MODES OF THE EXHAUST GASES MANAGEMENT PROCESSES OF MARINE DIESELS**

Determination of optimal modes of exhaust gas management processes of marine diesel engines. The exhaust gas recirculation system of a marine diesel engine, the use of which ensures a decrease in the concentration of nitrogen oxides in the exhaust gases, is considered. Features of high- and low-pressure exhaust gas recirculation systems, as well as the exhaust gas bypass system, are highlighted. The purpose of the research was to determine the optimal modes of operation of ship exhaust gas management systems. At the same time, the combination of two factors was taken as optimality criteria - the maximum reduction of nitrogen oxide emissions (as one of the main sources of environmental pollution) and the minimum increase in specific fuel consumption (as the main economic indicator of the operation of marine diesel engines). Experimental studies carried out on the Wartsila-Sulzer marine diesel engine 16V32, the recirculation system of which made it possible to vary the degree of exhaust gas recirculation in the range of 0...21 %, determined that: increasing the degree of exhaust gas recirculation contributes to increasing the environmental friendliness of marine diesel engines, which is expressed in reduction of emissions of nitrogen oxides up to 28.25...29.83 % compared to the operation of a diesel engine without the use of a gas recirculation system; with an increase in the degree of exhaust gas recirculation, the efficiency of the operation of marine diesel engines deteriorates, which is expressed in an increase in specific fuel consumption, while in some operating modes and a certain degree of bypass, the increase in specific fuel consumption reaches 11.00...12.30 % compared to the operation of a diesel engine without using gas recirculation systems. As the optimal proposed modes of operation of the exhaust gas recirculation system corresponding to 12...15 % degree of exhaust gas recirculation, which ensure a reduction in nitrogen oxide emissions in the range of 16.6...26.6 %, while the increase in specific fuel consumption is in the range of 2.17...4.81 %.

**Key words:** bypass of exhaust gases, efficiency of diesel operation, emission of nitrogen oxides, environmental friendliness of diesel operation, marine diesel, marine transport, recirculation of exhaust gases, specific fuel consumption.