

Sagin S.V., Rusnak D.Y.**IMPROVEMENT OF THE PROCESS OF PREPARATION OF PETROLEUM FUELS FOR MEDIUM-SPEED MARINE DIESEL ENGINES**

The issue of improving the process of preparing fuels of petroleum origin for medium-speed marine diesel engines is considered. It was determined that the use of liquid fuels of petroleum origin with increased density in medium-speed marine diesel engines requires its additional processing. One of the common methods of additional processing of fuel is the addition of special fuel additives to its volume. At the same time, manufacturers that ensure their supply to ships of sea and inland waterway transport do not determine the optimal concentration of additives in the volume of fuel, indicating only the possible range of this concentration. This leads to unnecessary consumption of fuel additives (the cost of which is up to three orders of magnitude higher than the cost of fuel), and can also cause an increase in the thermal intensity of the diesel engine and a deterioration in its environmental characteristics. The purpose of the study was to determine the impact of chemical fuel treatment on the main operational indicators of marine diesel engines, which characterize its economic, environmental and thermal intensity. The specific effective fuel consumption, nitrogen oxide emissions with exhaust gases and average exhaust gas temperature were taken as indicators. Studies carried out in the fuel systems of four identical 6L32F diesel engines manufactured by Wartsila yielded experimental results confirming the reduction in specific effective fuel consumption when using fuel additives. For different concentrations of the additive in the base fuel, a different amount of reduction in specific effective fuel consumption is observed, which is 1.8...4.7 %. Also, for different concentrations of the fuel additive in the volume of fuel injected into the diesel cylinder, an improvement in the environmental friendliness of the diesel engine was determined, which is reflected in a 13.2...14.5 % reduction in nitrogen oxide emissions with exhaust gases and a decrease in temperature stress, as evidenced by a 10...14 °C decrease in the average exhaust gas temperature in the diesel cylinders.

Keywords: chemical treatment of fuel, environmental friendliness of diesel operation, diesel efficiency, fuel additives, nitrogen oxide emissions, marine medium-speed diesel, maritime transport, petroleum fuel, specific fuel consumption, thermal stress.

УДК 629.5

doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.14**Куропятник О.А.****ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ ВИСОКОГО ТИСКУ**

Розглянута питання щодо забезпечення екологічних показників суднових дизелів шляхом використання систем рециркуляції випускних газів високого тиску. Проаналізовано механізм утворення оксидів азоту під час згоряння в суднових дизелях нафтових палив. Виконано стислий аналіз основних способів, що сприяють зниженню емісії оксидів азоту з випускними газами суднових дизелів. Висвітлені особливості систем рециркуляції випускних газів високого тиску, що встановлюються на суднових малообертових дизелях високої потужності. Наведені результати досліджень, що виконувались на судовому малообертовому дизелі 6UEC68-TierII фірми Mitsubishi, обладнаного системою рециркуляції випускних газів високого тиску. Завданням дослідження було визначення впливу системи рециркуляції випускних газів високого тиску на екологічні, енергетичні та економічні показники роботи судового малообертового дизеля. Експериментально встановлено, що зміна ступеня рециркуляції випускних газів у діапазоні

5...20 % забезпечує зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах відповідно на 6,8...27,3 % залежно від частоти обертання та навантаження дизеля. Також виявлено, що використання системи рециркуляції випускних газів високого тиску призводить до зниження енергетичних та економічних показників роботи суднових дизелів. Експериментально встановлено що при цьому питома ефективна витрата палива, що характеризує економічність роботи дизеля, підвищується пропорційно зростанню ступеня рециркуляції випускних газів і для різних швидкісних режимів роботи дизеля у відсотковому співвідношенні становить 0,85...4,34 %. Ефективна потужність дизеля, що характеризує його енергетичні показники, знижується на 1,2...3,43 % з підвищенням ступеня рециркуляції випускних газів. Незважаючи на погіршення економічних та енергетичних показників дизеля, застосування способу рециркуляції випускних газів високого тиску на судах морського та внутрішнього водного транспорту має широкі перспективи, тому що його використання забезпечує виконання міжнародних вимог щодо захисту навколишнього повітряного середовища від забруднення та сприяє підтримці екологічної безпеки суден та їх енергетичних установок.

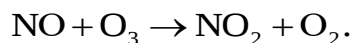
Ключові слова: екологічна безпека, екологічність роботи дизеля, економічність роботи дизеля, емісія оксидів азоту, морський транспорт, рециркуляція випускних газів, питома витрата палива, потужність дизеля, судновий дизель.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Суднові двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ), які використовуються на всіх без винятку судах морського та внутрішнього водного транспорту, виконуючи при цьому функції як головних, так і допоміжних двигунів, є джерелами підвищеного забруднення водного та повітряного середовища [1-3]. Шляхом використання спеціальних технологій та обладнання з очищення вод, що містять нафту, а в деяких випадках за рахунок повної відмови від скидання цих вод, можливо мінімізувати або повністю уникнути забруднення водного середовища [4-6]. Забезпечити роботу суднових ДВЗ без забруднення повітряного середовища неможливо, оскільки їхній робочий цикл неминуче включає до свого складу процес випуску відпрацьованих газів [7-9].

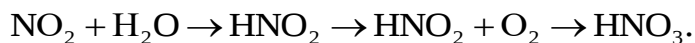
Під час використання вуглеводневих палив нафтового походження, яке під час згоряння є джерелом теплової енергії, та атмосферного повітря, як окислювача під реакцій займання та згоряння палива, в циліндрі суднових ДВЗ утворюються випускні гази (ВГ), які складаються на 99,2 % з нетоксичних компонентів – продуктів неповного згоряння (більшою частиною яких є діоксид вуглецю CO_2 і водяна пара H_2O) і повітря зі зниженим вмістом кисню. Усі токсичні компоненти, що утворюються в суднових дизелях, можна поділити на дві групи. До першої групи відносяться продукти неповного згоряння палива – це 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 . Суднові ДВЗ, що знаходяться в експлуатації, вимагають постійного пошуку ефективних способів зниження токсичності ВГ, насамперед викидів оксидів азоту NO_x . Вміст оксидів азоту в ВГ регламентується вимогами Annex VI Міжнародної конвенції MARPOL та залежить від року побудови судна та частоти обертання валу дизеля [10-12].

Оксиди азоту є єдиними з забруднювальних речовин, які не можуть бути видалені шляхом зміни сорту палива (як це можливо для зниження викидів SO_x), оскільки найчастіше вони утворюються за умовою з'єднання азоту (що обов'язково знаходиться у складі рідкого палива) з киснем (що обов'язково знаходиться у складі повітря у циліндрі дизеля).

Серед комплексу оксидів NO_x саме NO є тими речовинами, які переважають у середині циліндра дизеля (його вміст в загальному обсязі NO_x досягає $\approx 90...95\%$), тоді як багато NO_2 утворюється лише під час контакту з низькими температурами, тобто у разі потрапляння випускних газів в атмосферу. Утворення NO_2 відбувається за умовою з'єднання NO з озоном, що знаходиться у повітрі. В результаті чого одноокис азоту NO перетворюється на двоокис NO_2 і кисень O_2 відповідно до реакції:



Після чого NO_2 з'єднуються з водяною парою H_2O (яка також обов'язково утворюється з повітря), що призводить до утворення азотистої кислоти HNO_2 і далі азотної кислоти HNO_3 відповідно до реакцій:



Саме азотна кислота HNO_3 , яка згодом конденсується в повітрі та повертається на поверхню світового океану або острівну та материкову частину Землі у вигляді кислотних дощів, є тією сполукою, яка завдає екологічної шкоди довкіллю та на боротьбу з якою спрямовані всі конструктивні та технологічні рішення щодо зниження вмісту NO_x у ВГ [13-15].

Також необхідно зазначити, що окиси азоту, що потрапляють в атмосферу з випускними газами суднових дизелів, поряд з аерозолями та хлорорганічними сполуками, які потрапляють в атмосферу від інших суднових механізмів та суднового обладнання, руйнують озоновий шар, який знаходиться на висоті 25 км і поглинає 99 % сонячних та ультрафіолетових променів [16-18].

Вказане підкреслює актуальність проведення досліджень, спрямованих на зниження негативного впливу оксидів азоту на довкілля та людину.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зниження концентрації оксидів азоту в ВГ суднових ДВЗ до необхідних величин і підтримання цього параметра в необхідних межах можливе за двома важливими напрямками:

- використання технологічних рішень, спрямованих на зміну експлуатаційних властивостей палива, конструкції паливної апаратури, характеристик процесу паливоподачі, характеру перебігу робочого процесу, що передують моменту утворення NO_x у циліндрі дизеля [19, 20];
- безпосередній вплив на ВГ (їх очищення, хімічна обробка, рециркуляція) протягом часу, коли вони перебувають у газувипускній системі дизеля [21, 22].

Зниження емісії NO_x шляхом хімічної обробки палива було досліджено в роботах [23-25], при цьому її основним завданням було визначення оптимальної концентрації реагентів, що вводяться в паливо, з метою інтенсифікації процесу його згоряння.

Забезпечення екологічних параметрів роботи суднових ДВЗ за рахунок модернізації побудови та комплектації паливної системи розглядалося у дослідженнях [26-28], проте для реалізації отриманих у них результатів потрібне додаткове обладнання, що тягне за собою за собою підвищені витрати енергії.

Моделювання процесів утворення оксидів азоту виконувалося в роботах [29-31], дослідження [32-34] присвячені пошуку оптимального ступеня рециркуляції випускних газів для систем низького тиску. Існує й інша схема рециркуляції випускних газів – система високого тиску, у якій гази повертаються в циліндр одразу після випускного колектора. У цьому випадку (у зв'язку з їх меншим питомим об'ємом) суттєво зменшуються габарити системи рециркуляції та відпадає необхідність в установці додаткового нагнітача високої потужності, який (як це забезпечується в системі рециркуляції низького тиску) забезпечує повернення газів в продувний колектор і до циліндрів дизеля.

Формулювання цілей статті. В останнє десятиліття як один із способів забезпечення екологічності суднових дизелів щодо емісії оксидів азоту використовуються системи рециркуляції випускних газів високого тиску. Розробка даних систем та їх встановлення виконуються для новопроектованих суден. Широкого досвіду технічної експлуатації цих систем в даний час не існує, а рекомендації щодо їх використання в основному базуються на теоретичних розрахунках і моделюванні процесів, що відбуваються при цьому. Враховуючи викладене, завданням дослідження було визначення впливу системи рециркуляції випускних газів високого тиску на екологічні, енергетичні та економічні показники роботи суднового малооборотного дизеля 6UEC68-TierII фірми Mitsubishi, обладнаного системою рециркуляції випускних газів (Exhaust gas recirculation – EGR) високого тиску.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження на судні вантажопідйомністю 54860 м³, призначеному для перевезення зріджених нафтових газів. Головний двигун 6UEC68-TierII фірми Mitsubishi, що був встановлено на судні, характеризувався наступними основними показниками: діаметр циліндра – 680 мм; хід поршня – 2690 мм; кількість циліндрів – 6; номінальна потужність – 15240 кВт; частота обертання, що відповідає номінальній потужності – 84 об/хв. Принципова схема суднового дизеля 6UEC68-TierII фірми Mitsubishi із системою рециркуляції випускних газів високого тиску, на якому виконувались дослідження, показано на рис. 1.

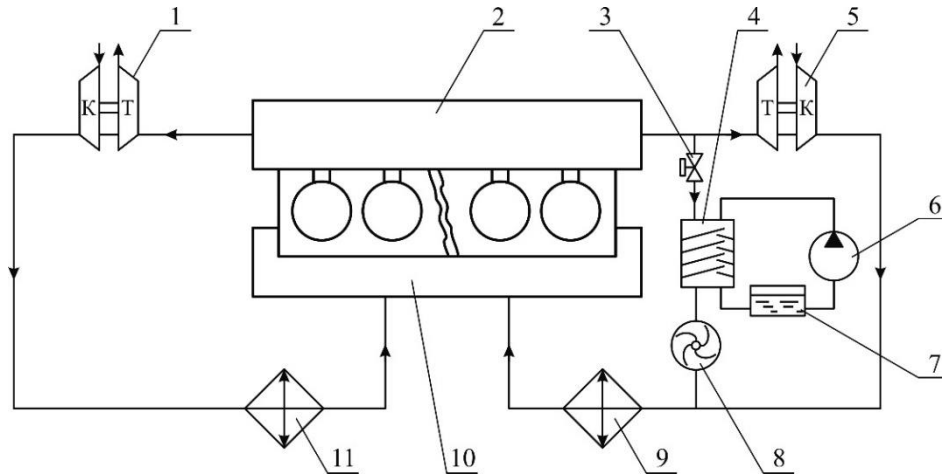


Рисунок 1 – Принципова схема системи рециркуляції випускних газів високого тиску суднового малооборотового дизеля 6UEC68-TierII фірми Mitsubishi:

1, 5 – газотурбонагнітач; 2 – випускний колектор; 3 – керуючий клапан системи рециркуляції випускних газів високого тиску; 4 – скрубер; 6 – насос подачі прісної води в систему очищення та охолодження випускних газів; 7 – цистерна прісної води системи очищення та охолодження випускних газів; 8 – допоміжний газовий нагнітач із електричним приводом; 9, 11 – охолоджувач наддувного повітря; 10 – продувний ресивер Т, К – газова турбіна та повітряний компресор газотурбонагнітачів

Система працює в такий спосіб. Випускні гази з циліндрів дизеля надходять у загальний випускний колектор 2 і далі до газотурбонагнітачів 1 і 5, після чого через газотурбонагнітальну трубу видаляються в атмосферу. Газотурбонагнітачі 1 і 5 забирають повітря з машинного відділення та після стиснення спрямовують його через охолоджувачі 9 і 11 в повітряний (продувний) ресивер 10. При цьому газотурбонагнітач 5 обладнаний системою рециркуляції випускних газів високого тиску, до складу якої входять керуючий клапан 3, скрубер очищення газів 4, цистерна 7 прісної води системи очищення та охолодження випускних газів та насос 6 подачі прісної води в систему очищення та охолодження випускних газів [35, 36].

Під час експлуатації системи рециркуляції випускних газів високого тиску їх кількість, що повертається через систему очищення до продувного ресиверу та циліндрів дизеля, регулюється клапаном 3. Випускні гази очищуються і попередньо охолоджуються в скрубєрі 4, після чого додатковим нагнітачем 8 подаються на змішування з повітрям (що надходить з повітряного компресору газотурбонагнітальника 5) і далі прямують до продувного ресиверу 10.

Під час експериментальних досліджень, проведених на судні, вимірювалися значення концентрації NO_x у випускних газах, питомої ефективної витрати палива та ефективної потужності дизеля N_e для різного ступеня рециркуляції випускних газів.

Концентрація NO_x, а також інших складових випускних газів, визначалася з допомогою газоаналізатора Testo350XL, який дозволяє визначати концентрації наступних речовин: CO, O₂, N₂, NO_x, CH₄, SO₂, H₂S, а також температуру, вологість, швидкість та диференціальний тиск вимірюваного середовища.

Ступінь рециркуляції газів під час експериментів змінювалася в наступних значеннях: EGR=5 %, EGR=10 %, EGR=15 %, EGR=20 % і розраховувалася за виразом

$$\text{EGR} = \frac{\alpha_{\text{EGR}}}{\alpha},$$

де α – значення коефіцієнта надлишку повітря без використання системи EGR;

α_{EGR} – коефіцієнт надлишку повітря під час використання системи EGR.

Для визначення ступеня EGR коефіцієнти надлишку повітря α та α_{EGR} визначалися з урахуванням об'ємних концентрацій кисню та азоту у випускних газах за умовою роботи дизеля без системи EGR – $O_{2, \text{Gas}}$, $N_{2, \text{Gas}}$ та з системою EGR – $O_{2, \text{Gas}}^{\text{EGR}}$, $N_{2, \text{Gas}}^{\text{EGR}}$

$$\alpha = \frac{1}{1 - 3,76 \frac{O_{2, \text{Gas}}}{N_{2, \text{Gas}}}}, \quad \alpha_{\text{EGR}} = \frac{1}{1 - 3,76 \frac{O_{2, \text{Gas}}^{\text{EGR}}}{N_{2, \text{Gas}}^{\text{EGR}}}}.$$

Експерименти виконувались для наступних швидкісних режимів роботи дизеля: 55, 65, 75 та 80 об/хв, що відповідало значенням відносної потужності дизеля: $0,33N_{\text{еном}}$, $0,55N_{\text{еном}}$, $0,77N_{\text{еном}}$ та $0,95N_{\text{еном}}$. Як $N_{\text{еном}}$ приймалася номінальна потужність, що відповідає своєму значенню коефіцієнта надлишку повітря α .

Для визначення потужності дизеля здійснювалося його індиціювання за допомогою суднової системи діагностики Doctor [37, 38]. Крім того, для кожного режиму роботи дизеля за допомогою суднових вимірювальних засобів визначалася годинна витрата палива [39-41].

Результати, що відображають зміну питомої ефективної витрати палива b_e , концентрації оксидів азоту NO_x у випускних газах та відносного зниження ефективної потужності $\frac{N_{e\text{EGR}}}{N_e} \cdot 100$,

суднового дизеля 6UEC68-TierII фірми Mitsubishi в залежності від частоти обертання колінчастого валу n , та ступеня рециркуляції випускних газів EGR показані на рис.2-4.

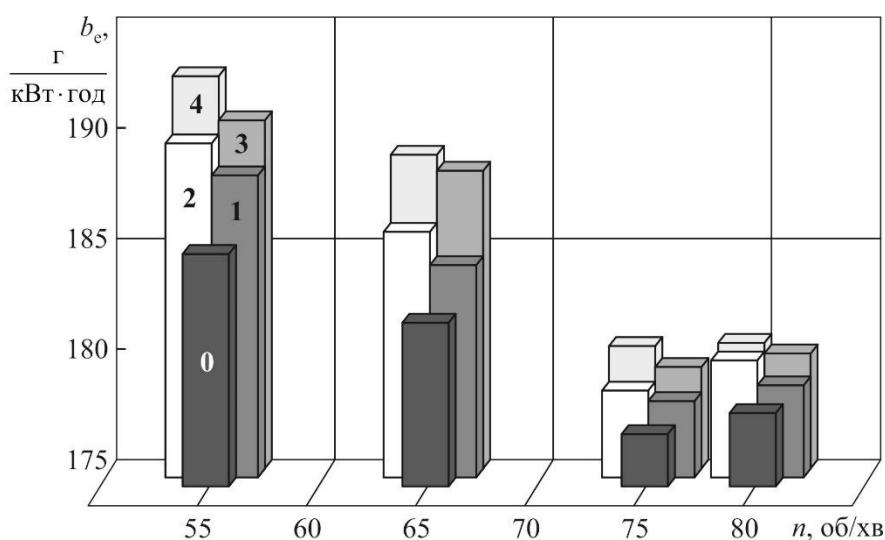


Рисунок 2 – Зміна питомої ефективної витрати палива b_e , г/(кВт·год) суднового дизеля 7UEC60LS фірми Mitsubishi залежно від частоти обертання n , об/хв для різного ступеня рециркуляції газів

EGR, %:

0 – робота без рециркуляції, EGR=0 %; 1 – EGR=5 %; 2 – EGR=10 %; 3 – EGR=15 %;

4 – EGR=20 %

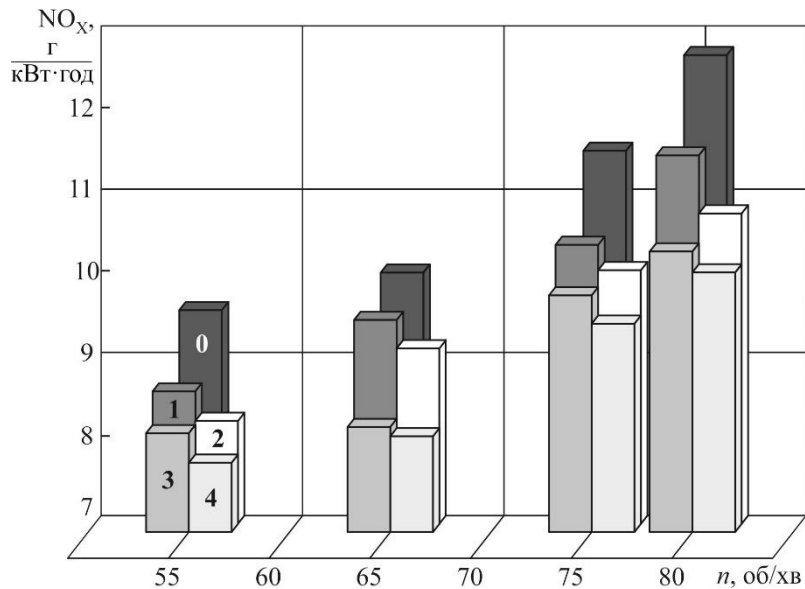


Рисунок 3 – Зміна концентрації оксидів азоту NO_x , г/(кВт·год) у випускних газах суднового дизеля 7UEC60LS фірми Mitsubishi залежно від частоти обертання n , об/хв для різного ступеня рециркуляції газів EGR, %:
 0 – робота без рециркуляції, EGR=0 %; 1 – EGR=5 %; 2 – EGR=10 %; 3 – EGR=15 %;
 4 – EGR=20 %

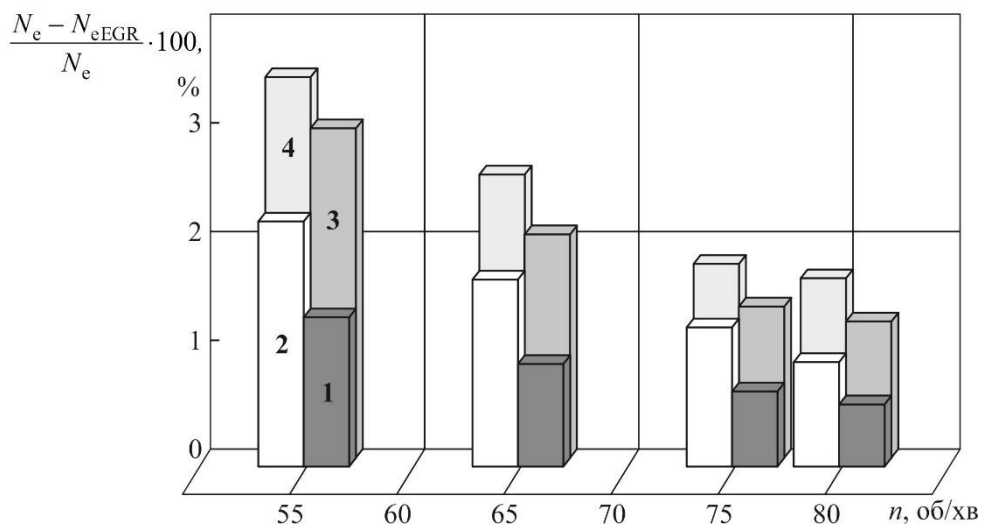


Рисунок 4 – Відносне зниження ефективної потужності $\frac{N_e - N_{e\text{EGR}}}{N_e} \cdot 100, \%$, суднового дизеля 7UEC60LS фірми Mitsubishi залежно від частоти обертання n , об/хв для різного ступеня рециркуляції газів EGR, %:
 0 – робота без рециркуляції, EGR=0 %; 1 – EGR=5 %; 2 – EGR=10 %; 3 – EGR=15 %;
 4 – EGR=20 %

Висновки. Необхідність забезпечення екологічних параметрів роботи суднових дизелів (зокрема емісії NO_x з випускними газами) змушує використовувати додаткові технологічні рішення. Одним із таких варіантів є комплектація суднових дизелів системами EGR високого тиску, що забезпечують примусову подачу в циліндр частини випускних газів із газовипускної системи. Система EGR знижує кількість повітря, призначеного для згоряння палива, тому кількість випускних газів, що повертаються в циліндр дизеля, має підтримувати надійне самозаймання та подальше згоряння палива. Використання системи рециркуляції випускних газів

високого тиску покращує екологічні параметри роботи суднового дизеля, зокрема, знижує рівень емісії NO_x .

Експериментально встановлено, що зміна ступеня рециркуляції випускних газів у діапазоні 5...20 % забезпечує зниження концентрації оксидів азоту NO_x у випускних газах відповідно на 6,8...27,3 % залежно від частоти обертання та навантаження дизеля, які в експериментах змінювалися в інтервалі $n=(0,65...0,95)n_{\text{ном}}$ та $N_e=(0,33...0,95)N_{\text{еном}}$. Причому великі значення зниження концентрації оксидів азоту NO_x у випускних газах відповідають інтервалу навантажень $(0,77...0,95)N_{\text{еном}}$, тобто. найпоширенішим з експлуатаційних режимів роботи дизеля.

Використання системи рециркуляції випускних газів високого тиску призводить до зниження енергетичних та економічних показників роботи судових дизелів. Експериментально встановлено таке:

питома ефективна витрата палива, що характеризує економічність роботи дизеля, підвищується пропорційно зростанню ступеня рециркуляції випускних газів і для різних швидкісних режимів роботи дизеля у відсотковому співвідношенні становить 0,85...2,01 % – для випадку коли ступінь рециркуляції випускних газів становить $\text{EGR}=5\%$ та 2,16...4,34 % коли ступінь рециркуляції випускних газів дорівнює $\text{EGR}=20\%$;

ефективна потужність дизеля, що характеризує його енергетичні показники, знижується з підвищенням ступеня рециркуляції випускних газів. На режимах, близьких до номінального навантаження (наприклад під час $n=0,95n_{\text{ном}}$, за умовою $N_e=0,95N_{\text{еном}}$, зниження значення ефективної потужності становить 1,2 %, на режимах $n=0,65n_{\text{ном}}$, у випадку $N_e=0,95N_{\text{еном}}$ зниження значення ефективної потужності досягає 3,43 %.

Незважаючи на погіршення економічних та енергетичних показників дизеля, застосування способу EGR високого тиску на судах морського та внутрішнього водного транспорту має широкі перспективи, тому що його використання забезпечує виконання міжнародних вимог щодо захисту навколишнього повітряного середовища від забруднення та сприяє підтримці екологічної безпеки суден та їх енергетичних установок.

ЛІТЕРАТУРА

1. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Автоматизація судових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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)). – Р. 33–42. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039.
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. Тимочко О.І., Левченко О.В., Руденко В.М., Сітков О.М. Використання гібридних роботизованих комплексів для інспекції морських нафтогазових об'єктів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.

8. 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.
9. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами судових дизелів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 173-185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
10. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines // Nase More: International Journal of Maritime Science & Technology. – 2019. – Vol. 66. – Iss. 1. – P. 1-9. <https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1>.
11. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. The Use of Exhaust Gas Recirculation for Ensuring the Environmental Performance of Marine Diesel Engines // Nase More: International Journal of Maritime Science & Technology. – 2018. – Vol. 65. – № 2. – P. 78-86. doi.org/10.17818/NM/2018/2.3.
12. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // American Scientific Journal. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67-71.
13. Petrychenko O. Levynskyi 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>.
14. 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.
15. 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.
16. 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>.
17. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Píšťek 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>.
18. 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 // Journal Marine Science and Engineering. – 2022. – 10(9), 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.
19. Petrychenko O. Levynskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // Transport Systems and Technologies. – 2024. – № 43. – P. 21-36. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-2>.
20. 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.
21. 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.
22. Куропятник А.А., Сагин С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник, 2018. – Вып. 24. – С. 72-80.
23. 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>.

24. Сагін С.В., Мацкевич Д.В. Оптические характеристики граничных смазочных слоев масел, применяемых в циркуляционных системах судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн.сб. – 2011. – № 26. – С.116-125.
25. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
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. Сагін С.С., Сагін С.В. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.23.
29. 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>
30. 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 // Journal Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(10). – P. 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.
31. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
32. 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 (July – August). – P. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
33. Kuropyatnyk O.A. Reducing the emission of nitrogen oxides from marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration January 25, 2020. Part 2. Beijing, PRC. – P. 154-160. DOI. 10.34660/INF. 2020.24.53689
34. 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
35. Zablotsky Yu.V. The use of chemical fuel processing to improve the economic and environmental performance of marine internal combustion engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 131-138. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36257.
36. Kuropyatnyk O.A. Ensuring environmental performance indicators of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 146-153. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36259.
37. 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, Vienna-2018. – № 7-8 (July-August). – P. 37-42. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-37-42
38. Sagin S.V. Improving the performance parameters of systems fluids // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Vienna-2018. – № 7-8 (July-August). – P. 55-59. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-55-59
39. 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.

40. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 139-145. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36258.
41. Левченко О.В. Синтез варіантів дій судноводія у небезпечних ситуаціях з урахуванням часових та ресурсних обмежень у суднових СППР // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.

REFERENCES

1. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Automation of ship technical facilities. – 2023. – № 28. – P. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120
2. 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.
3. Sagin S.S., Sagin S.V. Use of artificial intelligence in the situations of excessive vessels approaching // Water Transport. – 2024. – №. 1(39). – P. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
4. 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.
5. 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.
6. Tymoshchuk O., Daki O., Boyko O., Karadobriy T. Analytical Inspection of adaptive vessel control systems and ways of their construction // Water Transport. – 2020. – № 3(31). – P. 120-125. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13.
7. Tymochko O.I., Levchenko O.V., Rudenko V.M., Sitkov O.M. Use of hybrid robotic complex for inspection of marine oil and gas facilities // Water transport. – 2024. – Vol. 2(40). – P. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
8. 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.
9. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Determination of optimal modes of exhaust gas control processes for marine diesel engines // Water transport. – 2024. – №. 1(39). – P. 173-185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
10. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines // Nase More : International Journal of Maritime Science & Technology. – 2019. – Vol. 66. – Iss. 1. – P. 1-9. https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1.
11. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. The Use of Exhaust Gas Recirculation for Ensuring the Environmental Performance of Marine Diesel Engines // Nase More : International Journal of Maritime Science & Technology. – 2018. – Vol. 65. – № 2. – P. 78-86. doi.org/10.17818/NM/2018/2.3.
12. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // American Scientific Journal, 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67-71.
13. 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.
14. 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.
15. 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.

16. 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>.
17. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Píšťek 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>.
18. 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 // *Journal Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.
19. Petrychenko O., Levynskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // *Transport Systems and Technologies*. – 2024. – № 43. – P. 21-36. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-2>.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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>.
24. Sagin S.V., Matskevych D.V. Optical characteristics of boundary lubricating layers of oils used in circulation systems of marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2011. – Vol. 26. – P. 116-125.
25. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 40. – P. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
26. Madey V.V., Sagin S.V., Volkov O.M. Ensuring operational performance of diesel engines of marine vessels when using fuel of biological origin // *Water transport*. – 2024. – №. 1(39). – P. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.21.
27. Sagin A.S., Sagin S.V. Eexperimental determination of optimal phases of fuel supply to the cylinder of marine diesel engines // *Water transport*. – 2024. – №. 1(39). – P. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.
28. Sagin S.S., Sagin S.V. Use of artificial intelligence in the situations of excessive vessels approaching // *Water transport*. – 2024. – №. 1(39). – P. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.23.
29. 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>
30. 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 // *Journal Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(10). – P. 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.
31. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
32. 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 (July – August). – P. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
33. Kuropyatnyk O.A. Reducing the emission of nitrogen oxides from marine diesel engines // *Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration January 25, 2020. Part 2. Beijing, PRC*. – P. 154-160. DOI. 10.34660/INF. 2020.24.53689

34. 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
35. Zablotsky Yu.V. The use of chemical fuel processing to improve the economic and environmental performance of marine internal combustion engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 131-138. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36257.
36. Kuropyatnyk O.A. Ensuring environmental performance indicators of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 146-153. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36259.
37. 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, Vienna-2018. – № 7-8 (July-August). – P. 37-42. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-37-42
38. Sagin S.V. Improving the performance parameters of systems fluids // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Vienna-2018. – № 7-8 (July-August). – P. 55-59. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-55-59
39. 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.
40. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 139-145. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36258.
41. 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.

Kuropyatnyk O.A.

ENSURING THE ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF MARINE DIESEL ENGINES THROUGH THE USE OF HIGH-PRESSURE EXHAUST GAS RECIRCULATION SYSTEMS

The issue of ensuring the environmental performance of marine diesel engines by using high-pressure exhaust gas recirculation systems is considered. The mechanism of formation of nitrogen oxides during combustion of petroleum fuels in marine diesel engines is analyzed. A brief analysis of the main methods that contribute to reducing the emission of nitrogen oxides with exhaust gases of marine diesel engines is performed. The features of high-pressure exhaust gas recirculation systems installed on high-power marine low-speed diesel engines are highlighted. The results of research carried out on a 6UEC68-TierII low-speed marine diesel engine from Mitsubishi, equipped with a high-pressure exhaust gas recirculation system, are presented. The task of the study was to determine the impact of the high-pressure exhaust gas recirculation system on the environmental, energy and economic performance of the marine low-speed diesel engine. It has been experimentally established that changing the degree of exhaust gas recirculation in the range of 5–20 % provides a decrease in the concentration of nitrogen oxides in exhaust gases by 6.8–27.3 %, respectively, depending on the speed and load of the diesel engine. It has also been found that the use of a high-pressure exhaust gas recirculation system leads to a decrease in the energy and economic performance of marine diesel engines. It has been experimentally established that the specific effective fuel consumption, which characterizes the efficiency of the diesel engine, increases in proportion to the increase in the degree of exhaust gas recirculation and for different speed modes of diesel engine operation in percentage terms is 0.85–4.34 %. The effective power of the diesel engine, which characterizes its energy performance, decreases by 1.2–3.43 % with an increase in the degree of exhaust gas recirculation. Despite the deterioration of the economic and energy

performance of diesel engines, the use of the high-pressure exhaust gas recirculation method on ships of maritime and inland waterway transport has broad prospects, since its use ensures the fulfillment of international requirements for the protection of the ambient air from pollution and contributes to the maintenance of the environmental safety of ships and their power plants.

Keywords: diesel engine efficiency, diesel engine power, environmental friendliness of diesel engines, environmental safety, exhaust gas recirculation, marine diesel, maritime transport, nitrogen oxide emissions, specific fuel consumption.