

10.31653/smf49.2024.124-136

Сагін С.В., Куропятник О.А., Разінкін Р.О.

Національний університет «Одеська морська академія»

**ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ СИСТЕМИ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ
ВИПУСКНИХ ГАЗІВ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ
РОБОТИ СУДНОВОГО МАЛООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ**

Постановка проблеми в загальному вигляді. Суднові двигуни внутрішнього згорання (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 [1-4]. 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 [5-9]. Забезпечити роботу судових ДВЗ без забруднення повітряного середовища неможливо, оскільки їхній робочий цикл неминуче включає до свого складу процес випуску відпрацьованих газів [9-12].

Під час використання вуглеводневих палив нафтового походження, яке під час згорання є джерелом теплової енергії, та атмосферного повітря, як окислювача під реакцій займання та згорання палива, в циліндрі судових ДВЗ утворюються випускні гази (ВГ), які складаються на 99,2 % з нетоксичних компонентів – продуктів неповного згорання (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 судових дизелях, можна поділити на дві групи. До першої групи відносяться продукти неповного згорання 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 [13-16].

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) [17, 18].

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 передую моменту утворення NO_x у циліндрі дизеля [19-22];
- безпосередній вплив на ВГ (їх очищення, хімічна обробка, рециркуляція) протягом часу, коли вони перебувають у газовипускній системі дизеля [23-26].

Зниження емісії NO_x шляхом хімічної обробки палива було досліджено в роботах [27-29], 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 [30-33], 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 [34-36], дослідження [37-39] присвячені пошуку оптимального ступеня рециркуляції випускних газів для систем низького тиску. Існує й інша схема рециркуляції випускних газів – система високого тиску, у якій газу 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.

Постановка завдання. 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 малообертового дизеля 8G60ME фірми MAN Diesel, обладнаного системою рециркуляції випускних газів (Exhaust gas recirculation – EGR) високого тиску.

Виклад основного матеріалу дослідження. Експериментальні дослідження на судні, призначеному для перевезення контейнерів. Головний двигун 8G60ME фірми MAN Diesel, що був встановлено на судні, характеризувався номінальною потужністю 21440 кВт. Принципова схема суднового дизеля 8G60ME фірми MAN Diesel із системою рециркуляції випускних газів високого тиску, на якому виконувались дослідження, показано на рис. 1.

Система працює в такий спосіб. Випускні гази з циліндрів дизеля надходять у загальний випускний колектор 2 і далі до газотурбонагнетачів 1 і 5, після чого через газовипускну трубу видаляються в атмосферу. Газотурбонагнетачі 1 і 5 забирають повітря з машинного відділення та після стиснення спрямовують його через охолоджувачі 9 і 11в повітряний (продувний) ресивер 10. При цьому газотурбонагнетач 5 обладнаний системою рециркуляції випускних газів високого тиску, до складу якої входять керуючий клапан 3, скруббер 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 [40, 41].

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 скруббері 4, після чого додатковим нагнітачем 8 подаються на змішування з повітрям (що надходить з повітряного компресору газотурбонагнітвача 5) і далі прямують до продувного ресиверу 10.

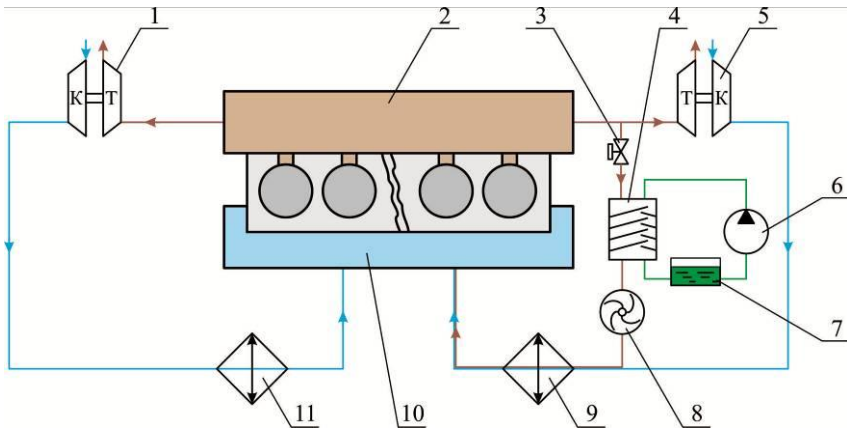


Рис. 1. Принципова схема системи рециркуляції випускних газів високого тиску суднового малообертового дизеля 8G60ME фірми MAN Diesel: 1, 5 – газотурбонагнітач; 2 – випускний колектор; 3 – керуючий клапан системи рециркуляції випускних газів високого тиску; 4 – скруббер; 6 – насос подачі прісної води 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 наддувального повітря; 10 – продувний ресивер Т, К – газова турбіна та повітряний компресор газотурбонагнітачів

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 , O_2 , N_2 , NO_x , CH_4 , SO_2 , H_2S , а також температуру, вологість, швидкість та диференціальний тиск вимірюваного середовища.

Ступінь рециркуляції газів під час експериментів змінювалася в наступних значеннях: $\text{EGR}=5\%$, $\text{EGR}=10\%$, $\text{EGR}=15\%$, $\text{EGR}=20\%$ 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 швидкісних режимів роботи, що відповідали значенням відносної потужності дизеля: $0,6N_{\text{енном}}$, $0,7N_{\text{енном}}$, $0,8N_{\text{енном}}$ та $0,8N_{\text{енном}}$. Як $N_{\text{енном}}$ приймалася номінальна потужність, що відповідає своєму значенню коефіцієнта надлишку повітря α .

Для визначення потужності дизеля здійснювалося його індиціювання за допомогою суднової системи діагностики Doctor [42, 43]. Крім того, для кожного режиму роботи дизеля за допомогою суднових вимірювальних засобів визначалася годинна витрата палива [44, 45].

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 8G60ME MAN Diesel в залежності від частоти обертання колінчастого валу n , та ступеня рециркуляції випускних газів EGR показані на рис.2-4.

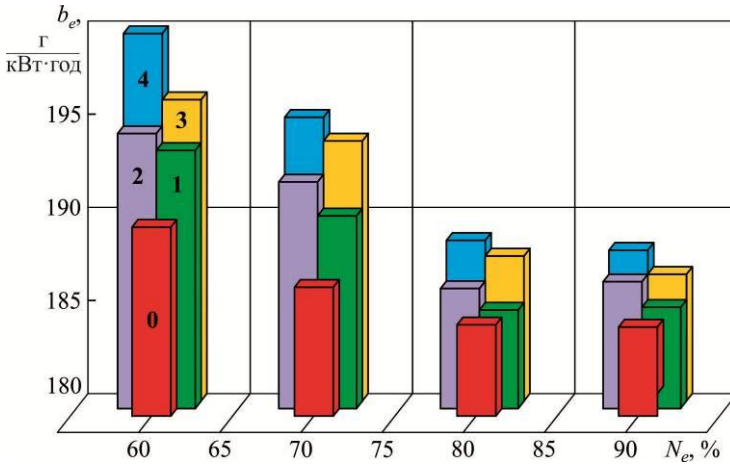


Рис. 2. Зміна питомої ефективної витрати палива b_e , $г/(кВт \cdot год)$ дизеля 8G60ME MAN Diesel для різного ступеня рециркуляції газів EGR, %: 0 – робота без рециркуляції, EGR=0 %; 1 – EGR=5 %; 2 – EGR=10 %; 3 – EGR=15 %; 4 – EGR=20 %

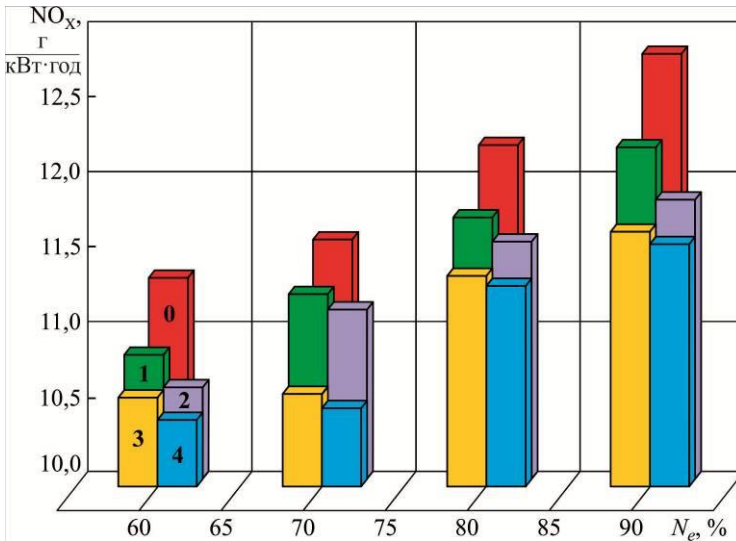


Рис. 3. Зміна концентрації оксидів азоту NO_x , $г/(кВт \cdot год)$ у випускних газах дизеля 8G60ME MAN Diesel для різного ступеня рециркуляції газів EGR, %: 0 – робота без рециркуляції, EGR=0 %; 1 – EGR=5 %; 2 – EGR=10 %; 3 – EGR=15 %; 4 – EGR=20 %

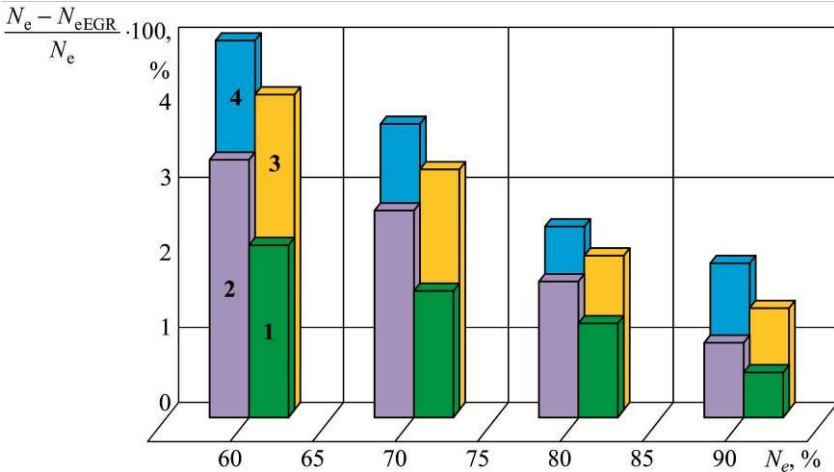


Рис. 4. Відносне зниження ефективної потужності $\frac{N_e - N_{eEGR}}{N_e} \cdot 100, \%$, дизеля 8G60ME MAN Diesel для різного ступеня рециркуляції газів EGR, %: 1 – EGR=5 %; 2 – EGR=10 %; 3 – EGR=15 %; 4 – EGR=20 %

Висновки і перспективи подальших досліджень. 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 $N_e=(0,33...0,95)N_{e\text{ном}}$. Причому великі значення зниження концентрації оксидів азоту NO_x у випускних газах відповідають інтервалу на-

вантажень $(0,77...0,95)N_{\text{еном}}$, тобто. найпоширенішим з експлуатаційних режимів роботи дизеля.

Використання системи рециркуляції випускних газів високого тиску призводить до зниження енергетичних та економічних показників роботи суднових 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 $EGR=5\%$ та $2,16...4,34\%$ коли ступінь рециркуляції випускних газів дорівнює $EGR=20\%$;

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.

Перелік використаних джерел

1. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. 2023. № 4 (3(72)). P. 33–42.

2. Тимошук О.М., Даки 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.

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.

4. 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.

5. 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.

6. Sagin A.S., Zablotskiy 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. Сагин С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. 2019. Вып. 25. Одесса: НУ «ОМА». С. 79-89.

12. 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.

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.

14. 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.

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. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. 2023. Вип. 28. С. 106-120.

17. Марченко О.О., Сагин С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. 2020. Вип. 41. С. 10-14.

18. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // Проблемы техники : наук.-виробн. журнал. 2012. № 4. С. 68-81.

19. Сагин 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. С. 84-103.

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. С. 5-16.

21. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskiy 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.

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., Karianskiy S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskiy 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.

24. Сагин 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., Сагин С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. 2020. Вип. 40. С. 20-25.

26. Мадей В.В., Сагин 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.

27. Сагин А.С., Сагин С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр судових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2024. Вип. 1(39). С. 206-215.

28. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. 2021. № 7-8 (July – August). P. 29-35.

29. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. 2014. Вып. 20. С. 74-83.

30. Сагин С.В., Столярик Т.О. Динаміка судових дизелів під час використанні моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація судових технічних засобів : наук. -техн. зб. 2021. Вип. 27. С. 108-119.

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.

32. Сагин С.В., Поповский Ю.М., Гребенюк М.Н. Влияние ориентационной упорядоченности в граничных смазочных слоях на триботехнические характеристики узлов трения // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. 1998. Вып. 1. С.102-104.

33. Побережний Р.В., Сагин С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. 2020. Вип. 41. С. 5-9.

34. Заблоцький Ю.В. Зниження втрат енергії під час забезпечення процесів машення судових двигунів внутрішнього згорання // Суд-

нові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2023. Вип. 47. С. 23-31.

36. Заблоцький Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту, 2020. Вип. 2(59). С. 88-98.

36. Тимошук О.М., Боріна М.В. Дослідження методів підвищення екологічності суднових енергетичних установок у водному середовищі // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2022. Вип. 2(36). С. 240-252.

37. 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.

38. Сагін С.С., Сагін С.С. Використання гібридної системи координації руху морських суден під час їх маневрування в стиснених водах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2024. Вип. 3(41). С. 208-220.

39. 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.

40. 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.

41. 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.

42. 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.

43. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблеми техніки : наук.-виробн. журнал. 2011. № 3. С. 78-88.

44. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // Materi-

als of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). P. 195-202.

45. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів експлуатації суднових двигунів внутрішнього згорання під час використання біодизельного палива // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. 2024. Вип. 48. С. 100-113.