

10.31653/smf49.2024.98-109

Руснак Д.Ю.

Національний університет «Одеська морська академія»

ОСОБЛИВОСТІ КОМПЛЕКТАЦІЇ СУДНОВИХ СИСТЕМ ПІДГОТОВКИ ПАЛИВА

Постановка проблеми в загальному вигляді. Робота суднових двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) забезпечується різними системами, найбільш енергоозброєною, розгалуженою та насиченою з яких є паливна система [1-3]. Нині існує тенденція виготовлення суднових систем як модулів. Основною функцією системи є забезпечення надійності підготовки важкого палива від приймального танка до паливної апаратури двигунів, при цьому кожен модуль цієї системи відрізняється за своїм цільовим призначенням, за способом перетворення енергії, за складом і виконує строго певні функції [4-6]. Порушення функціонування або вихід з ладу одного з модулів паливної системи може призвести до зниження ефективності її роботи або до аварії двигунів, що, у свою чергу, може спричинити зниження ходових характеристик судна аж до його зупинки [7-9].

В останні роки практично у всіх сучасних суднових дизелях (двох- та чотиритактних, мало- та середньообертових) використовуються палива з в'язкістю 380...500 сСт. Дослідження з питань можливості використання у суднових ДВЗ палив погіршеного фракційного складу та, відповідно, підвищеної в'язкості розвиваються за такими напрямками:

- застосування спеціальних присадок (для запобігання окислювальним процесам та скорочення утворення опадів під час зберігання палива; для запобігання відділення з загального об'єму палива важких складових та подальшого їх перетворення в шламові з'єднання, для протидії можливості розшарування палива) [10-12];

- застосування багатоступінчастої фільтрації з додатковою гідродинамічною обробкою [13-15];

- застосування методів магнітодинамічної та електродинамічної обробки [16-18];

- оснащення дизелів додатковими пристроями, які забезпечують якісне очищення та підтримують необхідний рівень дисперсності більш в'язкого палива [19-21].

Для забезпечення якісної підготовки палива та подальшого ефективного використання палива, судна, що знову будуються, комплектуються спеціальними системами підготовки та подачі палива, а паливні системи дизелів діючих суден переобладнаються з урахуванням можливості використання в них палива високої в'язкості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток сучасної технічної науки сприяє появі різних механізмів та установок, функціонування яких у складі паливних систем забезпечує покращення експлуатаційних характеристик палива. Одночасно удосконалюються способи підготовки суднових палив, до яких додатково додаються використання гомогенізації, застосування водопаливних емульсій, використання присадок до палива [22-24].

Гомогенізація як явище, що забезпечує підвищення однорідності палива, застосовувалася для додаткової підготовки високов'язких палив у поєднанні зі стандартними методами підготовки палива. Основним завданням, розв'язання якого забезпечувалося за умови гомогенізації палива, було збереження теплотворної здатності палива за рахунок зменшення утворення шламів та видалення з ним горючих складових палива. Однак широкого поширення на суднах морського та внутрішнього водного транспорту гомогенізатори не набули, хоча й випускалися як вітчизняними, так і зарубіжними виробниками. Насамперед це було викликано додатковими витратами енергії для її проведення, додатковими вібраційними навантаженнями, що створювалось під час гомогенізації на конструкції машинного відділення та суднові системи, і навіть необхідністю виконання регламентних робіт з обслуговування таких систем [25-27].

Поліпшення якості палива та подальше вдосконалення процесу згоряння палива за рахунок застосування водопаливних емульсій досягало свій ефект для дизелів середнього форсування, максимальний тиск циклу в яких не перевищував 8...9 МПа. Це було пов'язано з тим, що використання водопаливних емульсій ґрунтувалося на «ефекті мікровибухів», що виникав у циліндрі разом з випаровуванням частинок води. При цьому процес пароутворення перебігав до моменту самозаймання палива, сприяючи збагаченню паливного факела додатковим киснем і тим самим підвищуючи інтенсивність згоряння палива [28-30]. Однак розвиток суднового дизелебудування і пов'язане з ним зростання максимального тиску згоряння до 14...16 МПа і вище призвело до нівелювання ефекту «мікровибухів» і зараз використання водопаливних емульсій, як і пряме упорскування води

в повітряну і газову магістралі, а також безпосередньо в циліндр дизеля, застосовується тільки з метою забезпечення екологічних характеристик судових дизелів, насамперед щодо викидів оксидів азоту.

Застосування присадок до судових палив також не має широкого поширення в судовій практиці і використовується лише в поодиноких випадках фірмами, які самостійно виробляють такі присадки і мають у своєму підпорядкуванні морські судна [31-33]. При цьому слід визнати, що паливні присадки сприяють покращенню інтенсивності процесу згоряння палива, проте їх вплив на корозійне зношування циліндрової групи та екологічні показники роботи дизеля неоднозначний. Крім того, більшість присадок до палива не відрізняється високою стабільністю. Тому застосування присадок до палива малоефективне у разі їх розчинення в обсязі як відстійної, так і витратної цистерн, а вимагає додаткових дозуючих пристроїв, що забезпечують порційну подачу присадок в паливо безпосередньо перед впорскуванням в циліндр дизеля. Це ускладнює і без цього розгалужену систему підготовки палива [34-36].

Питання ультразвукової обробки палива також розглядалися під час проектування та модернізації систем підготовки палива [37-39]. Однак цей вид підготовки палива вивчався з точки зору створення стійких сумішей палива різної густини та структурного складу, а його використання з метою паралельного визначення впливу на екологічні параметри роботи дизеля практично не вивчалось.

Постановка завдання. Таким чином, незважаючи на велику кількість досліджень, виконаних як окремими вченими, так і науковими організаціями, переважна більшість із них стосується оптимізації стандартних способів підготовки палива та відносяться безпосередньо з підтриманню функціональних характеристик палива. Тому завданням дослідження було визначення впливу окремих модулів підготовки палива на екологічні показники роботи судових ДВЗ.

Виклад основного матеріалу дослідження. Систему підготовки палива для судового дизеля можна як систему, що з кількох окремих модулів, кожен із яких виконує свої функції. Принцип побудови такої системи наведено на рис. 1.

Модуль очищення забезпечує необхідний структурний склад палива та використовується як у комплексі з іншими модулями підготовки системи, також і для автономного режиму роботи. В останньому випадку відбувається «внутрішня» циркуляція палива, в результаті якої досягається необхідна якість його очищення. Даний модуль

підготовки палива є найенергоємнішим, оскільки включає до свого складу такі елементи, як відстійні та витратні цистерни, насоси, що перекачують паливо, паливні підігрівачі та паливні сепаратори. При цьому саме паливо, перебуваючи в даному модулі, має найгірші у всьому своєму життєвому циклі характеристики – високу в'язкість, механічні домішки, шламові включення. Саме в цьому модулі відбувається максимальне підведення теплової енергії від зовнішніх джерел (парових або електричних підігрівачів) до палива та якісна зміна його структури. Температура палива в цьому модулі змінюється від 20...30 °С (під час його потрапляння до модулю) до 90...100 °С (на виході з модулю); в'язкість зменшується з 450...500 сСт та навидь від 700...750 сСт (для понад важких палив) до 20...50 сСт; вміст механічних домішок знижується до мінімального значення, з палива практично повністю видаляється волога [40, 41].

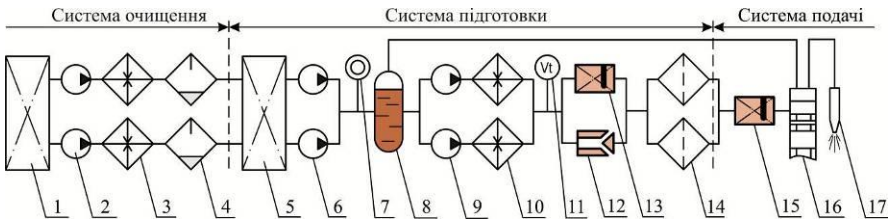


Рис. 1. Модульна схема побудови паливної системи підготовки палива:

1 – відстійна цистерна; 2 – насоси, що перекачують паливо; 3 – підігрівачі палива 1-го ступеня; 4 – сепаратори палива; 5 – витратна цистерна; 6 – насоси, що підкачують паливо; 7 – витратомір; 8 – деаераційний резервуар; 9 – циркуляційні насоси; 10 – підігрівачі палива 2-го ступеня; 11 – віскови-метр; 12 – гідродинамічний активатор палива; 13 – ультразвукова установка 1-го ступеня; 14 – автоматичний фільтр; 15 – ультразвукова установка 2-го ступеня; 16 – паливний насос високого тиску; 17 – форсунка

Другий модуль (система підготовки) забезпечує остаточну підготовку палива перед його безпосередньою подачею в циліндр дизеля. Основними складовими даного модуля є насоси, що забезпечують підкачування та циркуляцію паливо, підігрівачі палива 2-го ступеня, фільтраційні установки, автоматичні пристрої, що забезпечують контроль суцільності потоку та регулювання в'язкості палива. В даний модуль також входить бустерна установка, за допомогою якої підтримується необхідний тиск у системі, а також деаераційні та дегазаційні резервуари, що очищають паливо від повітряних та газових домішок. Паливо в цей модуль надходить у попередньо підігрітому

стані, що знижує витрати енергії на його підготовку. Дані два модулі становлять основу підсистеми низького тиску. Робота даних модулів повинна забезпечити необхідні експлуатаційні параметри палива – відсутність у ньому механічних домішок, розмір яких перевищує зазор у прецизійних парах паливної апаратури високого тиску.

Третій модуль є паливною системою високого тиску і забезпечує подачу палива в циліндр дизеля. Енергія в даному модулі виробляється самим дизелем і передається паливу через кінематичну схему колінчастий вал – розподільний вал – штовхач паливного насоса високого тиску (в разі, коли конструкція дизеля передбачає наявність механічного / гідравлічного приводу), або за допомогою системи common-rail (в разі, коли дизель оснащено електронною системою управління подачею палива). Енергоємність цього процесу відноситься до механічних втрат дизеля і може досягати 5...7 % його потужності. Наприкінці, в даному модулі за рахунок хімічної реакції окислення палива киснем повітря потенційна енергія палива перетворюється на теплову енергію газів і, згодом, на корисну роботу поршня дизеля [42, 43].

Актуальність якісного проведення процесів підготовки палива підвищується під час знаходження суден морського та внутрішнього водного транспорту в особливих екологічних районах. Перш за все до них відносяться спеціальні райони контролю викидів сірки – Sulphur emissions control areas (SECAs). Викиди оксидів сірки SO_x регламентуються масовим вмістом сірки у судновому паливі. З 01.01.2020 р. відповідно до Annex VI MARPOL вміст сірки у паливі не повинен перевищувати 0,1 % за умови експлуатації судна всередині районів SECAs та не більше 0,5 % під час експлуатації судна поза районами SECAs.

Використання палива з вмістом сери понад 0,5 % від маси можливо тільки за умови додаткового очищення випускних газів у спеціальних технічних пристроях (в якості яких зазвичай встановлюються скрубери) [36, 37]. У разі управління екологічною безпекою морських суден за допомогою додаткового очищення випускних газів контролюється співвідношення $SO_2(\text{ppm})/CO_2(\%)$ після скрубера. Ця величина не повинна перевищувати значення 4,1 SO_2/CO_2 під час знаходженні судна в SECAs та значення 21,7 SO_2/CO_2 під час перебування судна за межами SECAs. Вимоги Annex VI MARPOL щодо контролю викидів оксидів сірки наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Вимоги Додатка VI MARPOL щодо емісії оксидів сірки

Де та коли застосується	Вміст сірки в паливі, %	Співвідношення викидів SO ₂ (ppm)/CO ₂ (%)
За межами SECA або порту ЄС, починаючи з 1 січня 2020 року	0,5	21,7
В SECA або порту ЄС, починаючи з 1 січня 2020 року	0,1	4,3

Додаткова обробка суднових важких палив з підвищеним вмістом сірки під час знаходження морських суден в зонах спеціального екологічного контролю сприятиме підвищенню екологічної стійкості суднових дизелів щодо викидів. При цьому під терміном «екологічна стійкість» розуміється відносна різниця між максимально можливим та поточним значеннями співвідношення SO₂(ppm)/CO₂(%), яка виражається як

$$Eco^+ = \frac{\left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)_{\max} - \left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)_t}{\left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)_{\max}} \cdot 100\%,$$

де $\left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)_{\max}$ – максимальне для умов роботи судна (в SECA або поза

SECA) значення відношення $\frac{SO_2}{CO_2}$; $\left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)_t$ – відношення $\frac{SO_2}{CO_2}$ в момент часу t .

Дослідження, що виконувались на судні класу Bulk Carrier водотоннажністю 73320 тонн енергетичну установку якого складали головний двигун 6S60ME-C MAN-Diesel & Turbo, три допоміжних двигуна 6EY22ALW Yanmar та допоміжний котел Kangrim MB02 (випускні гази яких очищувались від домішок сірки в скрубєрі) визначили, що додаткова обробка палива шляхом ультразвукового опромінювання сприяє зменшенню концентрації сірковмісних складових в випускних газах. Це відображається в зменшенні відношення $\frac{SO_2}{CO_2}$ як у разі експлуатації судна всередині SECA, також під час експлуатації судна поза районами SECA. Результати досліджень на-

ведено в таблиці 2. Діаграма, що відображає отримані результати, наведена на рис. 2.

Таблиця 2. Діапазон зміни екологічних показників роботи судна Bulk Carrier водотоннажністю 73320 тонн за умовою різних способів підготовки палива

Показник	Знаходження поза SECAs		Знаходження всередині SECAs	
	1	2	1	2
$\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}$, $\frac{\text{ppm}}{\%}$	19,6...20,7	14,1...16,3	3,73...4,06	2,42...2,82

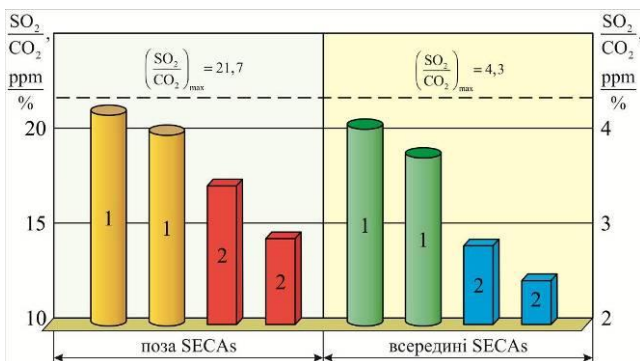


Рис. 2. Діапазон зміни екологічних показників роботи судна Bulk Carrier водотоннажністю 73320 тонн за умовою різних способів підготовки палива:

- 1 – без використання додаткового ультразвукового опромінювання;
- 2 – з використанням додаткового ультразвукового опромінювання

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

1. Модульні схеми побудові суднових систем підготовки палива забезпечують підтримання його експлуатаційних характеристик. При цьому в залежності від фракційного та структурного складу палива, а також в залежності від його густини та в'язкості можливо використання окремих додаткових модулів, які впливають на функціонування підсистем очищення, підготовки та подачі палива.

2. Підвищену актуальність використання додаткових модулів підготовки палива набуває під час знаходження суден морського та внутрішнього водного транспорту в особливих екологічних районах.

3. Експериментально підтверджено, що використання додаткових модулів підготовки палива, які засновані на ультразвуковому опромінюванні палива призводить до підвищення екологічної стійкості роботи суднових дизелів. Це відображається в зменшення головного

критерію, що враховується в разі використання палива з підвищеним вмістом сірки та подальшим очищенням випускних газів в скруберах SO_x , а саме відношення SO_2/CO_2 .

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 Sagin S.V., Solodovnikov V.G. Cavitation Treatment of High-Viscosity Marine Fuels for Medium-Speed Diesel Engines // *Modern Applied Science*. 2015. Vol. 9. № 5. P. 269–278.

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. P. 14-17.

7. Солодовников В.Г. Определение оптимальной частоты ультразвуковой кавитационной обработки топлива // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник*. 016. Вып. 22. С. 97-104.

8. Солодовніков В.Г. Використання ультразвукової обробки в модульних схемах побудови суднових систем паливопідготовки // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* 2018. Вип. 38. С. 158-168.

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*. 2018. № 7-8. P. 37-42.

10. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // *Materials of the International Con-*

ference “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., Сагин С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. 2020. Вип. 40. Одеса: НУ«ОМА». 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. Сагин С.В., Солодовников В.Г. Ультразвуковая обработка топлива для судовых среднеоборотных дизелей // Austria-science. 2017. № 2. С. 88-93.

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. Руснак Д.Ю., Сагин С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. 2020. Вип. 40. С. 49-54.

17. Марченко О.О., Сагин С.В. Вдосконалення процесу очищення судових 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*. 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. сб. 2018. Вып. 24. С. 72-80.

23. Sagin S.V., Karianskiy S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskiy Y., Fomin O., Pířt'ek V., Kuřcera 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*. 2021. № 7-8. 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. 2021. № 7-8. P. 36-43.

32. Сагін 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., Сагін 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 мащення судових двигунів внутрішнього згоряння // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2023. Вип. 47. С. 23-31.

35. Солодовніков В.Г. Забезпечення технічного стану судових дизелів шляхом кавітаційної обробки палива // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. 2020. Вип. 40. С. 65-69.

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

37. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін С.С., Чимшир В.І., Разінкін Р.О. Аналіз екологічної стійкості та енергетичної ефективності використання скрубберного очищення випускних газів дизелів суден морського транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2023. Вип. 47. С. 157-171.

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 судових дизелів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. 2024. Вип. 2(40). С. 173-185.

40. Солодовніков В.Г., Руснак Д.Ю. Використання ультразвукової обробки палива у паливних системах судових середньообертових дизелів // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. 2024. Вип. 48. С. 126-136.

41. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристен-

ных слоев углеводородных жидкостей // Проблемы техники : наук.-виробн. журнал. 2011. № 3. С. 78-88.

42. 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.

43. 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.