

10.31653/smf50.2025.67-79

Куропятник О.А.

Національний університет «Одеська морська академія»

**ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
СИСТЕМ КАТАЛІТИЧНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ВИПУСКНИХ
ГАЗІВ ДИЗЕЛІВ СУДЕН МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ**

Постановка проблеми в загальному вигляді. Експлуатація суден морського транспорту пов'язана не лише з транспортуванням вантажів але також з виконанням міжнародних вимог щодо попередження забруднення довкілля випускними газами суднових дизелів. Екологічні вимоги, що висувуються до суднових дизелів, перш за все регламентуються Міжнародною конвенцією МАРПОЛ. Додаток VI цієї конвенції спрямовано на зниження потрапляння в атмосферу оксидів сірки SO_x та NO_x [1-3]. При цьому основним критерієм, за яким обмежується емісія SO_x , є відсотковий вміст сірки в паливі. Кількість NO_x , що знаходиться у випускних газах, визначається в $гNO_x/(кВт \cdot год)$ потужності дизеля та залежить від його частоти обертання, а також року побудови судна [4-6].

Найбільш суворі вимоги Додатку VI МАРПОЛ в районах спеціального екологічного контролю викидів – Emission Control Areas (ECAs). Кількість подібних районів та їх площа постійно збільшується. Це пов'язано з високою щільністю трафіку морських суден в цих акваторіях, а також с особливості їх природних та метеорологічних умов. В найближчий час за погодженням з Міжнародною морською організацією (International Maritime Organization – IMO) визначається нова зону контролю викидів у північно-східній частині Атлантичного океану (North-East Atlantic Ocean ECA), яка з'єднає існуючі ECA у Балтійському морі (Baltic Sea ECA), Північному морі (North Sea ECA) та Ла-Манші (English Channel ECA) з тими, що нещодавно були створені у Середземному морі (Mediterranean Sea ECA), Норвезькому морі (Norwegian Sea ECA) та канадських арктичних водах (Canadian Arctic ECA). При цьому слід визначити, що Середземне море відноситься до спеціального екологічного району, в якому регламентується викиді оксидів сірки, тобто SO_x -ECA); Канадська Арктика, Норвезьке море та північно-східна частина Атлантичного океану – до районів контролю викидів оксидів сірки та окси-

дів азоту – NO_x -ECA та SO_x -ECA [7-9]. Візуалізація цих акваторій надана на рис. 1.

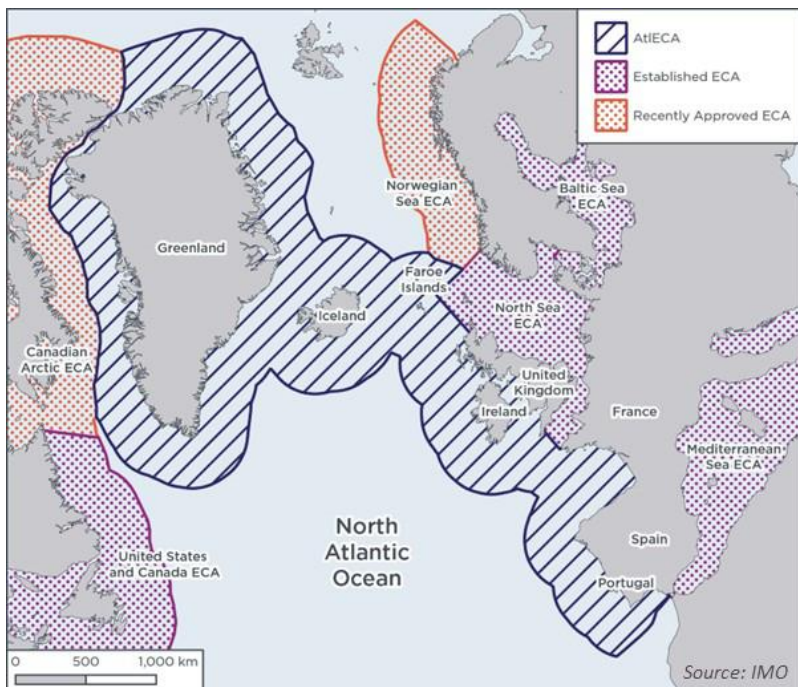


Рис. 1. Спеціальні екологічні райони акваторій Північної Європи та Північної Америки

Вимоги Додатку VI МАРПОЛ відносно емісії оксидів сірки забезпечуються через використання в районах SO_x -ECA палива, вміст сірки в якому не перевищує 0,1 % [10-12]. Значення концентрації оксидів азоту у випускних газах під час знаходження морських суден у районах NO_x -ECA лімітується вимогами Tier III Додатку VI МАРПОЛ, відповідно до якого емісія NO_x не повинна перевищувати:

- 3,4 г NO_x /(кВт·год) в разі, коли частота обертання дизеля не перевищує 130 об/хв;
- величини, що визначається за виразом $9n^{-0,2}$ (де n – частота обертання дизеля) в разі, коли частота обертання дизеля знаходиться у діапазоні $130 < n < 2000$ об/хв;
- 2,0 г NO_x /(кВт·год) в разі, коли частота обертання дизеля більш за 2000 об/хв. [13-15].

Виконання вимог Tier III Додатку VI МАРПОЛ можливо виключно за рахунок використання додаткових технологій очищення випускних газів, найбільш ефективною з яких є система селективного каталітичного відновлення випускних газів (Selective Catalytic Reduction – SCR) [16-18]. Основною складовою цих систем є спеціальний реактор (SCR-реактор) в якому за рахунок використання спеціального реагенту відбуваються хімічні реакції, результатом яких становиться перетворення оксидів азоту NO_x до атомарного азоту N_2 . Кількість суден морського транспорту, головні та допоміжні двигуни яких обладнані системою SCR, щорічно збільшується [19-21]. При цьому постійно виникають завдання з визначення найбільш раціональних режимів експлуатації систем SCR.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В дослідженнях, що були присвячені використанню системи SCR на судах морського транспорту, визначались якісні та кількісні показники процесу очищення випускних газів від оксидів сірки [22-24]. Це дозволило визначити рівень зниження емісії NO_x , який в залежності від умов експлуатації системи SCR знаходиться в межах 80...85 % та перебільшує аналогічний показники для інших систем, що сприяють видаленню оксидів азоту з потоку випускних газів [25-27].

Частина досліджень була присвячена визначенню впливу реагенту, що використовується в контурі SCR-реактору на ефективність процесу очищення випускних газів від з'єднань, що містять азот. При цьому було запропоновано ранжування реагентів за рівнем зниження емісії оксидів азоту [28, 29].

В деяких дослідженнях була визначена найбільш раціональна кількість реагенту, що подається до SCR-реактору [30, 31]. Розв'язання цього завдання сприяло організації роботи системи SCR за умовою максимального зниження емісії оксидів азоту з одночасним забезпечення утворення мінімальної кількості іншого шкідливого компоненту випускних газів – діоксиду вуглецю [32, 33].

Також існують дослідження з конструкційної оптимізації системи SCR та місця розміщення SCR-реактору в машинному відділенні судна [34, 35]. Це перш за все пов'язане зі зміною метacentричної висоти в разі використання системи SCR. Подібні питання особливо актуальні для суден середньої водотоннажності, які здійснюють океанські переходи знаходячись у баласті [36, 37]. В умовах зменшення осадки суден та відповідного збільшення висоти надводного борту в таких випадках та підвищених океанських чи морських хвилях зна-

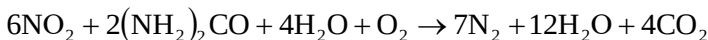
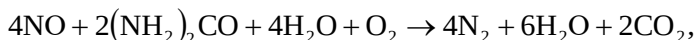
чення метацентричної висоти надає суттєвий вплив на стійкість судна [38-40].

Ефективність роботи системи SCR визначається температурою випускних газів, з якою вони потрапляють до SCR-реактору. При цьому існують лише поодинокі дослідження, що визначають взаємозв'язок між концентрацією оксидів азоту у випускних газах та їх температурою.

Постановка завдання. Завданням дослідження було визначення впливу температури випускних газів на ефективність системи SCR. При цьому розв'язання цього завдання здійснювалось під час знаходження судна у акваторіях спеціальних екологічних районів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження виконувались на судні вантажомісткістю 106500 м³, призначеному для перевезення скраплених газів. Функції головного двигуна на судні забезпечували два однотипних дизеля 5X72DF фірми Hyundai-WinGD, функції допоміжних – три однотипних дизеля 6N35DF фірми Hyundai-HiMSEN. Кожний з дизелів (як головні, також й допоміжні) відноситься до класу «електронних» дизелів, в яких управління процесами подачі палива та випуску газів забезпечується електронною системою [41-43]. Кожний з дизелів був обладнаний окремою системою SCR. Параметри роботи системи SCR контролювалися автоматичною системою, візуалізація основних показників роботи системи SCR наведена у вигляді скрин-шоту на рис. 2.

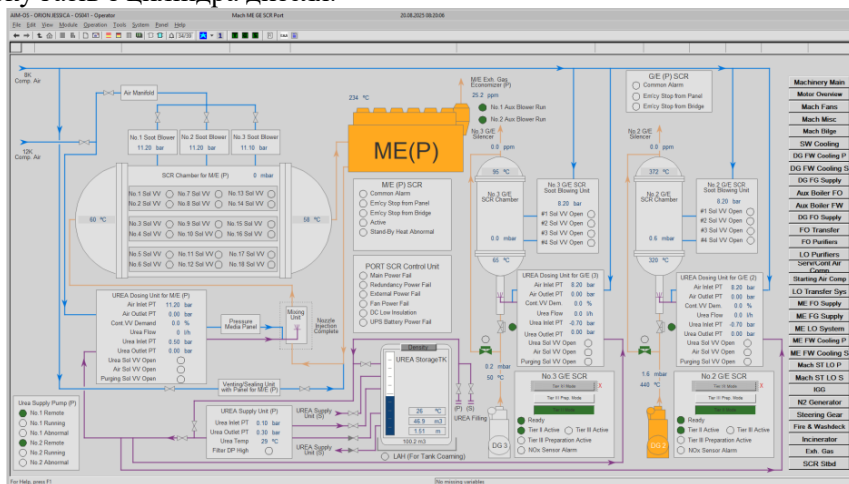
Інтенсивність хімічних реакцій перетворення оксидів азоту NO та NO₂ у атомарний азот N₂ під час їх взаємодії зі сечовиною 2(NH₂)₂CO, яка як реагент подається до SCR-реактору,



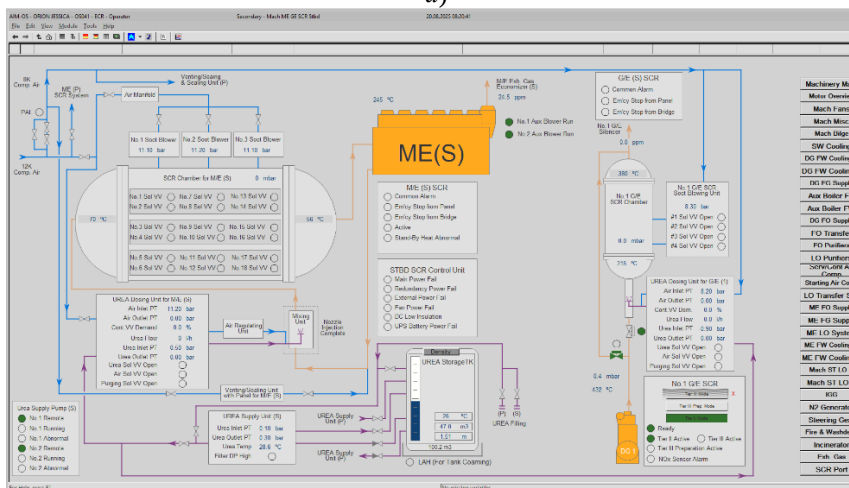
залежить від температури середовища в якому вони перебігають. Зі збільшенням температури випускних газів інтенсивність цих реакцій підвищується, що призводить до збільшення нейтралізації оксидів азоту та відповідного зменшення їх концентрації у складі випускних газів [44, 45].

Саме цим пояснюється той факт, що під час використання систем SCR на експлуатаційних режимах дизеля, що ближче до номінального, спостерігається більш зниження емісії оксидів азоту та відповідно менша їх концентрація у складі випускних газів.

Збільшення температури випускних газів, що поступають в контур SCR-реактору, можливо через організацію більш раннього випуску газів з циліндра дизеля.



а)



б)

Рис. 2. Скрин-шот параметрів роботи системи SCR суднових дизелів 5X72DF фірми Hyundai-WinGD та 6H35DF фірми Hyundai-HiMSEN:

а – обладнання лівого борту; б – обладнання правого борту

Для дизелів, обладнаних системою електронного керування процесом випуску (до яких відносяться дизелі 5X72DF фірми Hyundai-

WinGD, що використовуються на судні як головні) це досягається з центрального комп'ютеру управління (без додаткової зміни положення розподільного газовипускного механізму, як це забезпечується для дизелів з механічним управлінням процесом випуску) [46, 47]. Це принципово полегшує процес управління процесом випуску газів та дозволяє гнучко впливати на зміну їх температури. Відповідно до інструкції з експлуатації суднового дизеля 5X72DF фірми Hyundai-WinGD рекомендований діапазон зміни кута випередження випуску $\varphi_{\text{вп}}$ (саме за цим кутом відкривається випускний клапан та починається процес випуску газів з циліндрів) знаходиться в межах $\varphi_{\text{вп}}=50...75$ °пкв до НМТ (де пкв – поворот колінчатого валу, НМТ – нижня мертва точка) [48, 49]. Чим більш кут випередження випуску газів (тобто чим раніше відкривається випускний клапан та чим раніше гази виходять з циліндра дизеля) тим більша їх температура під час виходу з циліндра та, відповідно, більші температури у випускному колекторі та далі у SCR-реакторі.

Для визначення впливу температури випускних газів $t_{\text{вг}}$ (яка залежить від кута випередження випуску газів $\varphi_{\text{пв}}$) на емісію оксидів азоту NO_x виконувалось вимірювання цих параметрів в діапазоні рекомендованого інструкцією з експлуатації $\varphi_{\text{пв}}$. Зміна цих показників для різного навантаження дизеля 5X72DF Hyundai-WinGD наведена в таблицях 1, 2.

Таблиця 1. Зміна температури випускних газів, $t_{\text{вг}}$, °C, суднового дизеля 5X72DF Hyundai-WinGD для різних кутів випередження випуску, $\varphi_{\text{пв}}$, °пкв

Навантаження на дизель, %	Кут випередження випуску, $\varphi_{\text{пв}}$, °пкв					
	50	55	60	65	70	75
50	307	312	319	332	347	365
60	309	315	322	336	351	372
70	312	318	326	340	358	381
80	315	321	331	346	367	392

Таблиця 2. Зміна концентрації оксидів азоту у випускних газах, NO_x , г/(кВт·год), суднового дизеля 5X72DF Hyundai-WinGD для різних кутів випередження випуску, $\varphi_{\text{пв}}$, °пкв

Навантаження на дизель, %	Кут випередження випуску, $\varphi_{\text{пв}}$, °пкв					
	50	55	60	65	70	75
50	3,28	3,25	3,18	3,11	3,02	2,92
60	3,17	3,12	3,02	2,92	2,78	2,66
70	2,90	2,78	2,64	2,48	2,35	2,19
80	2,62	2,51	2,38	2,25	2,11	1,96

Для кращої візуалізації результати, що наведені у таблицях 1, 2 подані у вигляді діаграм на рис. 3.

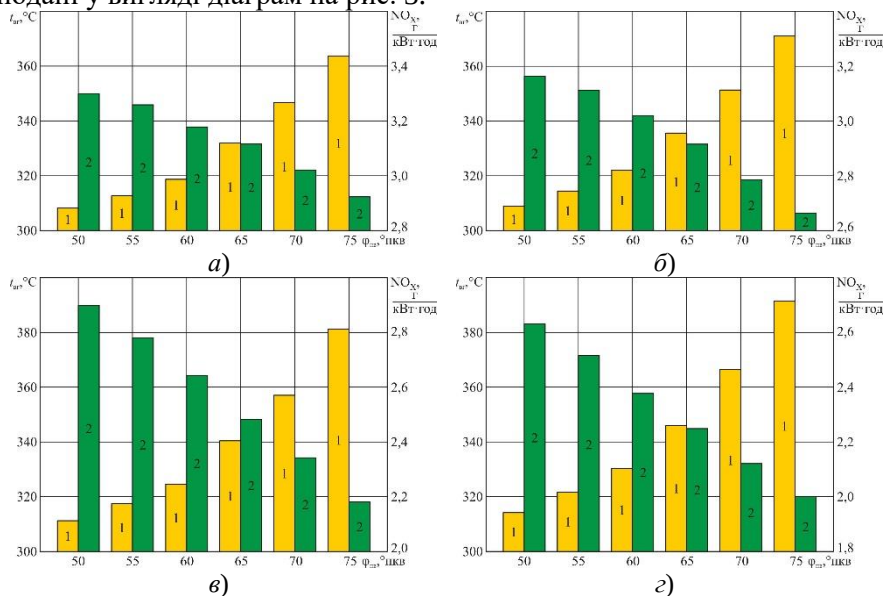


Рис. 3. Зміна температури випускних газів, $t_{вг}$, °C, та концентрації оксидів азоту у випускних газах, NO_x , г/(кВт·год), суднового дизеля 5X72DF фірми Hyundai-WinGD для різних кутів випередження випуску, $\varphi_{вг}$, °ПКВ

Під час досліджень контролювались всі необхідні показники роботи суднових дизелів та систем, що забезпечують їх функціонування, а також вимоги Міжнародних конвенцій щодо запобігання забруднення морського середовища та захисту людського життя.

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

1. Найбільшу ефективність щодо зниження емісії оксидів азоту системи SCR набувають за умовою максимально можливих температур випускних газів, що потрапляють у контур SCR-реактору. Управління температурою випускних газів суднових дизелів можливо за рахунок зміни кута випередження випуску.

2. Для суднового дизеля 5X72DF фірми Hyundai-WinGD для експлуатаційних режимів, що відповідають 50...80 % від його номінального навантаження, встановлено, що зміна кута випередження ви-

пуску у діапазоні 55...70 °Кв сприяє підвищенню температури випускних газів та через це зменшує рівень емісії оксидів азоту.

3. Досягнення мінімально можливих за умовою експлуатації суднового дизеля значень концентрації оксидів азоту у випускних газів особливо актуально під час знаходження суден у зонах спеціального екологічного контролю – морських районах, в яких діють більш суворі вимоги щодо емісії оксидів азоту та в яких з боку наглядових органів виконується постійний моніторинг екологічних показників роботи суден.

4. Подальші дослідження будуть спрямовані на комплексне визначення впливу кута випередження випуску на екологічні та енергетичні показники роботи суднових дизелів.

Перелік використаних джерел

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

2. Левченко О.В., Маранов О.В. Інтеграція комбінованих систем підтримки ухвалення рішень для забезпечення навігаційної безпеки та оптимізації руху суден у портових акваторіях // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. 2025. Вип. 1(42). С. 99-108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.

3. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // *Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб.* 2020. Вип. 41. С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.

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

5. 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. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.

6. Kuropyatnyk O.A. Reduction of NO_x emission in the exhaust gases of low-speed marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and*

Natural Sciences. 2018. № 7-8. P. 37-42. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-37-42.

7. 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.

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

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

10. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка суднових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація суднових технічних засобів: наук. -техн. зб. 2021. Вип. 27. С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.

11. Сагин С. В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. Наук. праць. 2019. Вип. 1(58). С. 89-100.

12. 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. Вип. 25. С.109-118.

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

14. Левченко О.В., Маранов О.В. Поточний стан дослідження питання прогнозування маневреності суден та їхньої гідродинаміки в обмежених водах // Водний транспорт: Збірник наукових праць. 2025. Вип. 1(42). С. 55-60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.

15. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. 2020. Вип. 40. С. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.

16. Левченко О.В., Ганношина І.М., Остапчук Т.В. Система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень на мостик судна // Водний транспорт: Збірник наукових праць. 2025. Вип. 1(42). С. 24-27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. Levynskyi 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

21. 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>.

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

23. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. 2022. Вип. 45. С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.

24. Sagin S., Chymshyr V., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Madey V., Rusnak D. Using Ultrasonic Fuel Treatment Technology to

Reduce Sulfur Oxide Emissions from Marine Diesel Exhaust Gases // *Energies*. 2025. Vol. 18. P. 4756. <https://doi.org/10.3390/en18174756>.

25. 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.

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

27. Goolak S.; Riabov I.; Petrychenko O.; Kyrychenko M.; Pohosov O. The simulation model of an induction motor with consideration of instantaneous magnetic losses in steel // *Advances in Mechanical Engineering*. 2025. Vol. 17(2). [doi:10.1177/16878132251320236](https://doi.org/10.1177/16878132251320236).

28. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2021. № 7-8. P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

29. Petrychenko O. Levynskiy 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>.

30. Заблоцкий Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок // *Вісник Одеського національного морського університету: зб. наук. праць*. 2020. № 2(62). С. 106-119. DOI: 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.

31. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 41. – С. 10-14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.

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. P. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.

33. 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.

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

35. Sagin S., Kuropyatnyk O., Rusnak D. Improvement of the process of cleaning exhaust gases of marine diesels from sulfur oxides // *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. №4(1(84)). P. 72–79. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.337616>.

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

37. Gorb S., Popovskii A., Budurov M. Adjustment of speed governor for marine diesel generator engine // *International Journal of GEOMATE*. 2023. Vol. 25. № 109. P. 125-132. DOI: <https://doi.org/10.21660/2023.109.m2312>.

38. 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. Одесса: ОГМА. С.102-104.

39. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. № 13. P. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse1303058924>.

40. Petrychenko, O.; Levinskyi, M.; Goolak, S.; Lukoševičius, V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // *Sustainability*. 2025. Vol. 17. P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.

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

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

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

44. Sagin S., Kuropyatnyk O., Rusnak D. Improvement of the process of cleaning exhaust gases of marine diesels from sulfur oxides // *Technol-*

ogy Audit and Production Reserves. 2025. Vol. 4(1(84)). P. 72–79. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.337616>.

45. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // *Lubricants*/ 2025. № 13. P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.

46. Kučera O., Pišt'ek V., Fomin O., Kučera P., Sagin S. Measuring Device for More Precise Mistuning Identification of Integrated Bladed Discs // *Symmetry*. 2025. Vol. 17(5). P. 717. <https://doi.org/10.3390/sym17050717>.

47. Заблоцький Ю.В. Підвищення економічності роботи суднових дизелів // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 40. С. 12-16. DOI: 10.31653/smf340.2020.12-16.

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

49. Sagin S., Chymshyr V., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Madey V., Rusnak D. Using Ultrasonic Fuel Treatment Technology to Reduce Sulfur Oxide Emissions from Marine Diesel Exhaust Gases // *Energies*. 2025. Vol. 18. P. 4756. <https://doi.org/10.3390/en18174756>.