

10.31653/smf50.2025.42-51

Колегаєв М.О., Побережний Р.В.

Національний університет «Одеська морська академія»

ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ДИЗЕЛІВ МОРСЬКИХ СУДЕН

Постановка проблеми в загальному вигляді. Дизельні двигуни внутрішнього згоряння, які знайшли широке застосування як суднові енергетичні установки, за наявності безперечних переваг потребують постійної модернізації у зв'язку з підвищенням вимог до запобігання забруднення атмосфери з суден шляхом скорочення концентрації шкідливих речовин у випускних газах, зниженням витрати палива та підвищенням питомої енергоозброєності [1-3]. Проблемою мінімізації вмісту токсичних складових у випускних газах судових дизелів (як найбільш розповсюдженого на суднах морського та внутрішнього водного транспорту теплового двигуна, що споживає велику кількість палива нафтового походження) займалися і займаються багато організацій та науково-дослідних інститутів. Різні аспекти цієї проблеми вивчені досить повно для того, щоб зробити висновок щодо її складності та необхідності внесення значних фінансових витрат на встановлення додаткового обладнання, що забезпечує очищення випускних газів [4-6]. Можливість скорочення емісії шкідливих домішок з випускними газами за рахунок удосконалення характеристик робочого процесу дизелів практично вичерпана [7-9].

Практикою та науковими дослідженнями багаторазово доведено транзитивність понять «робочий процес дизеля» та «утворення оксидів азоту NO_x ». Саме оксиди азоту є тієї складової випускних газів, значення якої суворо регламентується з боку Міжнародної морської організації [10, 11].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В даний час пропонується широкий спектр розв'язання завдання підвищення екологічних показників роботи судових дизелів, проте ступінь їхньої ефективності неоднозначний. Virізняють кілька напрямків:

- 1) підвищення якості організації робочого процесу [12-14];
- 2) підвищення якості традиційних видів палива, використання присадок, водопаливних емульсій та застосування альтернативних видів палива [15-17];

3) застосування систем очищення випускних газів судових дизелів [18-20].

Відомо, що оксиди азоту утворюються із суміші азоту з киснем під час досягнення температури в зоні горіння 1200...1300 °С. У той же час, цепна реакція утворення NO_x (відповідно до всіма визнаною теорії Зельдовича) виникає за температурою більш за 1500 °С. З цих значень температури починається некерований процес утворення оксидів азоту, що виявляється в збільшенні їх емісії в довкілля. Саме тому всі технологічні способи, що спрямовані на зменшення емісії оксидів азоту, пов'язані зі зниженням температури під час згоряння палива в циліндрі дизеля [21-23]. На це спрямовані «первинні» способи зниження емісії NO_x – тобто такі, що діють на процес згоряння палива (рис. 1) [24, 25].

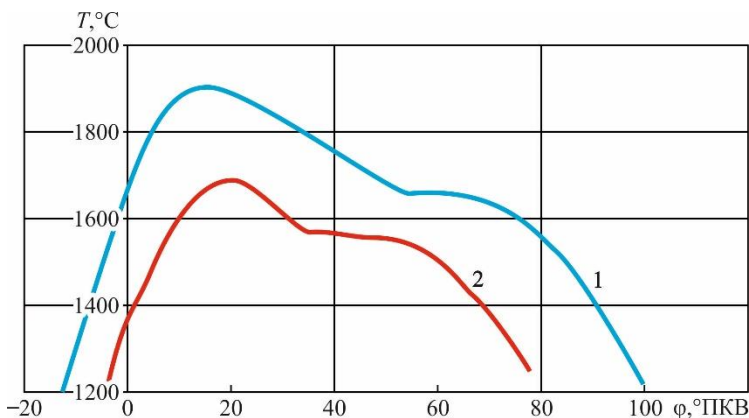


Рис. 1. Зміна температури в циліндрі дизеля під час згоряння палива:

- 1 – без використання первинних способів зменшення емісії NO_x ;
- 2 – з використанням первинних способів зменшення емісії NO_x

Високий ступінь очищення випускних газів судових дизелів (до 90...95 %) від NO_x досягається за допомогою каталітичних генераторів (SCR-реакторів), що встановлюються у випускному колекторі. Цей варіант очищення відноситься до «вторинних» способів зниження емісії NO_x – таких, дія яких спрямована безпосередньо на випускні гази [26, 27]. Використання технології селективного каталітичного поновлення (Selective Catalytic Reduction – SCR) потребує значних додаткових витрат, які за різними оцінками досягають 40...70 \$ США на 1 кВт потужності дизеля [28, 29]. Тобто додаткові витрати на одне судно середньої водотоннажності з сумарною поту-

жністю енергетичної установки (головного двигуна 8000...8500 кВт та допоміжних двигунів потужністю 1200...1500 кВт) становлять 370...700 тис. \$ США [30, 31].

Альтернативою зазначеним способам скорочення емісії шкідливих домішок з газами, що йдуть, може служити використання водопаливних емульсій [32, 33].

Фінська фірма «Wartsila» пропонує застосовувати в дизелях емульговане паливо на базі високов'язкого палива та додавання до 30 % водної фази та 0,5 % спеціальної присадки, що використовується для інтенсифікації горіння та підвищення стабільності утвореної емульсії.

Корпорація MAN-B&W у встановлених на круїзних судах середньообертових дизелях нового покоління L48/60 і L58/64 використовує водопаливну емульсію з 15 % водомісткістю, що готується на базі високов'язкого палива та додатково змішується гідродинамічними ультразвуковими пристроями. Зміст NO_x у випускних газах дизелів йдуть, знизився до 6,7 г/(кВт·год). Відповідно до наведеної на рис. 2 діаграмою, що визначає послідовність введення в дію обмежень викидів NO_x згідно з розробленим ІМО технічним кодексом, використання MAN-B&W водопаливної емульсії забезпечує емісію NO_x з випускними газами практично вдвічі нижче нормативів ІМО.

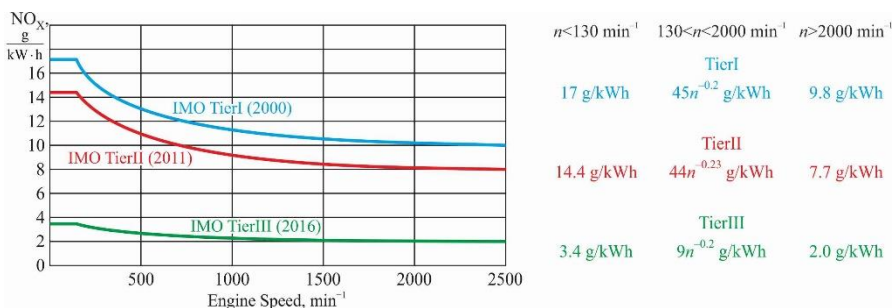


Рис. 2. Вимоги щодо емісії оксидів азоту з випускними газами суднових дизелів

Слід також визначити, що більшість суден морського та внутрішнього водного транспорту, які на теперішній час знаходяться в експлуатації, відноситься до рівнів IMO Tier I та IMO Tier II, тобто ці судна спущені на воду в період 2000...2011 рр. та до 2011...2016 рр. відповідно. За різними оцінками кількість таких суден складає

75...80 % від загального тоннажу всіх суден, що на теперішній час знаходяться в експлуатації. Також необхідно зазначати, що кількість суден, які побудовані після 2016 р. постійно зростає, та їх число відносно загальної кількості суден збільшується рок від року. Забезпечення вимог Tier I щодо емісії оксидів азоту можливо шляхом оптимізації робочого процесу та вдосконаленням конструкційних та експлуатаційних характеристик паливної апаратури високого тиску. Досягнення вимог Tier II та Tier III можливо лише шляхом додаткових методів, до одного з яких відноситься використання водопаливних емульсій.

Постановка завдання. З урахуванням вищевикладеного, завданням дослідження було визначення впливу водопаливних емульсій на емісію оксидів азоту суднових дизелів та оцінка доцільності використання цього способу для підвищення екологічних показників роботи суднових дизелів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Методики та пристрої приготування водопаливних емульсій та прямого впорскування води в циліндри суднових дизелів розробляються, апробуються та впроваджуються давно, але можуть виявлятися малоприсадибними для роботи дизелів на маневрових режимах, що виконуються зазвичай на прибережних акваторіях та безпосередньо в морських та річкових портах, розташованих, як правило, у межах великих міст. Порівняно легко ця проблема розв'язується застосуванням розробленої фірмою Wartsila системи автоматизованого приготування водопаливної емульсії, за умови чіткого визначення допустимого вмісту води в складі емульсії для кожного режиму роботи дизеля. Логічно припустити, що вплив величини вмісту вологи в емульсії далеко не однаково впливає на концентрацію різних компонентів, що входять до складу випускних газів. Тому вивчення співвідношення вмісту вологи в водопаливної емульсії та основні компонентів шкідливих викидів випускних газів суднових двигунів внутрішнього згоряння вимагає додаткового та ретельного вивчення. Перш за все це пов'язано з фізичними властивостями як палива, також й води, які вдвох відносяться до нестисливих рідин. В зв'язку з цим додавання води до певного об'єму палива збільшує загальний об'єм їх суміші. Нестисливість цього об'єму призводить до підвищення часу, яких необхідний для впорскування цієї суміші до циліндра дизеля. Це змушує змінювати закон подачі водопаливної емульсії у порівнянні з подачею лише палива. Найбільш розповсюджений способів розв'язання цього завдання – збі-

льшення кута випередження впорскування палива. Проте критичне збільшення цього значення на часткових навантаженнях дизеля може призвести до зменшення температури у циліндрі у момент впорскування палива, що може стати причиною порушення самозаймання.

Комплексні дослідження можливостей переведення судових дизелів на водопаливну емульсію широкого типорозмірного ряду виконувалось фірмою Wartsila на чотиритактних дизелях серії R. Результати деякої частини цих випробувань, що виконувались на дизелі 6R32E, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Вміст шкідливих речовин у випускних газах судового дизеля 6R32E на режимі номінального навантаження під час використання водопаливної емульсії

Показник	Сорт палива	
	DMA30 (вміст сірки S=0,07 %)	RMG380 (вміст сірки S=0,46 %)
Емісія оксидів азоту NO_x , г/(кВт·год)	12,8	10,9
Емісія оксиду вуглецю CO , г/(кВт·год)	8,7	7,6
Емісія незгорілих вуглеводнів CH , г/(кВт·год)	0,76	0,96
Емісія оксидів сірки SO_x , г/(кВт·год)	3,22	11,41

Аналізуючи результати досліджень, можна відзначити підвищення екологічних показників роботи дизеля під час його експлуатації на водопаливної емульсії.

До недоліків роботи дизелів на водопаливної емульсії слід віднести обмеження їх потужності до рівня не вище 75 % від номінального значення, через недостатню продуктивність паливних насосів. Це пов'язано з необхідністю збільшення циклової подачі водопаливної емульсії відносно циклової подачі чистого палива пропорційно вмісту води в емульсії.

Окремо визначимо результати, щодо визначення питомої витрати палива b_e та емісії оксидів азоту NO_x судового дизеля 6R32E під час використання водопаливної емульсії (комплекс відповідних випробувань на яких вміст води в водопаливної емульсії коливався в діапазоні 0...30 % виконувався на 75 % навантаженні дизеля). Результати досліджень наведені на рис. 3

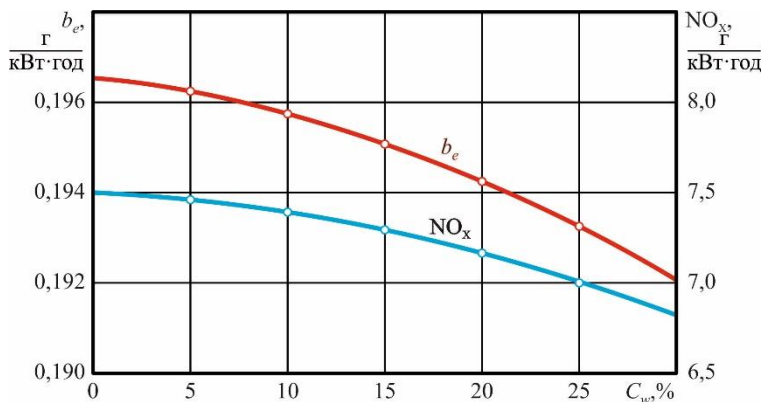


Рис. 3. Залежність питомої витрати палива b_e та емісії оксидів азоту NO_x суднового дизеля 6R32E на режимі 75 % навантаження під час використання водопаливної емульсії

Аналіз результатів, що наведені на рис. 3, свідчить, що додавання води до палива сприяє не лише підвищенню екологічних показників роботи суднових дизелів, але також покращує їх економічність.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Під час розв'язання питання щодо переведення дизельної установки судна на водопаливну емульсію доцільно враховувати ступінь форсування двигунів, сорт палива та умови експлуатації судна. Оптимальна концентрація води у водопаливній емульсії для двигунів із середнім ефективним тиском до 1,5 МПа, як правило, не рекомендується вище за 15...20 %. Для більш форсованих двигунів, з середнім ефективним тиском до 2,0 МПа вона може сягати 30...40 % залежно від вимог, які висуваються до вмісту шкідливих речовин в випускних газах та до економічності двигуна.

Емульсія може готуватися безпосередньо перед використанням палива в двигуні, також і шляхом заповнення витратної цистерни паливом та водою та їх якісного змішування. Визначальними в цьому випадку є властивості палив, що використовуються, та наявність емульгуючих присадок. Таким чином, варіюючи концентрацію води та присадки у водопаливній емульсії, можливості паливної апаратури можна розробити рекомендації щодо застосування водопаливної емульсії у будь-яких умовах експлуатації кожного конкретного суднового дизеля.

Перелік використаних джерел

1. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Автоматизація суднових 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. Kolegaev M., Brazhnik I. Improvement of the process of preparing cargo tanks of crude oil tankers for cargo operations // Technology Audit and Production Reserves. 2024. № 6(1(80)). С. 36–40. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.318534>.
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. 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. Р. 96-106. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
5. Руснак Д.Ю., Сагін 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. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
6. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. 2020. Вип. 41. Одеса: НУ«ОМА». – С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
7. Kolegaev M.O., Brazhnik I.D. Main ways of tanker inert gas system modernization // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. Вип. 38. Одеса: НУ «ОМА». С. 200-216.
8. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. 2020. Вип. 41. Одеса: НУ«ОМА». С. 10-14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
9. 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.
10. Сагін С.В., Побережний Р.В. Аналіз основних способів зниження емісії оксидів азоту дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту // Суднові енергетичні установки: науково-

технічний збірник. 2022. Вип. 44. Одеса: НУ «ОМА». С. 132-141. doi: 10.31653/smf44.2022.132-141.

11. Сагін С.В., Побережний Р.В. Аналіз ефективності використання в суднових дизелях палив різного фракційного та структурного складу // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2022. Вип. 45. Одеса: НУ «ОМА». С. 132-141. doi: 10.31653/smf45.2022.132-141.

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

13. Колегаєв М.О., Бражнік І.Д. Вдосконалення процесу підготовки вантажних танків нафтоналивних суден до вантажних операцій // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. 2024. Вип. 29. Одеса: НУ "ОМА". С. 66–76. DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-66-76.

14. Двудіт 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. <http://doi.org/10.23939/smeu2021.01.001>.

15. 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>.

16. Сагін С.В., Побережний Р.В. Метод управління факторами ризику виникнення аварійних ситуацій під час експлуатації пропульсивних комплексів засобів водного транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2023. Вип. 46. Одеса: НУ «ОМА». С. 110-117. doi: 10.31653/smf46.2023.110-117.

17. 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>.

18. 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. doi: doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.

19. 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.

20. 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.

21. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2023. Вип. 46. Одеса: НУ «ОМА». С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.

22. 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.

23. 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.

24. Колегаєв М.О., Бражнік І.Д. Забезпечення процесу вентиляції вантажних трюмів танкерів за допомогою системи інертних газів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2024. Вип. 48. Одеса: НУ «ОМА». С. 46-53. doi: 10.31653/smf48.2024.46-53.

25. 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>.

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

27. 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.

28. 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.

29. Сагін С.В., Колегаєв М.О., Парменова Д.Г. Зниження ризиків інвазійного забруднення морських акваторії під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2023. Вип. 47. Одеса: НУ «ОМА». С. 131-147. doi: 10.31653/smf47.2023.131-147.

30. Petrychenko O., Levinskyi 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

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

32. 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.

33. 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.