

10.31653/smf44.2022. 132-141

Сагін С.В., Побережний Р.В.

Національний університет «Одеська морська академія»  
**АНАЛІЗ ОСНОВНИХ СПОСОБІВ ЗНИЖЕННЯ ЕМІСІЇ  
ОКСИДІВ АЗОТУ ДИЗЕЛІВ СУДЕН МОРСЬКОГО ТА  
ВНУТРІШНЬОГО ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ**

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Напрямки вдосконалення з сучасних дизелів в даний час визначаються значною мірою екологічними стандартами, суттєво відрізняються в залежності від об'єктів, на які встановлюються дизелі. Тому при розробці робочого процесу енергетичної установки потрібно враховувати не тільки необхідність отримання високих техніко-економічних показників дизелів, а й вимоги, які висивають до паливної апаратури та інших елементів дизеля по забезпеченню зниження токсичності випускних газів відповідно до екологічних стандартів. Це може бути досягнуто шляхом використання:

циклу Міллера з високим (останнім часом все частіше двох-ступінчастим) наддувом [1, 2];

рециркуляції випускних газів [3, 4];

використання систем позациліндрового очищення газів (селективного каталітичного нейтралізатора та фільтра твердих частинок) [5, 6];

займання від стиснення гомогенізованого заряду [7, 8];

подачі водопаливних емульсій [9, 10].

Величина ефективних і екологічних параметрів двигуна визначається його робочим процесом, який залежить від сукупності різних чинників: конструкторсько-технологічних, регульованих, режимних, експлуатаційних [11-13].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Впродовж останнього десятиліття провідними компаніями, що будують двигуни, велася інтенсивна дослідницька і проектне-конструкторська робота по перекладу судових дизелів на дешеві важкі палива і зниженню емісії вихлопних газів у зв'язку із зростаючими вимогами захисту довкілля. Паралельно вирішувалися завдання по підвищенню надійності і ефективності двигунів, зниженню експлуатаційних витрат і підвищенню довговічності [14-16].

В даний час для всіх двигунів встановлюються екологічні стандарти, які істотно розрізняються як по кількості нормованих токсич-

них компонентів, так і по їх гранично допустимим рівням в залежності від призначення двигуна [17-19].

Способи зниження концентрація  $\text{NO}_x$  в випускних газах поділяються на первинні та вторинні. До первинних належать заходи по оптимізації процесу сумішоутворення, подачі і горіння палива, а також вдосконалення конструкції паливної апаратури. Вторинні способи (селективне або неселективне каталітичне відновлення) забезпечують очищення випускних газів, які утворились в циліндрі дизеля, перед їх безпосереднім випуском в атмосферу в додатково встановлених спеціальних пристроях (реакторах) [20-22].

**Постановка завдання.** В даний час актуальним є завдання пошуку шляхів поліпшення ефективних і екологічних параметрів двигуна за технологічними і регульовальними показниками.

Величина ефективних і екологічних параметрів двигуна визначається його робочим процесом, який залежить від сукупності різних чинників: конструкторсько-технологічних, регульованих, режимних, експлуатаційних.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо та виконуємо оцінку основних методів, що забезпечують зниження емісії оксидів азоту дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту

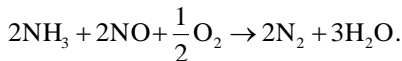
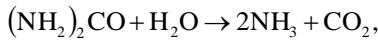
Одним з інтенсивно розвиваючих напрямків зниження емісії  $\text{NO}_x$  є застосування процесу займання від *стиснення гомогенізованого заряду* (PCCI – Premixed Charge Compression Ignition). Реалізація процесу PCCI здійснюється шляхом максимального підвищення ступені гомогенізації суміші палива та повітря до початку згоряння основної порції палива, щоб усунути зони локального перебагачення суміші киснем. Це складне завдання, яке вирішується шляхом оптимізації форми впускних каналів, камери згоряння, конструкції системи подачі палива, ступеня рециркуляції випускних газів, параметрів системи наддуву. Технологія PCCI забезпечує зниження емісії  $\text{NO}_x$  на 35...50 %.

Під час застосування *циклу Міллера* змінюються фази газувипускни. У двигуна, що працює за циклом Тринклера, впускний клапан закривається через 40...60 град повороту колінчатого валу (ПКВ) після нижньої мертвої точки (НМТ) для забезпечення додаткового заповнення циліндра повітрям (дозарядки). У циклі Міллера впускний клапан закривається в діапазоні 0...100 град ПКВ, до НМТ. Це знижує температури у кінці стиснення і відповідно максимальну те-

мпературу згорання. Цикл Міллера розглядається як спосіб значного (до 45...50 %) зниження викидів  $\text{NO}_x$ .

Зниження температури випускних газів має і негативні наслідки. В цьому випадку зменшується потужність турбіни турбокомпресора та погіршується ефективність роботи системи наддува, особливо на малих навантаженнях. Для компенсації зниження маси повітря, що надходить в циліндри через раннє закриття впускного клапана, потрібно підвищення тиску наддуву до 0,5...0,6 МПа. Таке підвищення тиску найкраще реалізується застосуванням двохступеневої системи наддуву. Це сприяє зростанню коефіцієнту корисної дії (ККД) системи наддуву.

Технологія *селективної каталітичної нейтралізації*  $\text{NO}_x$  з використанням як реагента аміаку була запатентована Engelhard Corporation в США в 1957 р., після чого активно використовується в автомобільній промисловості. З 1999 р. система селективного каталітичного відновлення (Selective Catalytic Reduction – SCR) впроваджується на дизелях суден морського та внутрішнього водного транспорту. Система SCR передбачає використання каталізатора на основі каталітично активних сполук металів перехідної валентності (наприклад, пентаоксиду ванадію  $\text{V}_2\text{O}_5$ ) на керамічних носіях кристалічної структури і реалізує протікання двох основних реакцій з утворенням азоту та води:



Принцип дії системи SCR зрозумілий з рис. 1.

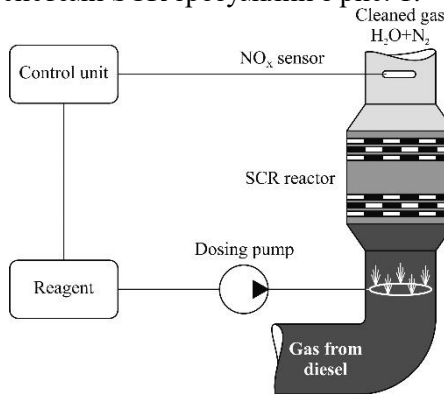


Рис.1. Схема дії системи SCR для очищення випускних від домішок  $\text{NO}_x$

Необхідно відзначити, що до останнього часу SCR і скрубери розглядалися як додаткові зовнішні опції до енергетичних установок. В даний час ці агрегати очистки випускних газів глибоко інтегровані в конструкцію двигуна і є його невід'ємною частиною.

Проблемою застосування SCR є їх робота в зимовий час або в полярних районах, коли потрібно застосовувати спеціальні заходи, пов'язані з запобіганням замерзання водного розчину сечовини, що впорскується в об'єм випускних газів.

Ефективність роботи SCR залежить від температури випускних газів. Зазвичай на малих навантаженнях дизеля SCR відключається шляхом припинення подачі розчину сечовини для виключення викидів аміаку в зв'язку з низькою ефективністю роботи каталізатора. Зазвичай мінімальні температури відпрацьованих газів знаходиться в діапазоні 260...340°C, хоча багато систем можуть працювати протягом короткого часу при більш низьких температурах. Фірми Hitachi Zosen і MAN-Diesel розробляють SCR, які успішно працюють на навантаженні дизелів 10 %.

Ефективність SCR, щодо очищення випускних газів від NO<sub>x</sub>, може досягати 90...95 %. В даний час системи SCR ефективно використовуються в автомобільному транспорті. Застосування системи SCR для очищення випускних газів суднових дизелів носить одиничний характер і обмежується високою вартістю реактора. Крім того, великі масові показники реактора і необхідність його установки над дизелем, змінюють метацентричної висоту судна, що може бути критично в умовах хвилювання моря.

Найбільш логічним, ефективним і технічно обґрунтованим шляхом розв'язання проблем екологічної безпеки двигуна є спеціальне *удосконалення робочого процесу*. Умови перебігу процесів, що виникають в циліндрі, визначають інтенсивність утворення шкідливих речовин.

Викиди твердих частинок ініціюються процесами утворення сажі, на поверхні якої абсорбуються шкідливі речовини, які є продуктами неповного згорання палива. Механізм утворення сажі в камері згорання дизеля представляється як високотемпературний крекінг крапель розпиленого палива, скорочення викидів твердих частинок може бути досягнуто в основному шляхом збільшення дисперсності розпилювання палива за рахунок підвищення тиску впорскування та більш рівномірного розподілу палива за об'ємом камери згорання, уникаючи підвищених концентрацій в пристінкових областях.

Другим нормованим шкідливим продуктом у випускних газах дизеля є оксиди азоту  $\text{NO}_x$ , утворення яких також безпосередньо пов'язане з умовами перебігу процесу згоряння. Прагнення до зниження питомої витрати палива призводить до підвищення динамічності процесу тепловиділення і, як наслідок, до зростання максимальних температур в циклі, рівень яких пропорційній термічному ККД циклу. При цьому швидке зростання температур робочого тіла до досягнення максимуму в циліндрі дизеля визначає кількісну характеристику утворення оксидів азоту, а різке зниження температури випускних газів на такті розширення не залишає часу на перебіг реакцій відновлення  $\text{NO}_x$ .

Що стосується вмісту в випускних газах оксидів сірки, то їх кількість залежить тільки від складу палива, і скорочення викидів  $\text{SO}_x$  не може бути досягнуто шляхом впливу на перебіг процесів, що виникають в циліндрі.

Таким чином, під час розгляду особливостей організації малотоксичних процесів, що виникають в циліндрі дизеля, в першу чергу постає завдання точного управління законом подачі палива, що визначає динаміку процесу тепловиділення. Це завдання дозволяють успішно вирішувати керовані акумуляторні системи подачі Common Rail Systems (CRS), здатні за рахунок формування багатоступінчастого упорскування палива реалізувати практично будь-який закон тепловиділення.

Не менш важливим аспектом організації робочого процесу низько токсичного дизеля є забезпечення спеціальних умов згоряння циклової подачі палива в камері згоряння. Оскільки утворення оксидів азоту є високотемпературним процесом, стає актуальним використання методів стримування зростання температур робочого тіла в циліндрі.

Для більш глибокої адаптації характеристик двигуна до всіх режимів роботи використовується технологія електронного управління зміною фаз газорозподілу – Variable Valve Timing (VVT). Електронне управління процесом газообміну в дизельному двигуні дозволяє поліпшити процеси очищення циліндра від випускних газів і наповнення циліндра свіжим зарядом для всього швидкісного і потужного діапазону його роботи.

Найбільш просто і ефективно система зміни фаз газорозподілу реалізується в разі застосування механізму з двома розподільними валами, коли кожен кулачковий вал керує своєю групою клапанів –

впускних і випускних. Це дозволяє забезпечити керований поворот будь-якого з розподільних валів на необхідний кут.

Надійне, стійке та довгострокове виконання вимог Tier III практично неможливо без використання в конструкції дизеля периферійних пристроїв, що забезпечують додаткове зростання показників екологічної безпеки сучасного дизеля. Периферійні пристрої, поперше, дозволяють змінювати склад свіжого заряду циліндра в забезпечення досягнення максимальної екологічної безпеки, і, подруге, роблять додаткове очищення випускних газів від шкідливих компонентів перед викидом в атмосферу.

*Альтернативні палива* для теплових двигунів традиційно розглядалася з позицій скорочення експлуатаційних витрат або в плані використання поновлюваних джерел теплової енергії. Новий погляд на альтернативні палива продиктований вимогами до забезпечення екологічних показників роботи суден морського та внутрішнього водного транспорту. Виходячи з цього, більшість виробників розглядають природний газ як екологічно чисте паливо, яке може забезпечити вимоги щодо викидів:

- оксидів сірки через відсутність сірки в природному газі;
- вуглекислого газу за рахунок малого вмісту вуглець-вуглецевих зв'язків в паливі, при згоранні якого кінцеві продукти згорання зміщуються до утворення водяної пари;
- незгорілих вуглеводнів і твердих частинок [23].

Цим зумовлюється зростий інтерес до розробок двофазних і газових двигунів. Успішне впровадження отримують двофазні системи низького тиску газу (LP-Gas), що реалізують гомогенний процес згорання палива (рис. 2), також і системи газу високого тиску (HP-Gas) зі згоранням гетерогенної суміші (рис. 3).

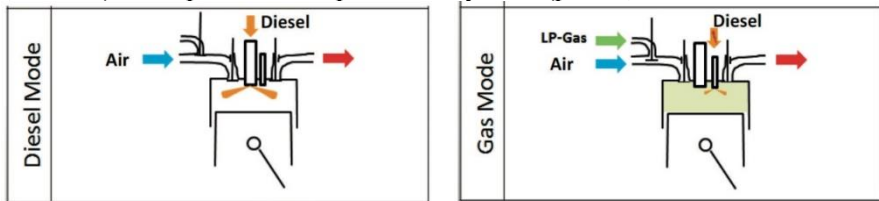


Рис. 2. Принцип дії двофазної системи в двох варіантах (Diesel Mode і Gas Mode) з газом низького тиску (LP-Gas)

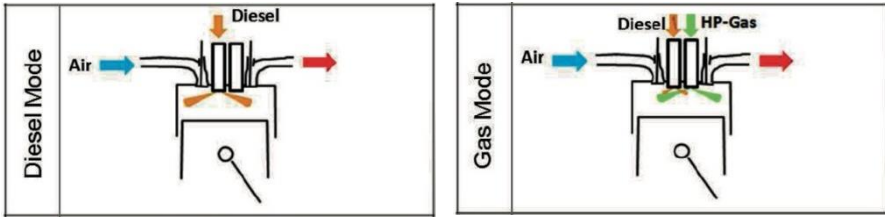


Рис. 3. Принцип дії двохпаливної системи в двох варіантах (Diesel Mode і Gas Mode) з газом високого тиску ((LP-Gas, до 35 МПа)

Перевага газових двигунів перед дизельними по емісії шкідливих компонентів (відповідно до досліджень, що виконано фірмою Yanmar на прикладі дизеля EYG26L) надана на рис. 4.

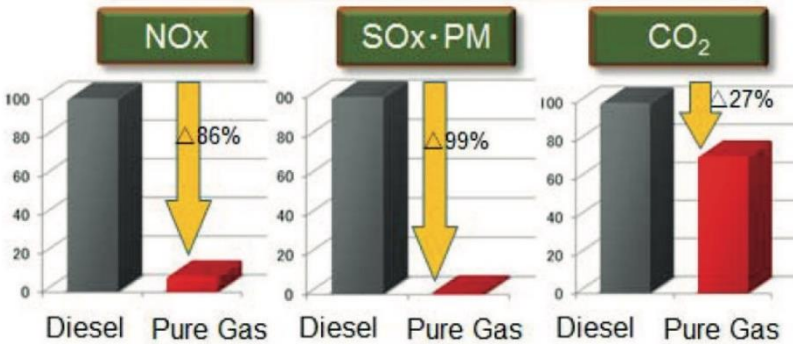


Рис. 4. Зменшення шкідливих речовин у випускних газах газового двигуна EYG 26L під час використання дизельного палива (Diesel) та газового палива (Pure Gas)

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Як основні способи, що сприяють зниженню емісії оксидів азоту дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту та використання яких можливо на дизелях, що знаходяться в експлуатації, необхідно визначити наступні:

1) застосування селективного каталітичного нейтралізатора SCR, що забезпечує 90...95 % зниження викидів NO<sub>x</sub>;

2) переведення дизелів на використання газового палива сприяє зниженню концентрації оксидів азоту в випускних газах на 85...90 %;

3) забезпечення перебігу робочого циклу дизеля за циклом Міллера призводить до 45...50 % зниження емісії оксидів азоту NO<sub>x</sub>;

4) за умовою реалізації процесу займання від стиснення гомогенізоване заряду досягається зниження викидів  $\text{NO}_x$  на 35...50 %.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ратайчук О.В., Сагін С.В. Підвищення ефективності процесу наддува суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 15-19. DOI : 10.31653/smf341.2020.15-19.

2. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 10 - 14. DOI : 10.31653/smf341.2020.10-14.

3. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce  $\text{NO}_x$  Emissions from Marine Diesel Engines // Naše more: International Journal of Maritime Science & Technology. – 2019. – Vol. 66. – Iss. 1. – P. 1 - 9. <https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1>.

4. Sagin S.V., Kuropyatnik A.A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // American Scientific Journal. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67 - 71.

5. Sagin A.S., Zablotskyi Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7–8 (July – August). – P. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.

6. 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.

7. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V., Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Nase More : International Journal of Maritime Science & Technology. – 2022. – Vol. 69. – Iss.1. – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.

8. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. The Use of Exhaust Gas Recirculation for Ensuring the Environmental Performance of Marine Diesel Engines // Naše more : International Journal of Maritime Science & Technology. – 2018. – Vol. 65. – № 2. – P. 78 - 86. [doi.org/10.17818/NM/2018/2.3](https://doi.org/10.17818/NM/2018/2.3).



9. 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. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.

10. Zablotsky Yu.V., Sagin S.V. Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of a Marine Diesel When using Fuel Additives // *Indian Journal of Science and Technology.* – 2016. – Vol. 9. – Iss. 46. – P. 353-362. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i46/107516.

11. Sagin S., Madey V., Sagin A. Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // *Journal Marine Science and Engineering.* – 2022. Vol. 10. – Iss. 10. – P. 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.

12. Zablotsky Yu.V., Sagin S.V. Maintaining Boundary and Hydrodynamic Lubrication Modes in Operating High-pressure Fuel Injection Pumps of Marine Diesel Engines // *Indian Journal of Science and Technology.* – 2016. – Vol. 9. – Iss. 20. – P. 208-216. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i20/94490.

13. Zablotskyi Yu.V., Sagin A.S. Applying of fuel additives in marine diesel engines // *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник.* Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 5 – 17. doi: 10.31653/smf343.2021. 5-17.

14. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник.* – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА».. – С. 5-9. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-9.

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

16. Сагін 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. – Одесса: ОНМУ. – С. 84 - 103.

17. Сагін 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.

18. Сагін С.В., Солодовников В.Г. Применение ультразвуковой обработки топлива для снижения сернистого износа двигателя //

Технические науки – от теории к практике. Сб. ст. по материалам XXXV междунар. науч.-практ. конф. № 6 (31). – Новосибирск: «СибБАС», 2014. – С.42-48.

19. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 132 - 142.

20. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін А.С. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 93 - 107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.

21. Сагін С.В., Столярик Т.О. Аналіз експлуатаційних характеристик моторних мастил суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 69 - 80. doi: 10.31653/smf343.2021.69-80.

22. 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. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 108 - 119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.

23. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píštěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // Journal Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – Iss. 9. – P. 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.