

DOI: 10.31653/smf52.2026.35-44

дата першого надходження: 11.01.26  
дата прийняття статті до друку після  
рецензування: 21.02.26  
дата публікації: 05.05.26

Корбан В.Х.<sup>1</sup>, Шумілова К.В.<sup>2</sup><sup>1</sup>ORCID 0009-0005-5294-9909, <sup>2</sup>ORCID 0000-0003-1222-3730

Національний університет «Одеська морська академія»

## **ЕФЕКТИВНІСТЬ ОЧИЩЕННЯ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЮ ХВИЛЕЮ КРУГОВОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ**

### **Постановка проблеми в загальному вигляді**

Велике значення набуває питання як аналізу стану середовища у районі функціонування суднових енергетичних установок, а й розробка заходів із забезпечення чистоти атмосфери шляхом зменшення викидів з вихлопних труб дизельних двигунів в атмосферу до гранично допустимих концентрацій, встановлених на Стокгольмській конференції ООН у 1972 р.

**Занят практики:** необхідність пошуку оптимальних методів зниження викидів в атмосферу шкідливих речовин, які створюються в процесі роботи суднових енергетичних установок при згорянні палива.

**Об'єкт дослідження** – вихлопні гази суднових енергетичних установок.

**Предмет дослідження** – електромагнітна хвиля кругової поляризації.

### **Формулювання мети та постановка завдання дослідження.**

Метою даного дослідження є вироблення пропозицій щодо вдосконалення методів та технічних засобів запобігання забруднення навколишнього середовища при функціонуванні суднових енергетичних установок. Тому завданням дослідження є пошук альтернативного методу очищення вихлопних газів судового двигуна та виміру концентрації шкідливого забруднення, для вирішення проблем екологічної безпеки морських дизельних двигунів.

**Методи дослідження:** в дослідженні використано метод очищення вихлопних газів суднових енергетичних установок електромагнітною хвилею кругової поляризації, а також метод вимірювання концентрації газів з вихлопних труб суднових енергетичних устано-

вок з використанням неполяризованої електромагнітної хвилі на випромінювання і елементи матриці розсіяння Мюллера електромагнітної хвилі, відбитої від газового об'єму, які відповідають концентрації вихлопних газів суднового дизеля.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Одні з найнебезпечніших забруднень, таких як оксиди азоту, викиди яких регулюються вимогами МАРПОЛ 73/78 (Міжнародна конвенція щодо запобігання забрудненню з суден) [1], при згорянні дизельного палива суднового двигуна розглянуті в дослідженні [2]. Зазначено, що ефективно очищення вихлопних газів від оксидів азоту забезпечують каталітичні системи відновлення. Однак, через використання сечовини як реагента в цих системах, збільшуються викиди вуглекислого газу, що викликає утворення парникового ефекту, що сприяє глобальному потеплінню.

Збільшення концентрації оксидів азоту у вихлопних газах дизельного двигуна при використанні палива з вмістом сірки (не більше 0,1 %) досліджено в роботі [3]. Показано, що зміна динамічних і теплових навантажень, що виникають при використанні палива зі знизеним вмістом сірки в судових дизельних двигунах призводить до виникнення аварійних ситуацій. Для управління ризиком таких аварійних ситуацій запропоновано переконфігурацію паливної системи високого тиску, зі зміною кутів випередження подачі палива.

В статті [4] запропоновано методи зменшення шкідливих викидів судових дизелів, зокрема системи рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) та впорскування води. Досліджено ефективність використання рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) низького тиску та їх вплив на екологічні та технічні характеристики. Також представлено способи зниження емісії оксидів азоту дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту, а саме: застосування селективного каталітичного нейтралізатора SCR (забезпечення 90-95 % зниження викидів NO<sub>x</sub>); переведення дизелів на використання газового палива (зниження концентрації оксидів азоту в випускних газах на 85-90 %); забезпечення перебігу робочого циклу дизеля за циклом Міллера (призводить до 45-50 % зниження емісії оксидів азоту NO<sub>x</sub>) та ін.

Питання екологічної стійкості судових дизельних двигунів при використанні біодизельного палива дизелів MAN-B&W Diesel Group 5S60ME-C8 та Daihatsu Diesel 6DL-16, що працюють на нафтовому паливі та біодизельному паливі, висвітлено у статті [5]. Ефективність

використання біопалива, підтверджена зниженням концентрації оксидів азоту у вихлопних газах. Встановлено, що використання біопалива забезпечує зниження концентрації оксидів азоту у вихлопних газах на 14,71-25,13% та підвищує екологічну стійкість судових дизельних двигунів на 13,75-29,42%, але при цьому збільшує питому ефективну витрату палива. Були визначені оптимальні кути випередження впорскування палива, що забезпечують найкращі екологічні характеристики дизельних двигунів.

Альтернативні методи [6], такі як очищення вихлопних труб і використання паливних сумішей, що містять біодизель, були запропоновані як індикатор ефективності методів управління екологічною безпекою. Встановлено, що ці методи відповідають вимогам Конвенції MARPOL, а саме (співвідношення  $SO_2$  до  $CO_2$  у діапазоні 2,29-4,17 (у сферах спеціального екологічного контролю) та в діапазоні 6,46-20,83 (поза зоною спеціального екологічного контролю). Однак використання очищення відпрацьованих газів за допомогою скрубберної обробки збільшує енергоспоживання для забезпечення цього процесу, оскільки при використанні очищення вихлопних газів додаткові втрати потужності досягають 237-278 кВт.

Експерименти підтвердили низький рівень екологічної стійкості паливної суміші (включаючи біодизель), але цей метод потребує меншого енергоспоживання і характеризується простішим додатковим обладнанням, а також рекомендується як основний метод екологічної безпеки для морських транспортних суден.

Використання скрубберів [7] для зменшення вмісту сірки в морських дизельних двигунах є досить надійним методом експлуатації суден. Дослідження показали, що викиди  $SO_x$  зменшуються до 95%, а викиди твердих частинок (PM) – на 60%.

Актуальні питання захисту атмосфери від викидів токсичних сполук із вихлопної системи судової дизельної установки за допомогою методів зменшення викидів, зокрема постачання паливних сумішей морського дизельного палива (MDO) та ефіру рапсової олії (RME) (MDO/RME) до двигуна, а також зміни параметрів упорскування пального та кутів таймінгу впорскування, показані в дослідженні [8]. Доведено, що ці процеси зменшують викиди оксиду азоту та вуглекислого газу, особливо при більших навантаженнях двигуна, а зменшення кута упередження впорскування явно зменшує вміст  $NO_x$  у вихлопних газах.

Способи зменшення забруднення повітря токсичними викидами з вихлопних труб морських дизельних установок, проблеми декарбонізації судноплавства, екологічні та інноваційні рішення, для зменшення впливу суднового палива на довкілля, а також роль людського фактору у підтримці сталого довкілля, які розглянуті в сучасних дослідженнях [9-13], представляють методи контролю викидів шкідливих речовин в атмосферу та експлуатацію різних газочисних установок. Однак поки що ефективність установок з контролю навколишнього середовища та газового очищення ще не є достатньо високою, і вирішення питань екологічної безпеки морських дизельних двигунів є нагальною проблемою сучасного судноплавства.

### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Розглянемо метод очищення вихлопних газів суднових енергетичних установок електромагнітною хвилею кругової поляризації. Зазначимо, що кругова поляризація – це стан поляризації, при якому вектор електричного поля у кожній точці електромагнітного поля хвилі має постійну величину. Проте його напрямок обертається з постійною швидкістю в площині, яка перпендикулярна до напрямку хвилі, що поширюється.

Припустимо, що газові частинки (тверді, газоподібні та рідкі), які випромінюються з вихлопних труб суднових енергетичних установок, рухаються по колу під впливом електромагнітної хвилі кругової поляризації. Такі частинки в магнітному полі з круговою поляризацією піддаються впливу сили Лоренца:

$$F_L = q|B \cdot V|, \quad (1)$$

де  $q$  – заряд частинки;

$B$  – вектор індукції магнітного поля;

$V$  – це вектор швидкості зарядженої частинки.

Враховуючи векторний добуток, формула (1) буде записана як (2):

$$F_L = q|V||B|\sin \alpha, \quad (2)$$

де  $\alpha$  – кут між векторами  $B$  і  $V$ .

Частинки в магнітному полі хвилі рухаються вздовж траєкторії у формі спіральної лінії, вісь якої паралельна вектору індукції маг-

нітного поля хвилі, а радіус траєкторії руху визначається за умовою (3):

$$R = \frac{mV \sin \alpha}{qB}, \quad (3)$$

де  $m$  – маса частинки.

Кутовий момент частинки позначається як (4):

$$M = mVR \sin \alpha \quad (4)$$

або, враховуючи формулу (3), рівняння (4) записується як (5):

$$M = \frac{m^2 V^2 \sin^2 \alpha}{qB}. \quad (5)$$

Нехай дві частинки рухаються з однаковою швидкістю, але мають різні маси  $m_1$  і  $m_2$ . Заряди частинок рівні за величиною і протилежні за знаком. Частинки знаходяться на такій відстані одна від одної, що сили взаємного притягання можна ігнорувати. Оскільки заряди частинок мають протилежний знак, під впливом сили Лоренца (2) вони обертаються вздовж правої та лівої спіралей. Тоді загальний крутний момент руху частинок  $M_\Sigma$  коли вони обертаються, буде дорівнювати алгебраїчній сумі їхніх моментів, тобто:

$$M_\Sigma = \frac{m_1^2 V^2 \sin^2 \alpha}{qB} - \frac{m_2^2 V^2 \sin^2 \alpha}{qB} \dots \quad (6)$$

Після відповідного перетворення (6) загальний крутний момент частинок буде записаний як (7):

$$M_\Sigma = \frac{(m_1^2 - m_2^2) V^2 \sin^2 \alpha}{qB} \quad (7)$$

або, користуючись одиничною різницею квадратів, рівняння (7) буде записано як (8):

$$M_\Sigma = \frac{m_\Sigma \Delta m V^2 \sin^2 \alpha}{qB}, \quad (8)$$

де  $m_\Sigma$  – сума мас частинок;  $\Delta m$  – різниця в масі частинок.

Якщо система, що складається з рівної кількості позитивно та негативно заряджених частинок різної маси, проходить через магнітне поле електромагнітної хвилі з круговою поляризацією, то загальний кутовий момент її руху буде відрізнятися від нуля і дорівнювати нулю при однаковій масі частинок.

Якщо частинки вихлопних газів суднової енергетичної установки утворюють електричний диполь, що складається з двох протилежних зарядів однакової абсолютної величини і тісно з'єднаних між собою, то основною фізичною характеристикою такого диполя є дипольний момент  $P$  (9):

$$P = qr, \quad (9)$$

де  $r$  – вектор, спрямований від негативного заряду до позитивного, довжина якого дорівнює відстані між центрами зарядів.

Для кожного дипольного заряду в магнітному полі хвилі сили Лоренца діють протилежно спрямовані на заряди з різними знаками. Внаслідок цього диполь піддається впливу моменту сил Лоренца  $M_{\mathcal{L}}$  (10), які орієнтують його вздовж напрямку, перпендикулярного площині, утвореній індукційними векторами  $\xi_{mn}$  магнітного поля та вектором швидкості електричного диполя  $V_{\mathcal{D}}$ :

$$M_{\mathcal{L}} = P \cdot |V_{\mathcal{D}} \cdot B|, \quad (10)$$

Розглянемо взаємодію електричного диполя з магнітним полем кругової поляризаційної хвилі: коли заряди частинок концентровані в різних масах, між ними немає жорсткого зв'язку. Тоді кожен із зарядів має обмежений ступінь свободи, що дозволяє йому обертатися спіраллю в полі кругової поляризації, а радіус такої траєкторії буде обмежений довжиною та природою зв'язку між зарядами. Щоб врахувати параметри зв'язку між зарядами, у формулі кутового моменту (8) вводимо коефіцієнт вихору  $K_B$ , значення якого змінюється від нуля до одного. Тоді рівняння (8) буде записано як (11):

$$M_{\Sigma} = \frac{K_B m_{\Sigma} \Delta m V^2 \sin^2 \alpha}{qB}. \quad (11)$$

За відсутності взаємодії між зарядами,  $K_B$  дорівнює одиниці, і у випадку об'єднання зарядів у жорсткий диполь –  $K_B$  дорівнює нулю.

Спіральний електричний диполь переміщає масу частинок вихлопних газів, які під впливом сили тяжіння викидаються з магнітного поля хвилі у певний контейнер, звідки їх утилізують. Швидкість падаючих частинок під час обертання визначається формулою Стокса (12):

$$v = 1,3 \cdot 10^{-2} \rho_c r_c^2, \quad (12)$$

де  $\rho$  – густина частинок, г/см<sup>3</sup>;  $r$  – радіус частинок, мкм.

Основна частинка вихлопних газів концентрується у вузькому струмені обертального вихору.

Для вимірювання концентрації частинок, що випромінюються з вихлопних труб судових енергетичних установок, використовують неполяризовану електромагнітну хвилю на випромінювання, матрицю Мюллера електромагнітного енергетичного розсіювання на випромінюваних частинках, коефіцієнти яких відповідають концентрації газових компонентів частинок і параметрам поляризації відбитої хвилі. Взаємозв'язок між відбитим і опроміненим об'ємом газу електромагнітної хвилі з матрицею розсіювання Мюллера записується як (13):

$$\begin{bmatrix} I_{vid} \\ Q_{vid} \\ U_{vid} \\ V_{vid} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} & \xi_{13} & \xi_{14} \\ \xi_{21} & \xi_{22} & \xi_{23} & \xi_{24} \\ \xi_{31} & \xi_{32} & \xi_{33} & \xi_{34} \\ \xi_{41} & \xi_{42} & \xi_{43} & \xi_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{vin} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

де  $I, Q, U, V$  – параметри поляризації електромагнітної хвилі, що випромінюється ( $vin$ ) та відбивається ( $vid$ );  $\xi_{mn}$  – діелектрична проникність газових компонентів на виході вихлопної труби СЕУ.

Розв'язання рівняння (13) дозволяє визначити концентрацію газових компонентів за першим стовпцем елементів матриці Мюллера:

$$\begin{aligned}\xi_{11} &= \frac{I_{\text{вiд}}}{I_{\text{вun}}}; \\ \xi_{21} &= \frac{Q_{\text{вiд}}}{I_{\text{вun}}}; \\ \xi_{31} &= \frac{U_{\text{вiд}}}{I_{\text{вun}}}; \\ \xi_{41} &= \frac{V_{\text{вiд}}}{I_{\text{вun}}}.\end{aligned}\tag{14}$$

Оскільки параметр  $I_{\text{вun}}$  залишається сталим у процесі експериментальних досліджень, ми припускаємо, що він дорівнює одиниці, і тоді рівняння (14) переписується як:

$$\xi_{11} = I_{\text{вiд}}; \xi_{21} = Q_{\text{вiд}}; \xi_{31} = U_{\text{вiд}}; \xi_{41} = V_{\text{вiд}}.\tag{15}$$

У рівнянні (15) кожний з елементів матриці Мюллера  $\xi_{11} - \xi_{41}$  визначає концентрацію вихлопного газу на виході СЕУ, а їх сума  $\xi_{\Sigma} = \xi_{11} + \xi_{12} + \xi_{31} + \xi_{471}$  визначає повну концентрацію об'єму вихлопних газів.

### **Висновки і перспективи подальших досліджень.**

1. Запропоновано метод очищення вихлопних газів суднових енергетичних установок за допомогою електромагнітної хвилі круглової поляризації.

2. Концентрація газової суміші вимірюється шляхом її опроміювання неполяризованою хвилею з використанням першого стовбці елементів матриці розсіювання Мюллера.

3. У майбутньому рекомендується розробити функціональну схему пристрою для вимірювання концентрації газових компонентів, що виділяються з вихлопних труб суднових енергетичних установок, за допомогою високоточного мікрохвильового методу, який використовує здатність молекул газу поглинати електромагнітне випромінювання певної частоти.

### *СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ*

1. Міжнародна конвенція щодо запобігання забрудненню з суден (MARPOL 73/78). Додаток VI. Правила запобігання забрудненню

повітря з суден. – London : International Maritime Organization, 2017. – 86 с.

2. Kuropyatnyk, O. Maintaining the environmental friendliness of seagoing vessels when using catalytic reduction systems for marine diesel engines. *Transport Development*. 2025. Vol. (3(26)), P. 73-86. <https://doi.org/10.33082/td.2025.3-26.05>

3. 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. Vol. 5(1(73)). P. 37–43. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>

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

5. Sagin S., Kuropyatnyk O., Matieiko O., Razinkin R., Stoliaryk T., Volkov O. Ensuring operational performance and environmental sustainability of marine diesel engines through the use of biodiesel fuel. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol.12(8). id.1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>

6. Сагін, С. В., Сагін, С. С., Мадей, В. В. Аналіз методів управління екологічною безпекою навігаційного переходу суден морського транспорту. *Technology Audit and Production Reserves*. 2023. Vol. 4(3(72)). P. 33-42. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>

7. Tran T.A. Research of the Scrubber Systems to Clean Marine Diesel Engine Exhaust Gases on Ships. *Journal of Marine Science: Research & Development*. 2017. Vol 7(6). P. 243. DOI: 10.4172/2155-9910.1000243

8. Witkowski, K. Research of the Effectiveness of Selected Methods of Reducing Toxic Exhaust Emissions of Marine Diesel Engines. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8(6). 452 p. <https://doi.org/10.3390/jmse8060452>

9. Behrends B. Particulate Matter emission reduction in international maritime shipping. *German Environment Agency*. 2025. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7816>

10. Голяков В. А., Данилов К. С., Шумілова К. В. Еколого-енергетична ефективність експлуатації контейнеровозів на міжконтинентальних перевезеннях. *Суднові енергетичні установки*. 2025. Вип. 50. С. 26-41. DOI: 10.31653/smf 50.2025.26-41.

11. Шумілова К. В., Шумілов Д. І. Багатоаспектний вплив судноплавства і діяльності людини в ракурсі парадигми управління ресурсами світового океану. *Суднові енергетичні установки*. 2023. Вип. 47. С. 217-230. <https://doi.org/10.31653/smf47.2023.217-230>

12. Шумілова К. В. Декарбонізація судноплавства – шляхи переходу на альтернативну енергетику. *Матеріали III Міжнародної науково-практичної морської конференції, МРР&О-2021, X.: Видав. Іванченка І.* Одеськ. нац. мор. ун-т. 2021. С. 123-130. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36574.15681>

13. Шумілова, К., & Константінов, О. (2025, жовтень 16). Екологічні та інноваційні рішення для зменшення впливу судового палива на морське середовище. *Друга Всеукраїнська науково-практична конференція «Сталий, інклюзивний, смарт розвиток: наукові підходи до вирішення сучасних глобальних і локальних викликів»*, Тернопіль. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1737061>