

**Урум Н.С.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Маннапова О.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Лісовський С.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Рященко О.І.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

## **АНАЛІЗ ОСНОВНИХ МЕТОДІВ ЗНИЖЕННЯ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ SO<sub>x</sub> З МОРСЬКИХ СУДЕН**

*Метою статті є комплексний аналіз застосовуваних методів зниження шкідливих викидів оксидів сірки з морських суден та перспектив їхнього застосування у майбутньому. Поставлена мета досягається шляхом глибокого аналізу сучасних джерел інформації, що стосуються питань забезпечення екологічної безпеки експлуатації суден, а також безпосередньо методів, які пов'язані з розробкою способів зменшення впливу шкідливих викидів з морських суден як у портах, так і у відкритому морі. Встановлені основні альтернативні шляхи досягнення поставленої мети. Вони концентруються біля таких основних стрижнів досліджень: по-перше, перехід на принципово нової якості паливо з низьким вмістом сірки, по-друге, очищення вихлопних газів на судні шляхом встановлення спеціальних установок – скрубєрів і по-третє, широке застосування зрідженого природного газу шляхом переобладнання суднових енергетичних установок існуючих суден. Доведено, що суднові дистильтані палива, які водночас є мастильним матеріалом для рухомих деталей паливної апаратури, значно зменшує ступінь зносу деталей двигуна. З іншого боку, використання низькосірчистих суднових дистильтанних палив у суднових двигунах сприяє інтенсивному зношуванню прецизійних пар паливної апаратури. Тобто показано, що зниження вмісту сірки в паливі одночасно погіршує протизносні властивості елементів паливної апаратури через видалення поверхнево-активних речовин. У зв'язку з цим в статті стверджується, що традиційні палива, які мають відносно велику частину сірки і застосовуються при експлуатації суднових дизелів, не дозволяють виконати вимоги конвенції. Пропонується для досягнення норм емісії вихлопних газів застосовувати паливо з низьким вмістом сірки, встановлювати скрубєри або переводити судна на альтернативне газове паливо. Найбільш суттєвим результатом дослідження є критичний аналіз недоліків і переваг можливих підходів щодо зниження емісії оксидів сірки, який свідчить, що у найближчі часи на судах морського та річкового флоту в основному будуть застосовуватися низькосірчасті маслов'язкі дистильтані палива із вмістом сірки. Подальшим напрямом роботи є проведення досліджень є вивчення змащувальної здатності низькосірчастого палива на зношування прецизійних пар паливної апаратури.*

**Ключові слова:** морське судно, паливо, оксид сірки, газове паливо, скрубєр, двигун.

**Постановка проблеми.** Сучасний судновий двигун як найбільш складну та дорогу частину має паливну апаратуру (ПА). Складність та дороговизна ПА суттєво впливає на надійність та економічність роботи двигуна. Причому складність і вартість апаратури напряму корелюють з екологічними показниками суднових двигунів. Для їх покращення намітилася

тенденція до зменшення вмісту сірки в бункерних паливах. Відповідно до вимог Додатка VI конвенції МАРПОЛ 73/78 найбільш жорсткі вимоги вироблені для районів контролю шкідливих викидів – SO<sub>x</sub> Emission Control Areas (SECA). Географія зон SECA швидко розширюється, і на теперішній час ці зони займають близько 10 % акваторії світового океану.

Суднові дистильтані палива (СДП) є мастильним матеріалом для рухомих деталей ПА, ступінь зносу яких багато в чому визначає надійну роботу двигуна. Прецизійні вузли паливного насоса високого тиску (ПНВТ) та форсунок є найбільш схильними до зносу. Однак використання низькосірчистих СДП у суднових двигунах показало високу інтенсивність зношування прецизійних пар ПА. Тобто одночасно зі зниженням вмісту сірки в паливі погіршуються протизносні властивості прецизійних пар ПА через те, що при видаленні сірки з палива у процесі гідроочищення також видаляються поверхнево-активні речовини (ПАР), які сприяють утворенню змащувальних плівок.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасній літературі докладно розглядаються завдання, що стосуються посилення екологічних норм щодо викидів оксиду сірки ( $SO_x$ ), і проблеми, пов'язані з цим. Відомо, що скорочення викидів сірки досягається переходом на більш якісне паливо з низьким вмістом сірки (дистильтані), встановленням установок для очищення вихлопних газів (скрубери) і переобладнанням існуючих суден для роботи на зрідженому природному газі (СПГ). Але лише кілька досліджень оцінюють вказані альтернативи, які можуть зменшити викиди в морське повітря [1; 2], а ще менше робіт розглядають процедуру вибору найкращої технології для прийняття відповідного рішення [3; 4].

У роботі [5] проведено емпіричний аналіз трьох альтернатив щодо скорочення викидів сірки, що розглядаються корейськими судноплавними компаніями. З цієї метою проведено опитування і застосовано метод нечіткого аналізу ієрархій для дослідження сприйняття судноплавними компаніями та фактичної реакції на регулювання викидів  $SO_x$  із суден. Обробка результатів опитування свідчить, що інвестиційні витрати є найбільш значущим фактором серед інших підкритеріїв, що стосуються реагування на процеси регулювання викидів  $SO_x$ . Аналіз корейських судноплавних компаній виявив, їх розмір суттєво впливає на визнання та вибір напрямів реагування на викиди оксиду сірки.

Суднопластво традиційно вважалось найменш екологічно шкідливим видом вантажних перевезень [6]. Останні дослідження все частіше ставлять під сумнів цю думку, оскільки спостереження зосереджуються як на викидах парникових газів, так і на викидах забруднюючих речовин, до яких відносяться оксиди азоту, нітрогену та тверді

частинки з суден. У роботах [7–9] виконані типові дослідження щодо розрахунку кількості різноманітних забруднюючих речовин, що викидаються з суден. Дані роботи присвячені детальному розгляду викиду не тільки оксиду сірки, а й взаємодії цього газу з іншими забруднюючими речовинами й комплексному впливу викидів на оточуюче середовище.

У літературі [10; 11] проведено аналіз економічних вигод застосування різних альтернатив зменшення викидів забруднюючих речовин в оточуюче морське повітря і порівняння окремих способів зменшення цих впливів [12; 13].

**Постановка завдання.** Метою статті є комплексний аналіз застосовуваних методів зниження шкідливих викидів  $S_{ox}$  з морських суден та перспектив їхнього застосування у майбутньому.

**Викладення основного матеріалу.** Посилення вимог до вмісту  $SO_x$  у вихлопних газах (ВГ) суднових енергетичних установок (СЕУ) особливо стосується районів контролю шкідливих викидів SECA. Аналіз свідчить, що традиційні палива, застосовувані при експлуатації суднових дизелів, не дозволяють виконати вимоги конвенції. Для досягнення норм емісії ВГ необхідно використовувати паливо з вмістом сірки менше 0,1 %, встановлювати скрубери або переводити судна на альтернативне газове паливо – скраплений природний газ (СПГ).

*Перехід на бункерування скрапленим природним газом як найбільш екологічним енергоресурсом є кардинальним рішенням у разі ухвалення всіх потенційних обмежень на суднове паливо. На теперішній час компанії MAN Diesel & Turbo, Wartsila та інші дизелебудівні фірми випустили для пасажирських суден моделі газодизельних двигунів, в яких СПГ використовується як паливо. У найближчій перспективі газодизельні двигуни на СПГ застосовуватимуться на поромках, каботажних та лінійних суднах тощо.*

Для заправки судна СПГ використовуються спеціалізовані берегові або плавучі заправні комплекси. На берегових причалах розміщуються ізольовані цистерни зберігання газу, який надходить з портового заводу з СПГ, трубопроводи та насоси подачі палива. Плавучі заправні комплекси мають у своєму складі цистерни СПГ, подача палива з яких здійснюється спеціальними криогенними насосами по ізольованим трубопроводам.

Проблеми забезпечення пожежної безпеки та обмеження щодо обсягу та маси паливних ємностей (за тієї ж сумарної ефективності обсяг паливних ємностей в 2 рази перевищує обсяг ємностей

для дистилітного палива) не дозволяють використовувати СПГ на морських транспортних судах.

Переваги використання СПГ як моторного палива:

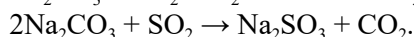
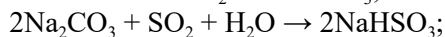
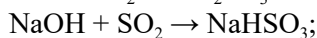
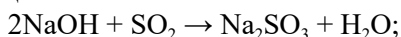
- значно знижена вартість за еквівалентною теплотворною здатністю у порівнянні з нафтовим моторним паливом;
- зменшення на 90–95 % емісії  $\text{NO}_x$ , на 20–25 %  $\text{CO}_2$ , відсутність  $\text{SO}_x$ , твердих частинок та сажі;
- зменшення абразивного зносу паливної апаратури.

Однак використання СПГ має ряд недоліків:

- слабка розвиненість інфраструктури поставок зрідженого газу на судна;
- збільшення часу знаходження судна у порту через необхідність заправки паливом тільки на спеціалізованих причалах поза часом проведення вантажно-розвантажувальних робіт;
- відсутність реально працюючих суден-бункерувальників / бункерних барж для перевезення СПГ;
- недостатність кваліфікованих кадрів для роботи на судах-газоходах;
- потенційна небезпека вибуху судна-газоходу у разі виходу з ладу кулінг-системи або суднової силової установки;
- висока вартість переобладнання СЕУ на діючих судах;
- неприйнятність для трампового судноплавства через відсутність інфраструктури постачання цього виду палива в портах світу;
- невеликий запас ходу;
- дуже складна, багатостадійна процедура передачі палива, пов'язана з необхідністю продування труб інертним газом;
- високі вимоги законодавства до місць розташування ємностей зберігання СПГ;
- значна ціна помилки дії екіпажу при прийнятті бункера на борт та під час виконання рейсу.

Отже, СПГ – це паливо майбутнього.

*Використання технології очищення димових газів шляхом застосування на судах скрубєрів.* У скрубєрах очищення газу від оксидів сірки ( $\text{SO}_2$ ) відбувається за абсорбційною технологією, коли при контакті розчину  $\text{NaOH}$  з ВГ відбуваються такі реакції:



Відпрацьований розчин та вловлений пил збираються в нижній частині скрубєра. Очищений газ

відводиться через газоходи, які розміщені в верхньої частині апарату.

Перевагою скрубєрів є можливість використання на судах традиційних високосірчистих палив з низьким рівнем цін, інфраструктура постачання суден бункерним паливом не змінюється. Однак сама технологія використання скрубєрів у судових енергетичних установках остаточно не відпрацьована. Необхідно тримати на судні значний запас 50 %-го розчину каустичної соди для роботи скрубєра. Після роботи пристрою необхідно скидати за борт досить багато відпрацьованих розчинів солей. Тому необхідно контролювати за чотирма параметрами викиду розчину солі за борт.

На наступному етапі обмежень МАРПОЛ може заборонити скидання у воду цих хімічно нейтральних відходів. Поряд з високою вартістю переоснащення судна, скрубєри мають великі масо-габаритні показники. Основна маса виробленого обладнання впливає на стійкість судна, що унеможливує установку скрубєра для деяких типів суден, особливо для пасажирського флоту.

*Застосування низькосірчистого високов'язкого залишкового палива.* Крім трьох визначених дистилітів (DM) та ряду залишкових марок (RM), на ринку з'явилися марки залишкового палива (RM) із вмістом сірки менше 0,1 % – ультранизкосірчисті палива (ULSFO). Вони представляють собою суміш продуктів і не є традиційними дистилітами, використовуваними для морських енергетичних установок.

Так, паливо суднове екологічне (ПСЕ) через гібридні властивості займає проміжне положення між мазутними і дистилітними паливами. В'язкість ПСЕ вища, ніж у DMA, що забезпечує оптимальну в'язкість при упорскуванні і, як наслідок, сприяє ефективному розпиленню палива у камері згорання.

За змащувальними властивостями ПСЕ перевищує DMA, томе немає потреби використовувати хімічні присадки. Високопарафініста основа ПСЕ сприяє займистості палива, але температура його плинущі вища, ніж у дистилітних продуктів, що потребує обігріву паливних танків та системи.

Низькосірчисті мазути мають підвищений вміст алюмосилікатів, що призводить до збільшення швидкості зносу в 100 та більше разів, несумісні з іншими паливами та піддаються стресовій корозії.

Для зменшення вмісту алюмосилікатів потрібна дуже складна система очищення та

кондиціонування палива для видалення з нього алюмосилікатів, яка працюватиме на більш високих температурах та підвищить рекомендовану витрату палива.

Нестабільність низькосірчастого палива призводить до збільшення викидів у вигляді великої кількості вогнетривких вугілеводнів, видимих викидів твердих частинок, смоли та шламу під час зберігання, а також викликає відкладення на форсунках та прогорання клапанів. Палива з низькими характеристиками стійкості страждатимуть від прискороного розкладання, що призведе до зниження якості їх займання, погіршення роботи двигуна. Небажані хімікати в мазуті можуть призвести до стресової корозії. Морські сепаратори працюють на стандартних паливах та мастилах.

Тому робота з корозійними середовищами може призвести до серйозних поломок обладнання.

**Висновки.** Аналіз підходів щодо зниження емісії SO<sub>x</sub> свідчить, що у найближчі часи на судах морського та річкового флоту в основному будуть застосовуватися низькосірчасті маслов'язкі дистилатні палива із вмістом сірки менше 0,1%. Прийняття Полярного кодексу зумовить повну заборону застосування в арктичних регіонах важкого залишкового палива на всіх типах суден.

Застосування низькосірчастих маслов'язких дистилатних палив через його більш низьку змащувальну здатність збільшує зношування прецизійних пар паливної апаратури. Тому подальші дослідження повинні охоплювати вивчення змащувальної здатності палива.

#### Список літератури:

1. Vutukuru S., Dabdub D. Modeling the effects of ship emissions on coastal air quality: A case study of southern California. *Atmospheric Environment*. 2008. Vol. 42. № 16. P. 3751–3764. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.12.073.
2. Lin B., Cherng-Yuan Lin. Compliance with international emission regulations: Reducing the air pollution from merchant vessels. *Marine Policy*. 2006. Vol. 30. № 3. P. 220–225, DOI: 10.1016/j.marpol.2005.01.005.
3. Shaban H.I., Elkamel A., Gharbi R. An optimization model for air pollution control decision making. *Environmental Modelling & Software*. Vol. 12, № 1. 1997. P. 51–58. DOI: 10.1016/S1364-8152(96)00008-4.
4. Selection of techniques for reducing shipping NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> emissions / Z.L. Yang et al. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2012. Vol. 17. № 6. P. 478–486. DOI: 10.1016/j.trd.2012.05.010.
5. A-Rom Kim, Young-Joon Seo. The reduction of SO<sub>x</sub> emissions in the shipping industry: The case of Korean companies. *Marine Policy*. 2019. Vol. 100. P. 98–106. DOI: 10.1016/j.marpol.2018.11.024.
6. Maritime shipping and emissions: A three-layered, damage-based approach / H. Lindstad et al. *Ocean Engineering*. 2015. Vol. 110, Part B. P. 94–101. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.09.029.
7. Future cost scenarios for reduction of ship CO<sub>2</sub> emissions / S. Magnus. Eide et al. *Maritime Policy & Management*. 2011. Vol. 38. № 1. P. 11–37. DOI: 10.1080/03088839.2010.533711.
8. Svindland M. The environmental effects of emission control area regulations on short sea shipping in Northern Europe: The case of container feeder vessels. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2018. Vol. 61. Part B. P. 423–430. DOI: 10.1016/j.trd.2016.11.008.
9. Winebrake J. J., Wang M. Q., He D. Toxic Emissions from Mobile Sources: A Total Fuel-Cycle Analysis for Conventional and Alternative Fuel Vehicles. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2001. Vol. 51. № 7. P. 1073–1086. DOI: 10.1080/10473289.2001.10464325.
10. Jiang L., Kronbak J., Christensen L. P. The costs and benefits of sulphur reduction measures: Sulphur scrubbers versus marine gas oil. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2014. Vol. 28. P. 19–27. DOI: 10.1016/j.trd.2013.12.005.
11. Korean Register. Guide to Strengthened Global SO<sub>x</sub> Regulation. 32 p.
12. Compliance possibilities for the future ECA regulations through the use of abatement technologies or change of fuels / S. Brynolf et al. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2014. Vol. 28. P. 6–18. DOI: 10.1016/j.trd.2013.12.001.
13. Seddiek I.S., Elgohary M. M. Eco-friendly selection of ship emissions reduction strategies with emphasis on SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> emissions, International. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2014. Vol. 6. № 3. P. 737–748. DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0209.

#### Urum N.S., Mannapova O.V., Lisovskyi S.V., Riashchenko O.I. ANALYSIS OF THE MAIN METHODS OF REDUCING HARMFUL SULPHUR DIOXIDE EMISSIONS FROM SHIPS

*The purpose of the article is a comprehensive analysis of the methods used to reduce harmful sulphur oxide emissions from ships and the prospects for their application in the future. This goal is achieved through an in-depth analysis of modern sources of information related to the issues of ensuring environmental safety of ship operation, as well as methods directly related to the development of methods for reducing the impact of harmful emissions from ships both in ports and at sea. The main alternative ways to achieve this goal have*

*been identified. They are concentrated around the following main research pillars: first, the transition to a fundamentally new quality of low-sulphur fuel; second, the cleaning of exhaust gases on board by installing special scrubbers; and third, the widespread use of liquefied natural gas by re-equipping existing vessels with marine power plants. It has been proven that marine distillate fuels, which are also a lubricant for moving parts of fuel equipment, significantly reduce the degree of wear on engine parts. On the other hand, the use of low-sulphur marine distillate fuels in marine engines contributes to intensive wear of precision fuel equipment vapours. That is, it has been shown that reducing the sulphur content of fuel simultaneously worsens the anti-wear properties of fuel equipment elements due to the removal of surface-active substances. In this regard, the article argues that conventional fuels, which have a relatively large proportion of sulphur and are used in the operation of marine diesel engines, do not allow to meet the requirements of the Convention. It is suggested that to achieve the exhaust emission standards, low-sulphur fuels should be used, scrubbers should be installed, or ships should be converted to alternative gas fuels. The most significant result of the study is a critical analysis of the disadvantages and advantages of possible approaches to reducing sulphur oxide emissions, which shows that soon, low-sulphur oil-viscous distillate fuels with sulphur content will be mainly used on ships of the sea and river fleet. A further direction of work is to conduct research on the lubricating ability of low-sulphur fuels on the wear of precision fuel equipment pairs.*

**Key words:** sea vessel, fuel, sulphur oxide, gas fuel, scrubber, engine.