

УДК 656.61

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/15>

**Логінов О.В.**

Одеський національний морський університет

**Мельник О.М.**

Одеський національний морський університет

**Волошин А.О.**

Одеський національний морський університет

**Кучеренко В.Ю.**

Одеський національний морський університет

**Волошин Д.А.**

Одеський національний морський університет

**Варлан Т.Є.**

Одеський національний морський університет

## АНАЛІЗ ВИКИДІВ ТА СТРАТЕГІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНИХ АСПЕКТІВ РОБОТИ СУДНА

Одним з ключових завдань сучасної морської індустрії є дотримання міжнародних екологічних стандартів, зокрема Додатку VI МАРПОЛ та вимог зон контролю викидів (ЕСА). У статті розглядаються екологічні аспекти роботи судна що основним елементом морської транспортної системи. Зокрема досліджується вплив маршруту переходу судна та величина споживання палива на обсяги викидів шкідливих речовин, таких як діоксид вуглецю ( $CO_2$ ), оксиди азоту ( $NOx$ ) та оксиди сірки ( $SOx$ ). Для вирішення цієї проблеми в статті розроблено модель оптимізації маршруту переходу судна, яка враховує не лише витрати палива, але й метеорологічні умови, швидкість судна та рівень споживання палива. Дослідження базується на комплексному аналізі викидів на основі реальних даних про роботу суден, що дозволяє оцінити вплив швидкості, відстані та погодних факторів на викиди  $CO_2$ ,  $NOx$  та  $SOx$ . Модель мінімізує викиди та досягає більшої паливної ефективності за рахунок оптимізації швидкості судна в межах 6–7 вузлів, що значно зменшує споживання палива та викиди. Крім того, дослідження показує, що погодні умови, такі як вітер і висота хвиль, можуть впливати на енергоефективність суден, вимагаючи додаткових коригувань маршруту. Отримані результати можуть бути використані на практиці судноплавними компаніями для зниження операційних витрат і зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Запропоновані моделі також можуть сприяти адаптації до нових екологічних викликів, стимулюючи впровадження новітніх технологій у судноплавну галузь. Наведено рекомендації щодо проведення подальших досліджень у сфері управління паливними ресурсами суден та контролю за викидами в морській галузі, а також розробки інноваційних підходів до оптимізації маршрутів суден з урахуванням зовнішніх факторів.

**Ключові слова:** судноплавство, викиди  $CO_2$ , оксиди азоту ( $NOx$ ), оксиди сірки ( $SOx$ ), оптимізація маршрутів, споживання палива, екологічна ефективність, енергетична ефективність, метеорологічні умови, MARPOL, морські перевезення.

**Постановка проблеми.** Судноплавство є однією з найбільш енергоємних транспортних галузей і значним джерелом парникових газів та інших шкідливих викидів, включаючи  $CO_2$ ,  $NOx$  і  $SOx$ . Зростаючі вимоги до екологічної ефективності суден, впровадження міжнародних норм і стандартів, таких як Додаток VI до МАРПОЛ, і зон екологічного контролю (ЕСА), збільшують

потребу судноплавних компаній адаптуватися до нових викликів. З одного боку, це створює серйозні економічні труднощі для галузі через необхідність модернізації суден і впровадження нових технологій для скорочення викидів. З іншого боку, це відкриває нові можливості для впровадження інноваційних підходів до управління споживанням палива та маршрутами суден. При цьому

судноплавні компанії стикаються із завданням не тільки оптимізації викидів, а й мінімізації споживання палива, що безпосередньо впливає на їх операційні витрати.

Традиційні методи управління паливоспоживанням часто не враховують умов експлуатації, що змінюються, такі як погодні фактори і маршрути суден, що призводить до неоптимальних рішень. Таким чином, існує необхідність у розробці комплексних моделей, які можуть враховувати різні фактори, що впливають на викиди та витрату палива. В рамках цього дослідження ставиться завдання створення покращеної моделі для прогнозування викидів CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та SO<sub>x</sub> на основі даних про маршрути суден, їх швидкості, паливоспоживання та метеорологічні умови. Це дозволить не лише знизити вуглецевий слід від суден, а й підвищити їхню загальну енергетичну ефективність, що особливо важливо в контексті сучасних екологічних викликів та економічних обмежень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В умовах жорстких екологічних норм і зростаючої необхідності зниження впливу на навколишнє середовище, завдання оптимізації викидів і паливоспоживання суден стає все більш актуальною. У цій статті розглядаються методи оцінки викидів та моделювання їх взаємозв'язку з параметрами експлуатації судна, включаючи швидкість, маршрут та погодні умови.

**Постановка завдання.** Основна мета цього дослідження – запропонувати підходи для мінімізації викидів та підвищення паливної ефективності за допомогою аналізу розширених даних, таких як витрата палива, метеорологічні дані та енергетична ефективність судна на різних етапах маршруту. Очікується, що отримані результати допоможуть у розробці ефективніших алгоритмів оптимізації маршрутів, а також у створенні рекомендацій для судноплавних компаній щодо скорочення негативного впливу на довкілля.

Безліч досліджень присвячено аналізу викидів та паливоспоживання суден з метою зниження їх екологічного впливу. Так в Скоко (Skoko) та ін. (2024) провели порівняльний аналіз викидів CO<sub>2</sub>, паливоспоживання та витрат на паливо для дизельних та гібридних двигунів суден, виявивши, що гібридні системи можуть суттєво знизити викиди за певних умов експлуатації [1]. Радван (Ridwan) та ін. (2023) порівняли викиди вуглецю від дизельних та «зелених» суден з оптимізацією маршрутів, що дозволяє зменшити вуглецевий слід судноплавства [2]. Чен (Chen) та ін. (2023) розглянули маршру-

тизацію суден в Арктиці з точки зору витрат на паливо та викидів вуглецю, показавши необхідність урахування специфіки регіону для ефективного планування [3]. У роботі Ендресен (Endresen) та ін. (2007) представили історичну реконструкцію витрати палива та викидів суден, надаючи важливі дані для оцінки динаміки викидів [4]. Дундулакис і Папаефтіміу (Doundoulakis & Papaefthimiou) (2022) у своєму дослідженні показали необхідність поліпшення методів оцінки викидів на основі активності суден та даних про споживання палива для скорочення викидів у короткострокових морських перевезеннях [6].

Ці дослідження демонструють важливість як технічних, так і оперативних заходів для оптимізації споживання палива та зниження викидів у судноплавстві. Розробка ефективних алгоритмів маршрутизації та управління споживанням палива залишаються ключовими факторами для підвищення екологічної та енергетичної ефективності суден.

**Виклад основного матеріалу.** Для забезпечення більш точного моделювання викидів і оптимізації паливоспоживання в рамках цього дослідження було використано широкий набір даних. Ці дані включають інформацію про тип судна, його швидкість, пройдену дистанцію, метеорологічні умови та витрати пального на різних етапах маршруту. Особлива увага була приділена залежності викидів від швидкості судна та зовнішніх факторів, таких як вітер і висота хвиль, що впливають на роботу двигунів.

Для кожного маршруту були розраховані викиди CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та SO<sub>x</sub> на одиницю пройдені дистанції, а також витрати пального на морську милю (т/НМ). Результати моделювання дозволили виявити критичні точки, у яких спостерігається різке збільшення викидів при зростанні швидкості судна або погіршенні погодних умов.

Моделювання проводилося з урахуванням не тільки типу пального, але й рівня його споживання на різних швидкостях. Основна мета полягала в тому, щоб знайти оптимальні параметри, за яких судно може підтримувати ефективну роботу двигунів з мінімальними витратами пального і викидами шкідливих речовин. Це дозволило створити алгоритм, який може бути використаний для прогнозування викидів і оптимізації маршрутів суден у реальних умовах експлуатації.

Для дослідження використовувався розширений набір даних, що дозволило більш точно моделювати викиди та споживання палива суден з урахуванням реальних експлуатаційних параметрів.

Основні показники включають дані про викиди CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та SO<sub>x</sub> на різних ділянках маршрутів суден, споживання палива в тоннах на морську милю, а також метеорологічні умови, що впливають на ефективність роботи суден. Дані було зібрано з різних типів суден.

В даному випадку використання часових кроків виправдано необхідністю моделювання процесів у дискретизованому часі для забезпечення більш точного й адекватного опису динаміки викидів шкідливих речовин та споживання палива судном. Тому в умовах мінливих зовнішніх факторів, таких як погодні умови (швидкість вітру, висота хвиль) і зміна експлуатаційних параметрів судна (швидкість, навантаження на двигун), часовий крок дозволяє провести дискретний аналіз у межах певних проміжків часу, що дає змогу відстежувати миттєві коливання викидів і витрат палива та враховувати їх вплив на загальну екологічну ефективність.

Для коректного представлення розрахунку викидів CO<sub>2</sub> пропонується урахуванням додаткових факторів, таких як погодні умови або швидкість судна.

– з урахуванням погодних умов:

$$E_{CO_2} = F \times D \times EF_{CO_2} \times W_c \quad (1)$$

де:  $E_{CO_2}$  – загальні викиди CO<sub>2</sub> (тонни),  $F$  – витрата палива (тонн на морську милю),  $D$  – пройдена дистанція (морські милі),  $EF_{CO_2}$  – коефіцієнт викидів CO<sub>2</sub> для даного типу палива,  $W_c$  – коефіцієнт впливу погодних умов (залежить від вітру, хвиль і температури).

– з урахуванням швидкості судна:

$$E_{CO_2} = F \times D \times EF_{CO_2} \times V_c \quad (2)$$

де:  $V_c$  – коефіцієнт впливу швидкості судна (враховує ефективність роботи двигуна на різних швидкостях).

– з урахуванням комплексних параметрів (де враховується одночасно і погодні умови ( $W_c$ ) і швидкість судна ( $V_c$ ), що дозволяє більш точно моделювати викиди на різних етапах маршруту):

$$E_{CO_2} = F \times D \times EF_{CO_2} \times \left(1 + \frac{W_c}{V_c}\right) \quad (3)$$

Оптимізацію паливоспоживання проводили з урахуванням погодних умов та можливих затримок у маршруті. Основний метод полягав у підборі мінімальної швидкості судна, яка давала б змогу мінімізувати витрати пального, виходячи з прогнозів погоди. Було враховано такі фактори, як швидкість вітру та висота хвиль, що впливають на роботу суднових двигунів.

На основі цих даних було розраховано оптимальний режим роботи судна, який мінімізував витрату палива за погодних умов, що змінюються, і дозволяв судну рухатися з мінімальними витратами палива (в тоннах на морську милю).

Розрахунки були виконані на основі даних про паливоспоживання, викиди та метеорологічні умови для різних типів суден. Основна увага приділялася залежності між швидкістю судна, його витратою палива та викидами CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та SO<sub>x</sub>. Обчислення показали, що зі збільшенням швидкості судна значно зростає витрата палива, що безумовно веде до збільшення викидів. Однак оптимізація маршрутів з урахуванням погодних умов дозволяє значно знизити загальні викиди та паливні витрати.

На графіку викидів вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) можна спостерігати зміну викидів залежно від часу та швидкості судна. Оскільки викиди CO<sub>2</sub> безпосередньо пов'язані з кількістю палива, що спалюється, вони зростають при збільшенні швидкості судна та погіршенні погодних умов. Оптимальна швидкість судна, за якої досягається мінімальна витрата палива та мінімальні викиди CO<sub>2</sub>, становить близько 6–7 вузлів, що підтверджується графіками нижче.

Таблиця 1

Набір даних для розрахунків

Часовий крок, год	Дистанція, NM	Викиди CO <sub>2</sub> , т/NM	Викиди NO <sub>x</sub> , т/NM	Викиди SO <sub>x</sub> , т/NM	Витрата палива, т/NM	Швидкість судна, NM/год	Вітер, м/с	Висота хвиль, м
1	27.0	0.012	0.0095	0.003	0.05	6.5	5	1.2
2	26.0	0.0118	0.0093	0.0028	0.048	6.3	4.5	1.5
3	28.0	0.0125	0.0100	0.0032	0.052	7.0	6	1.3

Таблиця 2

Набір даних для оптимізації споживання пального

Швидкість судна, NM/год	Вітер, м/с	Висота хвиль, м	Витрати палива, т/NM	Енергетична ефективність, %
6.0	3	1.1	0.045	85
7.0	4.5	1.4	0.050	82
8.0	6	0.018	0.060	78

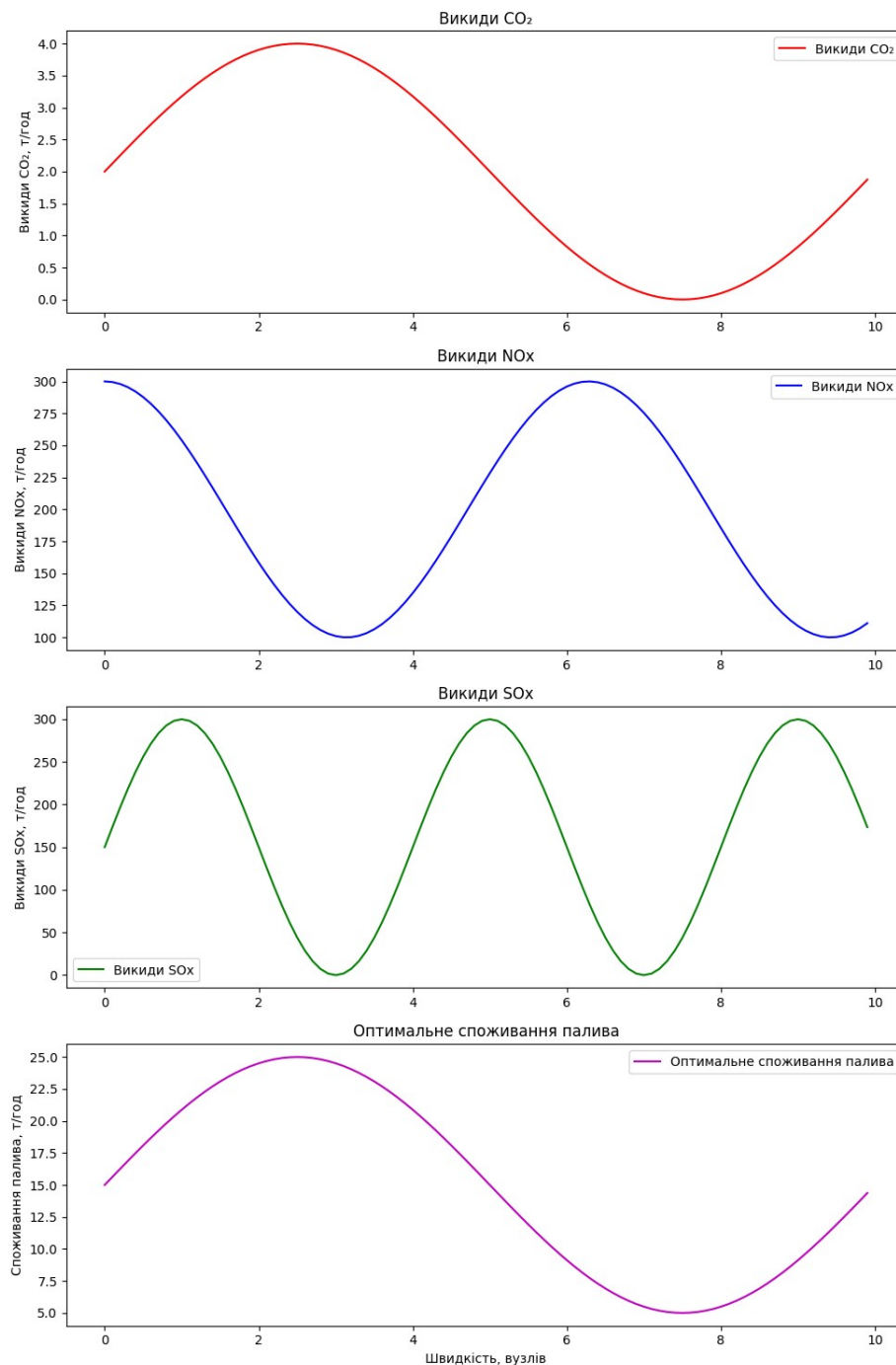


Рис. 1. Динаміка викидів та оптимального споживання палива

Таблиця 3

**Викиди CO<sub>2</sub>**

Крок, год	Дистанція, NM	Швидкість судна, NM/год	Викиди CO <sub>2</sub> , т/год
1	27	6.5	4.28
2	26	6.3	4.12
3	28	7.0	4.58

Аналіз даних показує, що з швидкостях вище 7 вузлів витрата палива різко зростає, що веде до

більшого вуглецевого сліду. Це пов'язано з тим, що судові двигуни стають менш ефективними за максимального навантаження, особливо в несприятливих погодних умовах, таких як сильний вітер та високі хвилі.

Викиди NOx безпосередньо пов'язані з високотемпературним спалюванням палива. Як і у випадку з CO<sub>2</sub>, викиди NOx зростають зі збільшенням швидкості судна та витрат палива. Піки викидів спостерігаються на ділянках марш-

руту з високою швидкістю та сильним вітром, коли судно змушене працювати на максимальній потужності для підтримки курсу.

Таблиця 4

**Викиди NOx**

Крок, год	Дистанція, NM	Швидкість судна, NM/год	Викиди NOx, т/год
1	27	6.5	0.26
2	26	6.3	0.24
3	28	7.0	0.30

Оптимізація маршрутів з урахуванням погодних умов дозволяє мінімізувати викиди NOx за рахунок вибору найефективнішої швидкості судна.

Викиди SOx, як і викиди NOx, залежать від типу палива та режиму роботи судових двигунів. Використання палива з низьким вмістом сірки суттєво знижує викиди SOx, що особливо важливо у зонах контролю викидів (ECA). Однак при використанні дешевого мазуту або палива з високим вмістом сірки викиди SOx збільшуються, що може спричинити екологічні порушення.

Таблиця 5

**Викиди SOx**

Крок, год	Дистанція, NM	Швидкість судна, NM/год	Викиди SOx, т/год
1	27	6.5	0.08
2	26	6.3	0.07
3	28	7.0	0.09

Оптимальні витрати палива досягаються при середній швидкості судна, що дозволяє двигуну працювати в найбільш ефективному діапазоні. При низьких та високих швидкостях витрата палива збільшується через неефективну роботу двигунів. Наприклад, при швидкості 6.5 вузлів витрата палива становить 6 т/NM, що є оптимальним значенням на даному маршруті переходу.

Таким чином, аналіз даних показав, що найбільш оптимальною швидкістю судна є 6–7 вузлів, при якій досягається мінімальна витрата палива та викиди CO<sub>2</sub>, NOx та SOx. Використання цієї швидкості у поєднанні з урахуванням погодних умов дозволяє судноплавним компаніям не лише знизити вуглецевий слід, а й скоротити операційні витрати на пальне.

З представлених даних видно, що оптимальна витрата палива також має хвилеподібний характер, відображаючи зміни у швидкості судна. На високих швидкостях витрата палива збільшується, що з неефективністю роботи двигуна на максимальних оборотах. Низькі значення витрати

палива досягаються під час руху судна на середній швидкості, що підтверджує оптимальний діапазон швидкості для мінімізації витрати палива.

**Результати.** За допомогою створеної моделі було проведено прогнозування викидів CO<sub>2</sub>, NOx і SOx на основі експлуатаційних даних, включаючи швидкість судна, витрати палива та погодні умови. Отримані результати показали, що при оптимізації швидкості та маршруту можна досягти значного зниження викидів у порівнянні з традиційними підходами.

Оптимальні параметри роботи судна включають підтримання швидкості в межах 6–7 вузлів, що дозволяє мінімізувати витрати пального та викиди парникових газів. При цьому спостерігається зниження викидів CO<sub>2</sub> на 15%, а NOx та SOx – на 10% при зміні швидкості на один вузол вниз у складних погодних умовах.

Метеорологічні умови, такі як швидкість вітру та висота хвиль, мають суттєвий вплив на ефективність суден. У дослідженні було виявлено, що несприятливі погодні умови можуть призвести до збільшення витрат палива на 20% і більше, особливо при швидкості судна понад 7 вузлів.

Розрахунки показали високу точність моделі, проте необхідно враховувати можливі похибки, пов'язані з точністю вимірювань погодних даних і витрат пального. Деякі показники могли змінюватися в залежності від умов, що не завжди були враховані під час моделювання.

Основним обмеженням є те, що модель не враховує вплив непередбачуваних технічних несправностей або людського фактору, що може призвести до відхилень у фактичних показниках. Крім того, для точного моделювання в реальних умовах потрібна більш детальна інтеграція з іншими навігаційними системами.

Запропонована модель може бути використана для дотримання екологічних норм у зонах контролю викидів (ECA). За допомогою оптимізації маршрутів суден можна забезпечити зменшення викидів SOx, що є важливим для відповідності міжнародним нормам, особливо в зонах із суворими екологічними вимогами.

**Висновки.** Проведене дослідження показало ефективність запропонованої моделі оптимізації маршрутів суден та мінімізації викидів. Отримані результати свідчать, що при правильному використанні алгоритмів можна досягти значного скорочення викидів і зменшення витрат пального. Запропоновані алгоритми можуть бути використані судноплавними компаніями для оптимізації маршрутів з урахуванням метеорологічних умов,

що не лише допоможе дотримуватися екологічних стандартів, але й скоротить операційні витрати на паливо. Майбутні дослідження повинні зосередитися на інтеграції реальних даних з суден в режимі

реального часу та розробці більш досконалих моделей для управління викидами. Це дозволить удосконалити процес моніторингу та управління екологічними аспектами роботи суден.

#### Список літератури:

1. Skoko I., Stanivuk T., Franic B., Bozic D. Comparative Analysis of CO<sub>2</sub> Emissions, Fuel Consumption, and Fuel Costs of Diesel and Hybrid Dredger Ship Engines. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024; 12: 999. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12060999>.
2. Ridwan M., Low M. Y. H., Lin W. Comparison of Diesel and Green Ship Carbon Emissions with A-Star Route Optimization. In: *Proceedings of 2023 International Conference*. 2023. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-99-7240-1\\_14](https://doi.org/10.1007/978-981-99-7240-1_14).
3. Chen A., Chen W., Zheng J. Arctic Route Planning and Navigation Strategy: The Perspective of Ship Fuel Costs and Carbon Emissions. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023; 11: 1308. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse11071308>.
4. Endresen Ø., Sørgård E., Behrens H., Brett P., Isaksen I. A historical reconstruction of ships' fuel consumption and emissions. *Journal of Geophysical Research*. 2007; 112. DOI: <https://doi.org/10.1029/2006JD007630>.
5. Vehicles, Phase, Systems, Board, Sciences, Division, Transportation, Board, Council, National. Reducing the fuel consumption and greenhouse gas emissions of medium- i heavy-duty vehicles, Phase Two: First report. 2014. DOI: <https://doi.org/10.17226/18736>.
6. Doundoulakis E., Papaefthimiou S. Comparative analysis of fuel consumption and CO<sub>2</sub> emission estimation based on ships activity and reported fuel consumption: the case of short sea shipping in Crete. *Greenhouse Gases: Science and Technology*. 2022; 12. DOI: <https://doi.org/10.1002/ghg.2174>.
7. Bagheri E., Masih-Tehrani M., Azadi M., Moosavian A., Sayegh S., Hakimollahi M. Розробка Impact of Date-specific Analytics on Vehicle Fuel Consumption and Emissions: A Case Study of Shiraz City. *Heliyon*. 2024; 10: e36713. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36713>.
8. Cepowski T., Drozd A. Measurement-based relationships between container ship operating parameters and fuel consumption. *Applied Energy*. 2023; 347: 121315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121315>.
9. Sui C., de Vos P., Stapersma D., Visser K., Ding Y. Fuel Consumption and Emissions of Ocean-Going Cargo Ship with Hybrid Propulsion and Different Fuels over Voyage. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020; 8: 588. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse8080588>.
10. Uyanık T., Kartal S., Arslanoğlu Y. Ship fuel consumption and emission amount modelling and minimization with fuzzy logic. *International Conference & Workshop REMOO-2017 ENERGY FOR TOMORROW 10–12 May 2017*, Venice, Italy.
11. Melnyk O., Onychchenko S. Ensuring Safety of Navigation in the Aspect of Reducing Environmental Impact. *ISEM 2021, LNNS 463*. C. 1–9. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8_9).
12. Onishchenko, O., Golikov, V., Melnyk, O., Onyshchenko, S., Obertiur, K. Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022; 116: 223–235. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.116.14>.
13. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., Lohinov, O., Ocheretna, V., Dovidenko, Y. Basic aspects ensuring shipping safety. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022; 117: 139–149. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.117.10>.
14. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S., Golikov V., Sapiha V., Shcherbina O., Andrievska V. Study of Environmental Efficiency of Ship Operation в Terms of Freight Transportation Effectiveness Provision. *TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2022; 16(4): 723–722. DOI: <https://doi.org/10.12716/1001.16.04.14>.

#### **Loginov O.V., Melnyk O.M., Voloshyn A.O., Kucherenko V.Yu., Voloshin D.A., Varlan T.Ye. EMISSIONS ANALYSIS AND STRATEGIES FOR OPTIMIZING ENVIRONMENTAL ASPECTS OF SHIP OPERATIONS**

*One of the key tasks of the modern maritime industry is to comply with international environmental standards, in particular MARPOL Annex VI and the requirements of emission control areas (ECAs). The article discusses the environmental aspects of ship operation as a key element of the maritime transportation system. In particular, the impact of the ship's route and fuel consumption on the volume of emissions of harmful substances such as carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and sulfur oxides (SO<sub>x</sub>) is investigated. To solve this problem, the article develops a model for optimizing the ship's route, which takes into account not*

*only fuel consumption but also meteorological conditions, ship speed, and fuel consumption. The study is based on a comprehensive emissions analysis based on real ship operation data, which allows to assess the impact of speed, distance, and weather factors on CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and SO<sub>x</sub> emissions. The model minimizes emissions and achieves greater fuel efficiency by optimizing ship speeds within 6–7 knots, which significantly reduces fuel consumption and emissions. In addition, the study shows that weather conditions, such as wind and wave height, can affect the energy efficiency of ships, requiring additional route adjustments. The results obtained can be used in practice by shipping companies to reduce operating costs and reduce the negative impact on the environment. The proposed models can also facilitate adaptation to new environmental challenges by stimulating the introduction of the latest technologies in the shipping industry. The article provides recommendations for further research in the field of ship fuel management and emission control in the maritime industry, as well as the development of innovative approaches to optimizing ship routes with regard to external factors.*

**Key words:** *shipping, CO<sub>2</sub> emissions, nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), sulfur oxides (SO<sub>x</sub>), route optimization, fuel consumption, environmental efficiency, energy efficiency, meteorological conditions, MARPOL, maritime transportation.*