

ЖИТТЄВИЙ ЦИКЛ СУДНА ЯК ФАКТОР ТЕХНОГЕННОГО ВПЛИВУ: ЕКОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ЕТАПІВ ТА ЗАХОДИ МІНІМІЗАЦІЇ

Л.В. Пізінцалі¹, О.І. Россомаха², С.М. Дімова³, О.А. Россомаха⁴

¹к.т.н., доцент, доцент кафедри суднобудування і судноремонту
ім. проф. Ю.Л. Воробйова,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-8046-0917

²к.т.н., доцент, доцент кафедри навігації і керування судном,
доцент кафедри суднобудування і судноремонту ім. проф. Ю.Л. Воробйова,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-4425-2192.

³к.т.н., доцент, доцент кафедри суднобудування і судноремонту
ім. проф. Ю.Л. Воробйова,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0009-0009-1220-5592.

⁴доцент ОНМУ,
начальник навчального відділу,
доцент кафедри суднових енергетичних систем і комплексів,
Навчально-науковий інститут морського флоту
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-0230-9453.

Анотація

Вступ. Морське судноплавство є однією з ключових галузей світової економіки, забезпечуючи значну частину вантажних і пасажирських перевезень. Водночас функціонування морського транспорту супроводжується значним техногенним впливом на навколишнє середовище, що проявляється у різноманітних видах забруднення: атмосферних викидах, витоках нафтопродуктів, скиданні стічних вод, утворенні твердих та небезпечних відходів, шумовому та біологічному забрудненні, включно з перенесенням інвазійних видів. Зростання обсягів морських перевезень у поєднанні з глобалізацією економіки та інтенсивною експлуатацією суден спричиняє накопичувальний ефект забруднень, особливо у прибережних та портових зонах. У сучасних наукових дослідженнях акцент робиться на необхідності комплексного підходу до оцінки екологічного впливу, що враховує усі етапи життєвого циклу судна – від концепції та проектування до експлуатації, списання та утилізації, зокрема у рамках концепції «зеленого судноплавства» та міжнародних екологічних норм.

Метою даної роботи є удосконалення підходу до аналізу життєвого циклу судна як системного джерела техногенного впливу на навколишнє середовище шляхом систематизації екологічних факторів на різних етапах його існування та розробки методики оцінки експлуатаційних викидів суднових енергетичних установок із врахуванням різних режимів руху та умов маршруту. Досягнення цієї мети передбачає визначення етапів життєвого циклу з найбільшим внеском у сумарне забруднення, кількісне оцінювання джерел техногенного впливу.



Результати. У роботі здійснено комплексний аналіз основних етапів життєвого циклу судна: концепції та планування, проектування, будівництва, експлуатації, оцінки та списання, а також утилізації. Для кожного етапу визначено специфічні джерела техногенного навантаження та їх вплив на водне та атмосферне середовище, включно з утворенням відходів та шумовим забрудненням. Найбільший вплив встановлено на етапі експлуатації, який може тривати кілька десятиліть і характеризується значними обсягами викидів нафтопродуктів, стічних та баластних вод, атмосферних забруднень, твердих відходів та хімічних сполук, що створюють довгострокові екологічні ризики. Запропоновано структурну модель життєвого циклу судна у вигляді блок-схеми, яка відображає послідовність етапів та їх взаємозв'язок, дозволяючи врахувати накопичувальний характер екологічного впливу. Для оцінки експлуатаційних викидів запропоновано підхід із поділом маршруту на сегменти з різними режимами роботи енергетичної установки та використанням емісійних коефіцієнтів для різних видів палива. Це дозволяє визначити внесок кожного режиму роботи та сегмента маршруту у сумарні викиди судна, що створює основу для оптимізації маршрутів, вибору видів палива та розробки заходів з підвищення енергоефективності та зменшення негативного впливу на довкілля.

Висновки. Проведене дослідження засвідчує, що життєвий цикл судна є комплексним джерелом техногенного впливу, причому найбільш критичним за екологічним навантаженням є етап експлуатації, що формує основну частку викидів і відходів. Запропонована структурна модель життєвого циклу та методика кількісної оцінки експлуатаційних викидів дозволяють інтегрувати дані про всі етапи функціонування судна, визначати пріоритетні напрямки зменшення екологічного впливу та порівнювати альтернативні технічні та експлуатаційні рішення. Отримані результати можуть використовуватися для розробки екологічно ефективних стратегій управління морським транспортом, оптимізації експлуатаційних режимів, планування маршрутів і підвищення ефективності «зеленого судноплавства», що має важливе значення для захисту морських екосистем, поліпшення якості повітря та збереження біорізноманіття прибережних зон.

Ключові слова: судно, життєвий цикл, етапи життєвого циклу, навколишнє середовище, аналіз, модель життєвого циклу, модель викидів, експлуатація, екологія.

**THE LIFE CYCLE OF A SHIP AS A FACTOR OF TECHNOLOGICAL IMPACT:
ECOLOGICAL ANALYSIS OF STAGES AND MINIMIZATION MEASURES**

L.V. Pizintali¹, O.I. Rossomakha², S.M. Dimova³, O.A. Rossomakha⁴

¹Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Shipbuilding and Ship Repair
named after Prof. Yu.L. Vorobyov,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-8046-0917

²Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Navigation and Control of the Ship,
Associate Professor at the Department of Shipbuilding and Ship Repair
named after Prof. Yu.L. Vorobyov,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-4425-2192.

³Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Shipbuilding and Ship Repair
named after Prof. Yu.L. Vorobyov,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0009-0009-1220-5592

⁴Associate Professor ONMU,
Head of the Educational and Methodical Department,
Associate Professor at the Department of Ship Power Systems and Complexes,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-0230-9453

Summary

Introduction. *Maritime shipping is one of the key sectors of the global economy, accounting for a significant portion of freight and passenger transport. At the same time, the operation of maritime transport has a significant anthropogenic impact on the environment, manifesting itself in various forms of pollution: atmospheric emissions, oil spills, wastewater discharge, the generation of solid and hazardous waste, noise and biological pollution, including the spread of invasive species. The growth in maritime transport volumes, combined with economic globalization and intensive ship operation, leads to a cumulative effect of pollution, particularly in coastal and port areas. Current scientific research emphasizes the need for a comprehensive approach to assessing environmental impact that takes into account all stages of a ship's life cycle—from concept and design to operation, decommissioning, and disposal—particularly within the framework of the “green shipping” concept and international environmental standards.*

Purpose. *The aim of this study is to improve the approach to analyzing the life cycle of a vessel as a systemic source of anthropogenic impact on the environment by systematizing environmental factors at various stages of its existence and developing a methodology for assessing operational emissions from ship power plants, taking into account different operating modes and route conditions. Achieving this goal involves identifying the life cycle stages that contribute most to total pollution, quantitatively assessing sources of anthropogenic impact, and developing a structural model that allows for the integration of data on all stages of a ship's operation.*

Results. *This study provides a comprehensive analysis of the main stages of a ship's life cycle: concept and planning, design, construction, operation, assessment and*

decommissioning, as well as disposal. For each stage, specific sources of anthropogenic impact and their effects on the aquatic and atmospheric environments were identified, including waste generation and noise pollution. The greatest impact was found during the operation stage, which can last several decades and is characterized by significant volumes of emissions of petroleum products, wastewater and ballast water; atmospheric pollutants, solid waste, and chemical compounds that pose long-term environmental risks. A structural model of a ship's life cycle is proposed in the form of a flowchart, which reflects the temporal sequence of stages and their interrelationships, allowing for the cumulative nature of environmental impact to be taken into account. To assess operational emissions, an approach has been developed that divides the route into segments with different power plant operating modes and uses emission factors for different fuel types. This methodology allows determining the contribution of each operating mode and route segment to the ship's total emissions, which provides a basis for route optimization, fuel selection, and the development of measures to improve energy efficiency and reduce negative environmental impacts.

Conclusions. *The study confirms that a ship's life cycle is a complex source of anthropogenic impact, with the operational phase being the most critical in terms of environmental impact, as it accounts for the majority of emissions and waste. The proposed structural model of the life cycle and methodology for the quantitative assessment of operational emissions allow for the integration of data on all stages of a ship's operation, the identification of priority areas for reducing environmental impact, and the comparison of alternative technical and operational solutions. The results obtained can be used to develop environmentally effective maritime transport management strategies, optimize operational modes, plan routes, and enhance the efficiency of "green shipping," which is of great importance for the protection of marine ecosystems, improvement of air quality, and preservation of biodiversity in coastal zones.*

Key words: *vessel, life cycle, life cycle stages, environment, analysis, life cycle model, emission model, operation.*

Вступ

Проблема техногенного впливу морського транспорту на навколишнє середовище є предметом численних наукових досліджень. Морське судноплавство забезпечує значну частину світових перевезень, проте його функціонування супроводжується утворенням різних видів забруднення – атмосферних викидів, нафтових розливів, утворенням відходів та біологічним перенесенням інвазійних видів. У науковій літературі підкреслюється, що морський транспорт робить помітний внесок у формування техногенного навантаження на екосистеми Світового океану та прибережних зон.

У багатьох роботах було підкреслено, що у контексті сучасних екологічних викликів та переходу морської галузі до концепції «зеленого судноплавства» особливої уваги потребує оцінка впливу окремих етапів життєвого циклу судна на навколишнє середовище [1].

Так, Дж. Уільямс відносить транспортне судноплавство до тих видів людської діяльності, у результаті яких відбуваються забруднення. Він виділяє наступні види забруднення, які виникають від транспортного судноплавства: забруднення, яке виникає у зв'язку з днопоглиблювальними роботами, які проводяться з метою

підтримання необхідних для проходу суден глибин; забруднення нафтою; забруднення, спричинене будівельними роботами з метою ремонту або модернізації відповідного обладнання для вантажообробки суден у портах; побутові забруднення з суден тощо [2, с. 28–29].

Т.Р. Короткий забруднення морського середовища з суден розглядає таким чином: забруднення експлуатаційними скидами, забруднення у результаті захоронення та забруднення у результаті аварій [3, с. 51–78].

Фундаментальні питання впливу морського транспорту на довкілля розглянуті у класичних дослідженнях, присвячених проблемам морського забруднення, де визначено основні джерела техногенного впливу судноплавства на морські екосистеми та описано механізми формування забруднень у процесі експлуатації суден [4]. Подальший розвиток наукових досліджень у цьому напрямі пов'язаний з аналізом міжнародно-правових та організаційних механізмів запобігання забрудненню морського середовища. У роботах [5–7] значна увага приділяється питанням міжнародного регулювання екологічної безпеки морського транспорту та впровадженню нормативних вимог щодо зменшення шкідливих викидів і скидів із суден.

У дослідженнях [8–10] показано, що основними джерелами екологічної небезпеки морського транспорту є експлуатаційні скиди з суден, аварійні ситуації під час перевезення небезпечних вантажів, а також процеси списання та утилізації суден після завершення їх експлуатації. У зв'язку з цим значна увага приділяється розробленню комплексних підходів до оцінювання екологічного впливу судноплавства з урахуванням усіх етапів функціонування суден.

Одним із таких підходів є концепція оцінювання життєвого циклу технічних систем (Life Cycle Assessment, LCA), яка передбачає аналіз екологічного впливу об'єкта протягом усього періоду його існування – від стадії проектування та виробництва до завершальної стадії утилізації. Використання цього підходу дозволяє комплексно оцінити споживання матеріальних та енергетичних ресурсів, а також сумарні обсяги шкідливих викидів і відходів, що формуються протягом життєвого циклу технічної системи [11–16]. Застосування методології LCA до морських суден дає можливість визначити сукупний екологічний вплив їх функціонування та порівнювати альтернативні технічні рішення з точки зору їх екологічної ефективності.

Окремі елементи оцінювання життєвого циклу суден розглядаються у роботах, присвячених аналізу екологічних наслідків експлуатації морського флоту, використанню альтернативних видів суднового палива та вдосконаленню технологій утилізації суден. У дослідженнях [17–22] зазначається, що найбільший внесок у сумарні викиди, пов'язані з життєвим циклом судна, як правило, припадає саме на етап його експлуатації, тривалість якого може становити кілька десятиліть. Водночас значний екологічний вплив мають і інші стадії життєвого циклу, зокрема виробництво матеріалів для суднобудування, енергетичні витрати під час будівництва суден, а також процеси демонтажу та утилізації після завершення терміну їх служби.

Попри значну кількість досліджень у цій сфері, аналіз наукової літератури свідчить, що більшість робіт зосереджені на окремих елементах екологічного впливу

морського транспорту, тоді як комплексний аналіз життєвого циклу судна як системного джерела техногенного впливу на навколишнє середовище представлений недостатньо. Зокрема, потребує подальшого розвитку підхід до інтегрованого оцінювання впливу різних етапів життєвого циклу судна на навколишнє середовище, а також методи кількісного визначення внеску окремих режимів експлуатації судна у формування сумарних викидів.

Таким чином, існує наукова проблема, що полягає у необхідності систематизації екологічних факторів впливу суден на різних етапах їх життєвого циклу та розробленні підходу до кількісного оцінювання техногенного навантаження, яке формується під час експлуатації суден. Вирішення цієї проблеми дозволить підвищити ефективність екологічного управління у морській галузі та сприятиме обґрунтуванню заходів щодо зменшення негативного впливу судноплавства на довкілля.

Автори статті здійснили спробу розглянути життєвий цикл судна як фактор техногенного впливу на навколишнє середовище.

Метою дослідження є удосконалення підходу до аналізу життєвого циклу судна як джерела техногенного впливу на навколишнє середовище шляхом систематизації екологічних факторів на різних етапах його існування та формування підходу до оцінювання експлуатаційних викидів суден.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати основні етапи життєвого циклу судна та їх вплив на навколишнє середовище.
2. Виконати порівняльний аналіз впливу різних етапів життєвого циклу судна на навколишнє середовище.
3. Запропонувати структурну модель життєвого циклу судна з урахуванням екологічних факторів.

Основна частина

Екологічна проблема – це біль XX століття, яка ще більш загостреною перейшла у XXI століття. Глобалізація світової економіки, її стрімкий розвиток, що призвів до значного скорочення життєвого циклу (ЖЦ) складних технічних систем (суден), науково-технічний прогрес, інтенсивна господарська діяльність людства, пошук на морі та тотальний матеріалізм, воєнні дії негативним чином впливають на навколишнє середовище (НС). Ці явища проявляються у масовому суднобудівництві вантажних, пасажирських суден та воєнних кораблів, у активізації видобутку нафти і газу в просторах континентального шельфу, скидання в моря з суден нафтових і радіоактивних відходів, важких металів і різноманітного сміття, сільськогосподарських хімікатів, забруднення Світового океану через морські аварії, у т.ч. в результаті природних стихій та військових конфліктів.

За даними OECD та IEA [4, 5], викиди від морського транспорту зросли на 9,4 % з 2019 по 2024 рік. До теперішнього часу близько 90 % усієї енергії, що використовується цивілізацією для своїх потреб, виробляється за допомогою ДВЗ. При цьому, баланс забруднення довкілля ДВЗ у масштабах планети складає 50,4 %, з яких 4,1 % приходить на морський транспорт. 10–15 % площі поверхні Світового океану вже вкрито нафтовою плівкою, значна частина якої з'являється

саме через судноплавство. За статистичними даними, експлуатаційні та аварійні скиди морський транспорт складають ~12–15 %.

Техногенний вплив суден на екологічний стан зовнішнього повітряного та водного середовища можна розглядати як послідовність енергетичних перетворень та переходів. Якщо розглядати окремо взяте судно, то амплітудні значення поодиноких показників рівня впливу кожного виду генерованої енергії та речовини на НС здаватимуться мізерно малими. Ситуація докорінно змінюється у разі присутності в обмеженому за площею районі океану великої кількості суден.

Життєвий цикл судна складається з кількох основних етапів: концепція та планування, проектування та будівництво, експлуатація (включно з технічним обслуговуванням і ремонтом), оцінка, списання, та утилізація (переробка (рециклінг)) [6, с. 45–48].

Автори розглядають життєвий цикл судна, як послідовність взаємопов'язаних етапів, які відображають процес створення, функціонування та виведення судна з експлуатації. Кожний із цих етапів характеризується специфічними технологічними процесами, споживанням ресурсів та відповідним техногенним впливом на навколишнє середовище.

Автори пропонують відображення моделі життєвого циклу судна як послідовної системи стадій, що формують єдиний процес існування судна протягом усього періоду його служби. Такий підхід дозволяє врахувати часову послідовність етапів, їх взаємозв'язок та накопичувальний характер екологічного впливу

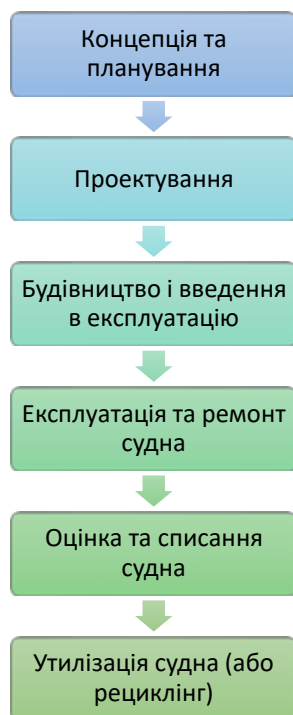


Рис. 1. Структурна модель життєвого циклу судна
Джерело: власна розробка авторів

Структурна модель життєвого циклу судна представлено у вигляді блок-схеми (рис. 1), яка відображає послідовний перехід від етапу формування концепції судна до завершальної стадії його утилізації. Такий підхід дозволяє наочно показати взаємозв'язок між окремими етапами життєвого циклу та визначити характер їх впливу на навколишнє середовище.

На кожному етапі життєвого циклу виникають специфічні джерела техногенного навантаження. Так, на стадії проектування закладаються конструктивні та технологічні рішення, що визначають рівень енергоефективності судна та обсяги майбутніх викидів. Етап «Будівництво і введення в експлуатацію» супроводжується значними витратами матеріальних та енергетичних ресурсів, а також утворенням виробничих відходів. Найбільш тривалим і екологічно значущим є етап «Експлуатація та ремонт судна», під час якого формуються основні атмосферні викиди, скиди забруднюючих речовин у водне середовище та утворюється значна кількість відходів. Завершальні етапи життєвого циклу («Оцінка

та списання», «Утилізація судна (рециклінг)») також можуть супроводжуватися суттєвими екологічними ризиками, пов'язаними з переробкою матеріалів, що містять токсичні речовини.

Основні характеристики етапів ЖЦ судна та їх вплив на екологію автори представили у вигляді порівняльної таблиці 1.

Таблиця 1

**Порівняльна таблиця характеристик етапів ЖЦ судна
та їх вплив на екологію**

Етапи ЖЦ судна	Цілі етапів ЖЦ судна	Вплив на навколишнє середовище (або рівень впливу на НС)
1	2	3
Концепція та планування (визначення вимог)	Визначення типу судна, його призначення та основних характеристик. Початкова концепція – розробка детальних планів судна, визначається його призначення, розміри, системи та функції. Обов'язково враховуються усі міжнародні норми та правила безпеки. Постановка завдання розрахунку вартості ЖЦ судна.	Вплив є мінімальним.
Проектування	Регламентування проектування та будівництва. Розробка детальної технічної документації, креслень та специфікацій. Проектування стратегії технічного обслуговування та ремонту. Визначення необхідної кількості змінно-запасних частин і ремонтних матеріалів. Проектування технологічного процесу будівництва. Певно, перелік представлених завдань, далеко не повний [7, с. 44-47].	На цьому етапі відбувається зменшення негативного впливу: – закладається дизайн судна, щоб форма корпусу, його шорткстість сприяла зменшенню опору води та використанню екологічного палива. – розробляється Еко-дизайн.
Будівництво	На верфях відбувається фізичне втілення проекту. Закладка корпусу, зведення надбудов, встановлення обладнання та систем судна. Процес включає різання сталі, збирання секцій (блоків), їх фарбування, монтаж обладнання (двигунів, навігаційних систем, електрики, трубопроводів) та спуск судна на воду.	Високий вплив на НС: – потребує великої кількості металу, енергії, сировини, що призводить до виснаження природних ресурсів; – викиди від металургійних заводів при виробництві сталі, хімічні речовини, значний шум під час виробництва та збирання.
Експлуатація (ремонт і технічне обслуговування)	Протягом ЖЦ судно використовується за призначенням – для перевезення вантажів, пасажирів, риболовлі, оборони тощо. Цей етап супроводжується постійним та плановим технічним обслуговуванням, ремонтами (включаючи доковий ремонт) та модернізаціями для забезпечення його	Найвищий рівень впливу: – забруднення води: витіки нафтопродуктів, баластні води, зливи побутових відходів, що шкодять морській флорі та фауні; утворення стічних вод, використаних фільтрів та залишків фарби під час докування. – забруднення повітря.

Продовження таблиці 1

1	2	3
	працездатності, безпеки та відповідності мінливим нормам.	– шум (акустичне забруднення). – біологічне забруднення (скидання баластних вод). – хімікати. – суднові відходи [1].
Оцінка та списання судна	Техніко-економічна оцінка стану судна, прийняття рішення про його подальшу долю (продаж, переобладнання або утилізація)	Низький рівень впливу.
Утилізація. Переробка (Рециклінг)	Коли судно стає економічно невідповідним або фізично непридатним для подальшої експлуатації, воно виводиться з експлуатації та відправляється на утилізацію. На спеціалізованих верфях воно демонтується, а матеріали (наприклад, сталь, кольорові метали) переробляються відповідно до міжнародних стандартів охорони здоров'я, безпеки та НС.	Високий рівень впливу на НС. Токсичні матеріали: старі судна містять азбест, поліхлоровані біфеніли (ПХБ) та залишки важкого палива. «Чорна» утилізація – неконтрольована утилізація. Багато суден утилізуються на пляжах Південної Азії методом «бічінгу», що спричиняє масове забруднення ґрунту та води хімікатами, а також створює небезпечні умови для працівників. Якщо судно утилізовано методом затоплення, то старіння металевих конструкцій суден і погіршення стану листового металу створюють загрозу викиду вмісту у морську воду в результаті корозії.

Джерело: розроблено авторами за даними: [1–12]

Проведений аналіз засвідчив, що найбільший вплив на НС припадає на етап «Експлуатація (ремонт і технічне обслуговування)», тривалість якого в окремих випадках перевищує 40 років. У зв'язку з цим, у таблиці 2 наведено детальніший аналіз зазначеного етапу.

Таблиця 2

Вплив етапу експлуатації («Ремонт і технічне обслуговування») суден на екологію

Експлуатація (ремонт і технічне обслуговування)		
№	Вид забруднення та викидів	Наслідки забруднення та викидів
1	2	3
1	Витоки нафтопродуктів, баластні води, зливи побутових відходів, що шкодять морській флорі та фауні	Найчастіше із забрудненням суден пов'язані розливи нафти, які мають руйнівні наслідки. Поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАУ), які є компонентами сирої нафти, дуже токсичні для морських мешканців, але їх дуже важко очищати, вони зберігаються роками в осадках та морському середовищі. Морські види, які постійно зазнають впливу ПАУ, можуть виявляти проблеми з розвитком, сприйнятливості до хвороб та ненормальні репродуктивні цикли. Трюмна вода: на судні нафта часто витікає з машинного приміщення і змішується з водою в трюмі.

Продовження таблиці 2

1	2	3
		Хоча трюмну воду фільтрують і очищають перед скиданням, масло в навіть незначних концентраціях може вбити рибу або мати різні хронічні ефекти. Крім того, трюмна вода може містити тверді відходи та забруднюючі речовини. Очищення корпусу від біобросання може призводити до потрапляння важких металів (наприклад, міді) у прибережні води.
2	Утворення стічних вод, використаних фільтрів та залишків фарби під час докування	«Чорна» вода – це стічні води, з туалетів та медичних установ, які можуть містити шкідливі бактерії, патогени, віруси, кишкові паразити та шкідливі поживні речовини. Скидання нечищених або неадекватно очищених стічних вод може спричинити бактеріальне та вірусне забруднення рибного господарства, створюючи ризик для здоров'я населення. Такі поживні речовини у стічних водах, як азот та фосфор, сприяють надмірному цвітінню водоростей, яке споживає кисень у воді і може призвести до загибелі риби та знищення інших водних організмів. «Сіра» вода – це стічна вода з раковин, душових кабін, камбузів, пральні та очищення на борту судна. Він може містити різноманітні забруднюючі речовини, включаючи фекальні коліформи, миючі засоби, олію та жир, метали, органічні сполуки, нафтові вуглеводні, поживні речовини, харчові відходи, медичні та стоматологічні відходи.
3	Забруднення повітря	На морський транспорт припадає 3,5–4 % усіх викидів, пов'язаних із зміною клімату, насамперед вуглекислого газу (CO ₂). Забруднення повітря від суден зумовлене роботою дизельних двигунів, що спалюють паливо з високим вмістом сірки. У результаті утворюються діоксид сірки, оксиди азоту, тверді частинки, а також чадний і вуглекислий газ та вуглеводні, які сприяють формуванню аерозолів і вторинних забруднювачів, зокрема озону та формальдегіду. Вихлопи судових дизельних двигунів визнані ЕРА потенційно канцерогенними та такими, що негативно впливають на якість повітря, здоров'я населення й водні екосистеми.
4	Шум (акустичне забруднення)	Шум, який створюють морські судна, шкодить морським видам, які орієнтуються на звук для орієнтації, спілкування та харчування, і можуть постраждати від цього звукового забруднення. Крім того, звук спричиняє фізичну шкоду та може викликати сильну поведінкову реакцію.
5	Біологічне забруднення (скидання баластних вод)	Скидання баластної води містить різноманітні біологічні матеріали, включаючи рослини, тварин, віруси та бактерії. Ці матеріали включають немісцеві, інвазійні, екзотичні види, які можуть завдати значних екологічних та економічних збитків водним екосистемам. Перенесення інвазійних видів через баластні води руйнує місцеві екосистеми.
6	Хімікати	Використання фарб, розчинників, антикорозійних покриттів, що містять шкідливі речовини.
7	Відходи	Утворення значної кількості твердих побутових та промислових відходів (старі запчастини, фарби). Тверді відходи, які утворюються на судні, включають скло, папір, картон, алюмінієві та сталеві банки та пластмаси. Тверді відходи, що потрапляють у морське середовище, з часом перетворюються на морське сміття і становлять загрозу для морських екосистем, населення прибережних

Продовження таблиці 2

1	2	3
		<p>територій та видів діяльності, пов'язаних з використанням морів і океанів. На судах значна частина побутових твердих відходів може спалюватися на борту, однак утворений у результаті спалювання попіл відповідно до міжнародних вимог не допускається до скидання у море. Згідно з Додатком V Міжнародної конвенції з запобігання забрудненню з суден (MARPOL 73/78), попіл від судових інсинераторів належить до твердих відходів і має зберігатися на борту з подальшою передачею до берегових приймальних споруд для утилізації або переробки. Потрапляння такого попелу у НС все ж таки можливе, а пластмаси та інші тверді відходи, у разі потрапляння в морське середовище, можуть спричинити травмування або загибель морських ссавців, риб, морських черепах і птахів унаслідок заплутування чи заковтування.</p> <p>Автори звернули увагу на круїзні судна. Хоча вони складають лише незначну частину світового флоту судноплавства, але викиди круїзних суден можуть мати значний вплив у місцевому масштабі в певних прибережних районах, які відвідують неодноразово. Судноспалювальні установки які спалюють великі обсяги сміття, пластмас та інших відходів, також викидають токсичні викиди.</p> <p>На великому круїзному судні під час одностороннього круїзу утворюється близько 8 тонн твердих побутових відходів. За підрахунками, 24 % твердих відходів, що утворюються суднами у всьому світі, надходять з круїзних суден.</p>

Джерело: розроблено авторами за даними: [1–14]

З проведеного аналізу авторами зроблено висновок, що у процесі експлуатації, ремонту та технічного обслуговування суден формується комплексний негативний вплив на морське середовище й атмосферу, зумовлений нафтозабрудненнями, скиданням льяльних, стічних і баластних вод, атмосферними викидами, шумом та утворенням значної кількості відходів. Найбільш небезпечними є нафтові вуглеводні, важкі метали, патогенні мікроорганізми та інвазійні види, які здатні накопичуватися в екосистемах, порушувати біологічні процеси й спричинити довготривалі екологічні та соціально-економічні наслідки. Суднові викиди в атмосферу роблять суттєвий внесок у зміну клімату, погіршення якості повітря та здоров'я населення, особливо в прибережних і портових районах, тоді як акустичне забруднення негативно впливає на морські організми. Особливу екологічну загрозу становлять круїзні судна через високі обсяги відходів і локальну концентрацію впливу, що зумовлює необхідність суворого дотримання міжнародних екологічних вимог і впровадження ефективних заходів з мінімізації шкоди довкіллю.

На основі узагальнених даних, наведених у таблиці 2, побудовано блок-схему взаємодії судна з НС (рис. 2), яка відображає основні напрями техногенного впливу судна на водне та повітряне середовище в процесі його експлуатації. Запропонована схема дозволяє візуалізувати взаємозв'язок між джерелами забруднення, видами викидів і екологічними наслідками, а також може бути використана як основа для подальшого екологічного моделювання та обґрунтування заходів з мінімізації негативного впливу.

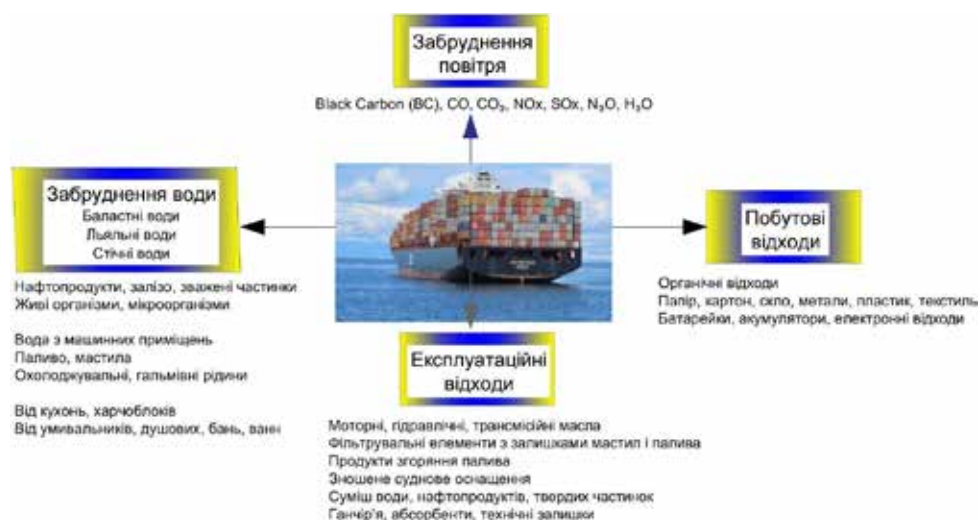


Рис. 2. Блок-схема взаємодії судна з навколишнім середовищем
Джерело: розроблено авторами

Автори статті не брали до уваги вплив акустичного поля (шум від силових установок, механізмів, гвинтів, тощо), магнітного поля (випромінювання від навігаційних приладів), електричного поля (від роботи енергетичного обладнання), теплового поля (виброси високотемпературних газів), незначний радіаційний вплив та це, не применшує вплив цих факторів на НС.

Для кількісної оцінки техногенного впливу судна на НС на етапі експлуатації запропоновано підхід, що ґрунтується на поділі експлуатаційного процесу на окремі ділянки маршруту з різними умовами руху та режимами роботи суднової енергетичної установки. Для кожної такої ділянки враховуються обсяги спожитого палива та відповідні емісійні коефіцієнти основних забруднюючих речовин. Це дозволяє визначити внесок окремих режимів експлуатації у формування сумарних викидів судна та створює передумови для оптимізації маршрутів і режимів руху з екологічної точки зору.

Найбільш суттєвим внеском у загальний екологічний вплив є викиди, що утворюються під час експлуатації судна. Вони залежать від споживання палива, технічних параметрів двигуна і тривалості роботи [15; 16].

Практичне застосування такого підходу є доцільним при порівнянні альтернативних маршрутів, виборі типу палива або оцінюванні ефективності заходів з підвищення енергоефективності суден.

Автори пропонують використовувати під час експлуатації модель викидів [17]:

$$E_{\text{експл.}} = \sum_{i=1}^n (FC_i \times EF_i), \quad (1)$$

$$E_{\text{operation}} = \sum_{i=1}^n (FC_i \times EF_i), \quad (2)$$

де FC_i – споживання палива на i -тій ділянці маршруту (т/дизель тощо);

EF_i – емісійний коефіцієнт для відповідного виду палива і показника (наприклад, CO_2 , NO_x , SO_x);

n – кількість розглянутих сегментів маршруту.

Ця модель дозволяє розрахувати вклад кожної ділянки експлуатації у загальні викиди, що важливо для оптимізації маршрутів і дистанцій.

Модель сумарних викидів ЖЦ *Total Life Cycle Emission Model* (TLCEM) інтегрує дані про матеріали, використане паливо та енергетичні витрати для розрахунку загальних викидів за весь ЖЦ. Основна формула такого моделювання включає вагові коефіцієнти для кожної категорії впливу, що дозволяє пріоритизувати заходи з мінімізації навантаження [17].

Запропонована модель оцінювання експлуатаційних викидів вписується в загальну концепцію життєвого циклу судна, оскільки дозволяє кількісно охарактеризувати екологічний вплив одного з найбільш тривалих і екологічно навантажених етапів ЖЦ. Отримані оцінки можуть бути використані як вхідні дані для інтегральної оцінки сумарного техногенного впливу судна протягом усього життєвого циклу, а також для порівняння альтернативних технічних та експлуатаційних рішень.

Висновки.

У результаті проведеного дослідження проаналізовано особливості життєвого циклу судна як складної технічної системи, що протягом усього періоду свого існування здійснює техногенний вплив на навколишнє середовище. Встановлено, що кожний етап життєвого циклу судна характеризується специфічними джерелами екологічного навантаження, які пов'язані зі споживанням енергетичних та матеріальних ресурсів, утворенням відходів і формуванням атмосферних викидів.

У роботі систематизовано основні етапи життєвого циклу судна та запропоновано їх представлення у вигляді структурної моделі, що відображає послідовність переходу від стадії формування концепції судна до завершального етапу його утилізації. На відміну від традиційного описового підходу, така модель дозволяє врахувати часову послідовність етапів, їх взаємозв'язок та накопичувальний характер екологічного впливу.

Показано, що найбільш тривалим і екологічно значущим етапом життєвого циклу є експлуатація судна, під час якої формується основна частина атмосферних викидів та інших видів техногенного навантаження. У зв'язку з цим особливу увагу приділено оцінюванню експлуатаційних викидів судових енергетичних установок.

Запропоновано підхід до оцінювання експлуатаційних викидів суден, який ґрунтується на поділі маршруту на окремі ділянки з різними режимами роботи енергетичної установки. Такий підхід дозволяє більш точно визначати сумарні обсяги викидів залежно від умов експлуатації судна та режимів його руху.

Перспективи подальших досліджень полягають у розвитку запропонованої моделі шляхом урахування більшої кількості експлуатаційних факторів, зокрема типу судна, характеристик енергетичної установки, метеорологічних умов та особливостей режимів руху, що дозволить підвищити точність оцінювання техногенного впливу морського транспорту на навколишнє середовище.

ЛІТЕРАТУРА

1. Environmental impact of shipping [Electronic resource]. URL: https://handwiki.org/wiki/Earth:Environmental_impact_of_shipping (дата звернення: 10.01.2026).
2. Williams J. Fundamentals of Marine Pollution Control. London, 1984. 129 p. URL: https://odaba.edu.ua/upload/files/11._Ekologichniy_impuls.pdf (дата звернення: 15.01.2026).
3. Короткий Т. Р. Міжнародно-правова охорона морського середовища від забруднення з суден : монографія. Одеса : Латстар, 2002. 200 с. ISBN 966-7553-96-5.
4. OECD statistics [Electronic resource]. URL: <https://www.statista.com/map/oecd/> (дата звернення: 10.01.2026).
5. S&P Global Energy. Eurasia's Energy Intelligence [Electronic resource]. URL: <https://energy.spglobal.com/eurasia/oil-gas> (дата звернення: 17.01.2026).
6. Пізінцалі Л. В. Методологічні основи організаційних процесів утилізації суден : монографія. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2021. 308 с. ISBN 978-966-289-488-2.
7. Забезпечення екологічної безпеки судноплавства : монографія / В.Е. Леонов, О.В. Соляков, П.Г. Хімич, В.Ф. Ходаковський ; за ред. В.Е. Леонова. Херсон : ХГМА, 2014. 188 с. ISBN 978-617-7170-04-3.
8. Міжнародна конвенція по запобіганню забрудненню з суден 1973 року [Electronic resource]. База даних «Законодавство України». URL: http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/896_009 (дата звернення: 17.01.2026).
9. Пізінцалі Л.В., Шумило О.М., Александровська Н.І. та ін. Вплив утилізації суден методом затоплення на екологію та безпеку судноплавства. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2022. № 1. doi: 10.15589/znr2022.1 (488).1.
10. Александровська Н.І., Россомаха О.І., Пізінцалі Л.В. та ін. Судноремонт та утилізація: екологічні виклики затонулих суден України. *Вісник Одеського національного морського університету*. 2025. № 75. С. 122–143. doi: 10.47049/2226-1893-2025-1-122-143.
11. Пізінцалі Л. В., Александровська Н. І., Россомаха О. І. та ін. Аналіз затоплених та кинутих суден в Україні: вплив на екологічну безпеку прибережних морських акваторій і берегових зон. *Дніпровські читання-2024 : V міжнар. наук.-практ. конф. : матеріали*. Київ, 2024. С. 234–240. doi: 10.33298.
12. Баластні води [Electronic resource]. Енциклопедія сучасної України. URL: <https://esu.com.ua/article-41175> (дата звернення: 15.01.2026).
13. Побутові відходи, що утворюються на судні [Electronic resource]. *Офіційний портал Верховної Ради України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/term> (дата звернення: 17.01.2026).
14. Про вплив низькочастотних акустичних коливань на морське середовище [Electronic resource]. Інститут гідромеханіки НАН України. URL: <https://hydromech.org.ua/content/pdf> (дата звернення: 20.01.2026).

15. Assessing Environmental Impacts of Ships from a Life Cycle Perspective [Electronic resource]. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/280313109_Assessing_Environmental_Impacts_of_Ships_from_a_Life_Cycle_Perspective (дата звернення: 24.01.2026).
16. Parametric Trend Life Cycle Assessment of Ships [Electronic resource]. Springer. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-022-02091-4> (дата звернення: 25.01.2026).doi: 10.1007/s11367-022-02091-4.
17. Total Life Cycle Emission Model (TLCEM). *Journal of the Air & Waste Management Association* [Electronic resource]. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10962247.2018.1505675> doi: 10.1080/10962247.2018.1505675 (дата звернення: 20.01.2026).

REFERENCES

1. Environmental impact of shipping. (n.d.). Retrieved January 27, 2026, from https://handwiki.org/wiki/Earth:Environmental_impact_of_shipping [in English].
2. Williams, J. (1984). *Fundamentals of marine pollution control*. London. Retrieved January 27, 2026, from https://odaba.edu.ua/upload/files/11._Ekologichniy_impuls.pdf [in English].
3. Korotkyi, T. R. (2002). International legal protection of the marine environment from ship-source pollution [Mizhnarodno-pravova okhrona morskoho seredovyscha vid zabrudnennia z suden]. Odesa: Latstar [in Ukrainian].
4. OECD statistics. (n.d.). Retrieved January 27, 2026, from <https://www.statista.com/map/oecd/> [in English].
5. Eurasia's energy intelligence. (n.d.). S&P Global Energy. Retrieved January 27, 2026, from <https://energy.spglobal.com/eurasia/oil-gas> [in English].
6. Pizintsali, L. V. (2021). Methodological foundations of organizational processes of ship recycling [Metodolohichni osnovy orhanizatsiinykh protsesiv utylizatsii suden]. Kherson: OLDI-PLIuS [in Ukrainian].
7. Leonov, V.E. (Ed.), Soliakov, O.V., Khimich, P.H., & Khodakovskiy, V.F. (2014). Ensuring environmental safety of navigation [Zabezpechennia ekolohichnoi bezpeky sudnoplavstva]. Kherson: KhSMA [in Ukrainian].
8. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973 (MARPOL). (1973). Retrieved January 27, 2026, from http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/896_009 [in Ukrainian].
9. Pizintsali, L.V., Shumylo, O.M., Aleksandrovska, N.I., et al. (2022). Impact of ship disposal by sinking on ecology and navigation safety [Vplyv utylizatsii suden metodom zatoplennia na ekolohiiu ta bezpeku sudnoplavstva]. Proceedings of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, (1). doi:10.15589/znp2022.1 (488).1 [in Ukrainian].
10. Aleksandrovska, N.I., Rossomakha, O.I., Pizintsali, L.V., et al. (2025). Ship repair and recycling: Environmental challenges of sunken ships of Ukraine [Sudnoremont ta utylizatsiia: ekolohichni vyklyky zatonulykh

- suden Ukrainy]. *Bulletin of the Odessa National Maritime University*, (75), 122–143. doi:10.47049/2226-1893-2025-1-122-143 [in Ukrainian].
11. Pizintsali, L.V., Aleksandrovska, N.I., Rossomakha, O.I., et al. (2024). Analysis of sunken and abandoned ships in Ukraine: Impact on environmental safety of coastal marine areas and coastal zones [Analiz zatoplenykh ta kynutykh suden v Ukraini: vplyv na ekolohichnu bezpeku pryberezhnykh morskyykh akvatorii i berehovykh zon]. In *Dnipro Readings 2024: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference* (pp. 234–240). Kyiv. doi:10.33298 [in Ukrainian].
 12. Ballast waters. (n.d.). Encyclopedia of Modern Ukraine. Retrieved January 27, 2026, from <https://esu.com.ua/article-41175> [in Ukrainian].
 13. Household waste generated on board a ship. (n.d.). Official Portal of the Verkhovna Rada of Ukraine. Retrieved January 27, 2026, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/term> [in Ukrainian]
 14. On the impact of low-frequency acoustic oscillations on the marine environment. (n.d.). Institute of Hydromechanics of NAS of Ukraine. Retrieved January 27, 2026, from <https://hydromech.org.ua/content/pdf> [in Ukrainian].
 15. Assessing environmental impacts of ships from a life cycle perspective. (n.d.). ResearchGate. Retrieved January 27, 2026, from https://www.researchgate.net/publication/280313109_Assessing_Environmental_Impacts_of_Ships_from_a_Life_Cycle_Perspective [in English].
 16. Parametric trend life cycle assessment of ships. (2022). *The International Journal of Life Cycle Assessment*. doi:10.1007/s11367-022-02091-4 [in English]
 17. Total life cycle emission model (TLCEM). (2018). *Journal of the Air & Waste Management Association*. doi:10.1080/10962247.2018.1505675 [in English].

Дата першого надходження статті до видання: 22.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 26.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026