УДК 656.6-042.5/.8:502/504 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.30

О. І. РОССОМАХА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри навігації і керування судном,
доцент кафедри суднобудування і судноремонту
імені професора Ю. Л. Воробйова
Навчально-науковий інститут морського флоту
Одеського національного морського університету
ORCID: 0000-0002-4425-2192

Л. В. ПІЗІНЦАЛІ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри суднобудування і судноремонту
імені професора Ю. Л. Воробйова
Навчально-науковий морський інженерно-технічний інститут
Одеського національного морського університету
ORCID: 0000-0002-8046-0917

Г. Г. ТОМЧАКОВСЬКИЙ
старший викладач кафедри навігації і керування судном
Навчально-науковий інститут морського флоту
Одеського національного морського університету
ORCID: 0000-0002-9799-4368

О. А. РОССОМАХА
доцент, начальник навчально-методичного відділу,
доцент кафедри суднових енергетичних систем і комплексів
Навчально-науковий інститут морського флоту
Одеського національного морського університету
ORCID: 0000-0002-0230-9453

Н. І. АЛЕКСАНДРОВСЬКА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри суднобудування і судноремонту
імені професора Ю. Л. Воробйова,
доцент кафедри суднових енергетичних систем і комплексів
Навчально-науковий морський інженерно-технічний інститут
Одеського національного морського університету
ORCID: 0000-0001-6591-2068

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ СУДЕН ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ: СУЧАСНІ ПРАКТИКИ, МІЖНАРОДНІ ТА НАЦІОНАЛЬНІ ВИКЛИКИ

В статті проведено комплексний аналіз існуючих стратегій та технологій зниження викидів у судноплавстві, зокрема в контексті внутрішнього судноплавства України. Дослідження охоплює широкий спектр питань від міжнародних ініціатив до національних особливостей впровадження енергоефективних рішень.

Розглянута проблема оцінки енергоефективності внутрішнього судноплавства в Україні, проаналізовано стратегії IMO та реалії внутрішніх водних шляхів. Особлива увага приділяється дорожній карті Центральної комісії з судноплавства на Рейні зі зменшення викидів, яка пропонує багатоетапний підхід до скорочення шкідливих речовин у повітрі. Підкреслюється важливість вдосконалення технологій енергоефективності суден, впровадження нових видів палива та зміни управлінських стратегій у галузі.

Детально аналізуються технічні рішення, включаючи використання емульгованого палива, що поєднує воду та важке суднове паливо і забезпечує більш чисте згоряння, знижуючи викиди NO_x *до 30 %. Досліджуються перспективи біодизельних сумішей, зокрема суміш B20, яка зменшує викиди* CO *на 19 % і* CH *на 25 %. Розглядається оптимізація швидкості та співвідношення палива як ефективний спосіб мінімізації вуглецевого сліду через математичне моделювання оптимальних параметрів маршруту та потужності двигуна.*

© Россомаха О. І., Пізінцалі Л. В., Томчаковський Г. Г., Россомаха О. А., Александровська Н. І., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Особливе місце відведено аналізу індексів енергоефективності, таких як EEDI та EEOI, які є ключовими інструментами оцінки та контролю викидів CO_2. EEDI розраховується на основі конструктивних характеристик судна та стимулює впровадження енергоефективних технологій у проектуванні, тоді як EEOI надає інформацію про реальну ефективність судна під час експлуатації.

Значну увагу приділено ролі міжнародних платформ співпраці, таких як PLATINA 3, Waterborne Technology Platform (WTP), European Maritime Safety Agency (EMSA), The Clean Shipping Coalition (CSC), які об'єднують державні, приватні та науково-дослідні організації для створення екологічно стійкого середовища розвитку судноплавства.

Інноваційним є аналіз впливу адитивних технологій, зокрема 3D-друку, на енергоефективність суден. Розглядаються можливості використання 3D-друку для виготовлення компонентів від невеликих деталей до великих елементів, включаючи гребні гвинти та секції корпусів. Особлива увага приділяється проблемам шорсткості поверхні та точності розмірів, що впливають на механічні властивості та експлуатаційні характеристики деталей.

Аналізуються українські наукові розробки у сфері енергоефективності судноплавства, включаючи нові підходи до формування індексу енергоефективності для великотоннажних караванів на Дунаї та практичні результати судноплавних компаній.

Результати аналізу можуть бути корисними для вчених та фахівців у галузі внутрішнього судноплавства для розробки ефективних стратегій та політик з питань зменшення викидів парникових газів та поліпшення енергоефективності суден, а також для інтеграції України у міжнародну екологічну політику судноплавства.

Ключові слова: *стратегії IMO, шкідливі викиди, енергоефективність, внутрішнє плавання, паливна ефективність, 3-D друкування.*

O. I. ROSSOMAKHA
PhD, 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
Merchant Marine Institute
of Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0002-4425-2192

L. V. PIZINTSALI
Ph.D., Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Shipbuilding and Ship Repair
named after Prof. Yu. L. Vorobyov
Educational and Scientific Marine Engineering and Technical Institute
of Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0002-8046-0917

G. G. TOMCHAKOVSKY
Senior Lecturer at the Department of Navigation and Control of the Ship
Merchant Marine Institute
of Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0002-9799-4368

O. A. ROSSOMAKHA
Associate Professor, Head of the Educational and Methodological Department,
Associate Professor at the Department of Ship Power Systems and Complexes
Merchant Marine Institute
of Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0002-0230-9453

N. I. ALEKSANDROVSKA
PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Shipbuilding and Ship Repair
named after Prof. Yu. L. Vorobyov,
Associate Professor at the Department of Ship Power Systems and Complexes
Educational and Scientific Marine Engineering and Technical Institute
of Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0001-6591-2068

ENERGY EFFICIENCY OF SHIPS AS A TOOL FOR REDUCING EMISSIONS: CURRENT PRACTICES, INTERNATIONAL AND NATIONAL CHALLENGES

The article provides a comprehensive analysis of existing strategies and technologies for reducing emissions in shipping, in particular in the context of Ukrainian domestic shipping. The study covers a wide range of issues from international initiatives to national peculiarities of energy efficiency solutions implementation.

The problem of assessing the energy efficiency of inland navigation in Ukraine is considered, IMO strategies and the realities of inland waterways are analyzed. Particular attention is paid to the Central Commission for Navigation on the Rhine's roadmap for reducing emissions, which offers a multi-stage approach to reducing harmful substances in the air. The importance of improving ship energy efficiency technologies, introducing new fuels and changing management strategies in the industry is emphasized.

Technical solutions are analyzed in detail, including the use of emulsified fuel, which combines water and heavy marine fuel and provides cleaner combustion, reducing NO_x *emissions by up to 30 %. The prospects of biodiesel blends are being investigated, in particular the B20 blend, which reduces* CO *emissions by 19 % and* CH *emissions by 25 %. Optimization of speed and fuel ratio is considered as an effective way to minimize the carbon footprint through mathematical modeling of optimal route parameters and engine power.*

A special place is given to the analysis of energy efficiency indices, such as EEDI and EEOI, which are key tools for assessing and controlling CO_2 *emissions. The EEDI is calculated based on the ship's design characteristics and stimulates the introduction of energy-efficient technologies in design, while the EEOI provides information on the actual efficiency of the ship during operation.*

Considerable attention is paid to the role of international cooperation platforms, such as PLATINA 3, Waterborne Technology Platform (WTP), European Maritime Safety Agency (EMSA), The Clean Shipping Coalition (CSC), which bring together public, private and research organizations to create an environmentally sustainable shipping environment.

An innovative approach is to analyze the impact of additive technologies, in particular 3D printing, on the energy efficiency of ships. The possibilities of using 3D printing to manufacture components ranging from small parts to large elements, including propellers and hull sections, are considered. Particular attention is paid to the problems of surface roughness and dimensional accuracy, which affect the mechanical properties and performance of parts.

Ukrainian scientific developments in the field of energy efficiency of shipping are analyzed, including new approaches to the formation of an energy efficiency index for large caravans on the Danube and practical results of shipping companies.

The results of the analysis can be useful for scientists and experts in the field of inland navigation to develop effective strategies and policies to reduce greenhouse gas emissions and improve energy efficiency of ships, as well as to integrate Ukraine into international environmental shipping policy.

Key words: *IMO strategies, harmful emissions, energy efficiency, inland navigation, fuel efficiency, 3-D printing.*

Вступ

Сучасний стан судноплавства є важливим елементом світової економіки, однак він також створює значні екологічні проблеми. За оцінками Міжнародної морської організації (IMO), судноплавство є відповідальним за близько 2–3 % глобальних викидів парникових газів, що сприяють зміні клімату та забрудненню навколишнього середовища. У зв'язку з цим, досягнення цілей декарбонізації та зниження шкідливих викидів є необхідним для збереження екологічної рівноваги та сталого розвитку судноплавного сектору. Одним із ключових шляхів досягнення цих цілей є вдосконалення технологій енергоефективності суден, впровадження нових видів палива та зміна управлінських стратегій у галузі. У цьому контексті важливою складовою є також скорочення викидів у внутрішньому судноплавстві, яке займає значну частину глобального транспортного ринку.

Значну роль у зменшенні негативного впливу судноплавства на навколишнє середовище можуть відігравати новітні технології, вдосконалені нормативно-правові акти та міжнародні ініціативи. Одним із таких інструментів є програми скорочення викидів CO_2 та інших забруднювальних речовин, а також розвиток альтернативних видів палива і технологій, орієнтованих на зниження енергоспоживання. Ці питання стали пріоритетними для багатьох країн і міжнародних організацій, зокрема для ЄС, IMO та інших.

Таким чином, дослідження проблеми зниження викидів у судноплавстві є надзвичайно важливим як для світової практики, так і для національного рівня. Воно сприяє формуванню ефективних рішень, що забезпечать інтеграцію України у міжнародну екологічну політику судноплавства.

Постановка проблеми

Сучасне судноплавство є однією з найбільших складових глобальної транспортної системи, але водночас воно є значним джерелом викидів парникових газів та інших забруднювачів, що негативно впливають на навколишнє середовище. З огляду на глобальне прагнення до скорочення викидів CO_2 та інших шкідливих речовин, зростає актуальність розробки та впровадження ефективних стратегій для зниження екологічного сліду судноплавства.

Проблема декарбонізації морського та внутрішнього судноплавства має ключове значення не тільки на міжнародному рівні, але й для України, яка має значний потенціал розвитку внутрішньої судноплавної мережі. Зокрема, впровадження інноваційних технологій, таких як використання біопалива та альтернативних джерел енергії,

а також оптимізація технічних характеристик суден, є необхідним кроком для досягнення цілей сталого розвитку та зменшення викидів у судноплавному секторі.

Це дослідження є актуальним у контексті глобальних ініціатив, таких як Стратегія декарбонізації IMO, а також є важливим для розвитку українських інфраструктурних проектів у галузі судноплавства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У науковій літературі останніх років простежується стійкий інтерес до проблеми підвищення енергоефективності судноплавства та зниження викидів.

У роботах [1, 3, 5, 8] висвітлено підходи до оцінювання ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, що безпосередньо впливають на витрати палива та надійність експлуатації

У свою чергу, у роботах [2, 4, 9, 12], що вдосконалення методів навігації є одним із дієвих інструментів підвищення енергоефективності суден

Значний внесок у дослідження зроблено у [10, 13], де проаналізовано вплив альтернативних палив на вартість життєвого циклу судна. Автори показали, що використання біопалив та їх сумішей може суттєво знизити викиди CO_2 при збереженні економічної доцільності

Окрему увагу приділено впливу шорсткості гребного гвинта на витрати суднового палива. Дослідження [11], підтвердили, що навіть незначне збільшення шорсткості веде до зростання опору і, відповідно, витрат палива

У [9, 12, 14] зосереджено увагу на зв'язку між енергоефективністю та безпекою експлуатації суден. Автори доводять, що оптимізація енергетичних показників прямо впливає на зниження аварійності та підвищення загальної надійності судноплавства

Таким чином, останні публікації висвітлюють комплексність проблеми енергоефективності: від технічних рішень та альтернативних палив до впливу конструктивних особливостей і безпеки експлуатації. Це формує наукове підґрунтя для інтегрованих підходів до зниження викидів у судноплавстві.

Формулювання мети дослідження

Метою цього дослідження є аналіз існуючих стратегій та технологій зниження викидів у судноплавстві, зокрема в контексті внутрішнього судноплавства України. Завданням є вивчення ефективності альтернативних видів палива, інноваційних технологій та методів оцінки енергоефективності для зниження викидів CO_2. Доведення необхідності розробки рекомендацій щодо впровадження міжнародних стандартів та політик у практику українського судноплавства для досягнення сталого розвитку галузі.

Викладення основного матеріалу дослідження

У контексті посилення глобальних екологічних викликів, скорочення викидів у судноплавстві стає стратегічним пріоритетом для більшості морських держав. Одним із найважливіших документів, що окреслює шлях до декарбонізації, є дорожня карта Центральної комісії з судноплавства на Рейні (ЦКСР) зі зменшення викидів внутрішнього судноплавства [1]. Вона пропонує багатоетапний підхід до зменшення шкідливих речовин у повітрі, що є критично важливим у Європі.

Серед технічних рішень особливу увагу привертає використання емульгованого палива, що поєднує воду та важке суднове паливо [2]. Дослідження свідчать, що така суміш забезпечує більш чисте згоряння та може знизити викиди NO_x до 30 %.

Разом з тим, за даними останніх аналітичних оглядів, IMO наразі не виконує власну стратегію щодо декарбонізації, оскільки регуляторні рамки залишаються фрагментарними [3]. Це підкреслює потребу у впровадженні нових, більш жорстких норм на глобальному рівні.

Серед альтернативних джерел енергії активно досліджується використання біодизельних сумішей. Наприклад, експериментальні тести показали, що суміш B20 (20 % біодизеля, 80 % дизеля) зменшує викиди CO на 19 % і CH на 25 % [4].

Оптимізація швидкості та співвідношення палива – ще один перспективний напрям досліджень. Зокрема, математичне моделювання дозволяє визначити оптимальні параметри маршруту та потужності двигуна для мінімізації вуглецевого сліду [5].

Згідно з Четвертим дослідженням IMO щодо викидів парникових газів, судноплавство у 2018 році відповідало за 2,89 % глобальних викидів CO_2 [6]. Це вимагає системного підходу до зменшення впливу галузі на зміну клімату.

Українські науковці активно долучаються до вирішення проблеми підвищення енергоефективності в судноплавстві. Активно аналізуються сучасні методики вимірювання споживання палива та викидів CO_2, а також вплив енергоефективних технологій на судноплавні системи. Особлива увага приділяється використанню альтернативних палив та оптимізації швидкості як способів зниження споживання палива та викидів. Науковці [7, 8] пропонують новий підхід до формування індексу енергоефективності, який враховує специфіку внутрішнього судноплавства, зокрема використання великотоннажних караванів на Дунаї. Цей підхід дозволяє комплексно оцінювати енергоефективність суден, враховуючи реальні умови експлуатації.

Крім того, фахівці Одеського національного морського університету досліджують вплив енергоефективності на безпеку експлуатації суден. У їхніх роботах аналізуються основні параметри енергоефективності [9, 10] та їх

взаємозв'язок з безпекою плавання [11], що підкреслює важливість комплексного підходу до впровадження енергоефективних заходів у судноплавстві [12–14].

Практичні результати також досягаються на рівні судноплавних компаній. Наприклад, ПрАТ «Українське дунайське пароплавство» впровадило нові норми витрат палива для портових буксирів. Після проведених випробувань було виявлено, що фактичні витрати палива значно нижчі за встановлені норми, що дозволяє компанії значно економити ресурси та знижувати екологічний вплив. [15]

Суттєвим інструментом контролю енергоспоживання є індекс енергоефективності проєктування суден (*EEDI*) [16]. Його суть полягає у розрахунку питомих викидів CO_2 на тонно-милю вантажу [17].

EEDI обчислюється на основі конструктивних характеристик судна, включаючи його розміри, тип двигуна та інші параметри, що впливають на споживання палива. Використання *EEDI* стимулює впровадження енергоефективних технологій та інновацій у проектуванні суден, таких як оптимізація форми корпусу, використання альтернативних джерел енергії та вдосконалення систем управління. Також, *EEDI* є частиною глобальної стратегії IMO щодо скорочення викидів парникових газів у морському транспорті, що сприяє сталому розвитку галузі та охороні навколишнього середовища.

Розрахунок *EEDI* ґрунтується на припущеннях щодо питомого споживання палива двигунами (у г/кВт-год) порівняно з потужністю, встановленою на судні. Повна формула *EEDI* (детально описана в MEPC.1/Circ.681) включає кілька поправок і коефіцієнтів, пристосованих до конкретних класів суден і різних конфігурацій та умов експлуатації.

Для нових суден *EEDI* є мірою «проектної» ефективності судна, але він не дає жодних вказівок щодо його експлуатаційної ефективності. У зв'язку з цим два судна-близнюки з однаковим значенням *EEDI* можуть мати різні викиди залежно від коефіцієнта завантаження, морських умов і способу експлуатації судна. *EEDI* є статичним показником, якщо тільки судно не зазнає значного переобладнання [17].

$$EEDI = \frac{\text{Power installed} \cdot \text{Specific fuel consumption} \cdot \text{Carbon conversion}}{\text{Available capacity} \cdot \text{Speed}}$$

Керівництво щодо розрахунку досягнутого *EEDI* (2018) [18] та оновлене керівництво *EEDI* 2022 року [19] містять більш точні методи оцінки відповідності суден екологічним стандартам.

Окрему увагу варто приділити індексам енергоефективності для обчислення вуглецевого сліду у внутрішньому судноплавстві. Такі індекси, зокрема *EEOI* (*Energy Efficiency Operational Indicator*), вже застосовуються на практиці [20].

EEOI – показник, який надає інформацію про ефективність роботи судна під час експлуатації. Розрахунок базується на споживанні палива окремим судном і даних про виконану транспортну роботу (наприклад, маса вантажу, кількість перевезених пасажирів тощо), в результаті чого отримують показник викидів CO_2 на тонну морської милі. Повне рівняння *EEOI* міститься в циркулярному листі MEPC.1/Circ.684 і може бути узагальнене, як показано нижче.

$$EEOI = \frac{\text{Fuel consumption} \cdot \text{Carbon conversion}}{\text{Distance sailed} \cdot \text{Cargo transported}}$$

На відміну від *EEDI*, *EEOI* не обмежується новими суднами і може використовуватися для вимірювання «реальної» ефективності судна, що експлуатується, а також для оцінки впливу будь-яких змін, таких як очищення корпусу і гвинтів, повільне пропарювання, поліпшення планування рейсу тощо. *EEOI* можна покращити, збільшивши кількість перевезеного вантажу або застосувавши будь-який захід, спрямований на зменшення споживання палива (наприклад, повільне випаровування, модифікація судна, планування маршрутів з урахуванням погодних умов і т.ін.). Однак, оскільки розрахунок *EEOI* залежить від діяльності судна, він буде змінюватися, можливо, значно, з часом і між рейсами. Тому він не може бути використаний для встановлення фіксованої цифри – наприклад, «мітки», що відображає поточні показники судна. [17]

Важливе значення для сталого розвитку та зниження викидів в межах судноплавства мають платформи співпраці, такі як PLATINA 3, Waterborne Technology Platform (WTP), European Maritime Safety Agency (EMSA), The Clean Shipping Coalition (CSC) та ін.

Ці платформи, об'єднують державні, приватні та науково-дослідні організації, щоб створити екологічно стійке і технологічно інноваційне середовище для розвитку судноплавства. Вони допомагають розробляти політики, втілювати новітні технології і створювати стратегії для зменшення впливу транспорту на навколишнє середовище.

PLATINA 3 – це ініціатива в межах Європейського Союзу, спрямована на поліпшення транспортної інфраструктури та зменшення викидів у галузі судноплавства. Вона є частиною програми, що орієнтується на досягнення

стійкої та ефективної транспортної системи через інтеграцію інноваційних рішень у сфері логістики та інфраструктури [21].

Waterborne Technology Platform (WTP) [22] – ця платформа об'єднує ключових учасників морської та річкової індустрії з метою розвитку інноваційних технологій для зменшення впливу судноплавства на навколишнє середовище.

EMSA [23] є основною агенцією ЄС, що займається безпекою та охороною навколишнього середовища в морському та річковому судноплавстві. Вона забезпечує впровадження європейських стандартів безпеки та охорони навколишнього середовища для суден, які працюють в європейських водах.

CSC [24] – це міжнародна платформа, яка об'єднує організації, що працюють над зменшенням викидів від судноплавства, зокрема парникових газів.

Суднобудівна галузь прагне до підвищення енергоефективності та зниження витрат за рахунок впровадження адитивних технологій. Однак широке застосування 3D-друку обмежується проблемами шорсткості поверхні та точності розмірів, що впливає на механічні властивості та експлуатаційні характеристики деталей.

Використання 3D-друку на борту морських суден може суттєво змінити парадигму технічного обслуговування систем безпеки, підвищуючи оперативність, автономність і адаптивність морських операцій, енергоефективність суден.

У суднобудівній галузі спостерігається зростаюче впровадження 3D-друку для будівництва, ремонту і технічного обслуговування суден. Ключові переваги цієї технології включають зниження витрат, прискорення виробництва, гнучкість проектування і доступність деталей на вимогу, і як наслідок – підвищення енергоефективності судна. Незважаючи на значний потенціал, існують такі проблеми, як стандартизація, сертифікація, обмеження матеріалів і потреба в кваліфікованому персоналі. Проте, зростаюче число успішних впроваджень і багатообіцяюче майбутнє вказують на те, що ця технологія відіграватиме дедалі важливішу роль у підвищенні енергоефективності судна та, взагалі, стійкості морської галузі.

Сучасна морська галузь характеризується такими тенденціями, як зростаюча автоматизація, необхідність ефективного технічного обслуговування та важливість сталого розвитку. У цьому контексті 3D-друк є проривною технологією, здатною задовольнити ці зростаючі потреби. Хоча спочатку увага була зосереджена на використанні 3D-друку для технічного обслуговування засобів індивідуального захисту на суднах але сьогодні, сфери застосування значно розширені, охоплюючи ширший спектр можливостей у суднобудуванні та ремонті.

Суднобудування – одна з багатьох галузей, у якій технології тривимірного друку використовуються дедалі частіше: ми вже бачили найрізноманітніші рішення, починаючи з сертифікованого гребного гвинта (рис. 1), що друкується на 3D-принтері, до регулювання питань використання високих технологій та інтелектуальної власності в морському судноплавстві.

3D-друк використовується для виготовлення широкого спектру компонентів, від невеликих складних деталей (таких як клапани та насоси), до великих елементів (таких як гребні гвинти і секції корпусів).

Суднобудівники можуть створювати нестандартні деталі складної геометрії, які важко чи неможливо виготовити традиційними методами. Наприклад, успішно надруковано та встановлено великий клапанний колектор на авіаносці (HII Newport News Shipbuilding (США), рис. 2.

Рис. 1. Перший у світі гребний гвинт, надрукований на 3D-принтері з нікель-алюміній-бронзового сплаву за допомогою дугового зварювання

Джерело: [25]

Рис. 2. Клапанний колектор американського авіаносця

Джерело: [26]

Відомо, що шорсткість поверхні корпусу судна та гребного гвинта суттєво впливають на енергоефективність судна. Шорсткість поверхні визначається параметрами R_a, R_z, R_{max}, вимірюваними за допомогою профілометрів і 3D-сканерів.

Найпоширеніші методи оцінювання:

– Контактні методи: механічні профілометри, що дають змогу вимірювати нерівності з високою точністю.
– Безконтактні методи: лазерні та оптичні сканери, інтерферометрія.
– Методи комп'ютерного аналізу: 3D-сканування і порівняння з CAD-моделлю.

Для оцінки точності розмірів застосовуються координатно-вимірювальні машини і цифрові вимірювальні системи.

Зарубіжні дослідження показують, що:

– зниження висоти шару до 50 мкм зменшує Ra на 30–50 %;
– багатопроменева лазерна обробка (в DMLS) знижує пористість на 20–40 %;
– контроль температурного режиму зменшує внутрішні напруги.

Найефективнішими методами зарубіжні дослідження визнають лазерну постобробку й електрохімічне полірування, оскільки вони дають змогу зменшити шорсткість до Ra < 1 мкм без значних змін геометрії.

Досвід провідних компаній показує:

– **GE Additive** (США): застосування лазерного полірування в авіації та суднобудуванні знизило шорсткість деталей до Ra = 0.4 мкм.

– **Siemens** (Німеччина): впровадження комбінованої постобробки (лазерна + електрохімічна) дало змогу досягти точності ±0.05 мм.

– **Rolls-Royce** (Великобританія): використання SLM і гальванопокриття збільшило термін служби деталей на 30 %.

Міжнародні стандарти, так як ISO 25178 [27] та комітети (наприклад, Комітет F42 з технологій адитивного виробництва, ASTM F42) [28] регламентують допуски за шорсткістю і точністю. Сучасні зарубіжні дослідження прагнуть до зниження шорсткості до Ra < 1 мкм і відхилень розмірів менше 0.1 мм.

Отже, на шорсткість і точність деталей впливає вибір технології, параметри друку і тип матеріалу, а параметри шорсткості – на енергоефективність.

У світлі глобальних екологічних викликів, скорочення викидів у судноплавстві стає важливим стратегічним пріоритетом для більшості морських держав. Для України, яка має значний потенціал у галузі внутрішнього та річкового судноплавства, критично важливо розробити рекомендації для впровадження міжнародних стандартів, щоб досягти сталого розвитку галузі. Це забезпечить не лише зменшення екологічного впливу, а й покращення конкурентоспроможності українських судноплавних компаній на міжнародному ринку. Українські судноплавні компанії повинні адаптуватися до цих стандартів для підтримки конкурентоспроможності та забезпечення ефективного інтегрування в міжнародну систему.

Впровадження інноваційних технологій, таких як емульговане паливо, біодизельні суміші, оптимізація швидкості і енергоефективні технології є критичним для скорочення викидів CO_2, NO_x та інших шкідливих речовин. Розробка рекомендацій, що інтегрують ці технології в національну практику, дозволить не лише знизити викиди,

а й зменшити залежність від традиційних енергоресурсів. А співпраця з міжнародними платформами допоможе Україні долучитися до глобальних ініціатив щодо сталого розвитку судноплавства. Такі платформи створюють умови для обміну досвідом, розробки інноваційних рішень та ефективного впровадження новітніх технологій.

Результати дослідження. Розробка рекомендацій для впровадження міжнародних стандартів та політик у практику українського судноплавства є необхідною для досягнення сталого розвитку галузі. Вони повинні включати адаптацію до глобальних екологічних вимог, використання інноваційних технологій, інтеграцію енергоефективних індексів та розвиток альтернативних джерел енергії. Це дозволить не лише зменшити екологічний вплив, а й підвищити ефективність роботи судноплавних компаній, зробивши їх більш конкурентоспроможними на міжнародному рівні.

Висновки

У результаті проведеного аналізу існуючих стратегій та технологій скорочення викидів у судноплавстві можна зробити декілька важливих висновків.

1. Для ефективного зменшення викидів парникових газів у судноплавстві важливо застосовувати комплексні стратегії, що включають технічні інновації, зміни у нормативно-правовій базі та широке впровадження альтернативних джерел енергії.
2. Технології використання емульгованого палива та біодизельних сумішей демонструють обнадійливі результати у зниженні викидів NO_x та CO_2 [2, 4]. Продовження досліджень та впровадження таких інноваційних рішень може суттєво зменшити екологічний слід судноплавного сектору.
3. Суперечності в існуючих регуляціях IMO [3], відсутність єдиного механізму декарбонізації свідчать про те, що необхідно посилювати глобальні зусилля для досягнення сталого розвитку морської галузі. Інноваційні ініціативи та розробки, як, наприклад, нові методи розрахунку *EEDI*, можуть стати основою для подальших кроків у цьому напрямку.
4. Використання індексів енергоефективності, таких як *EEDI* та *EEOI*, допомагає не лише оцінювати ефективність існуючих суден, але й визначати потенціал для поліпшення їх роботи. Це дозволяє знизити викиди CO_2 та зробити судноплавство більш ефективним і стійким.
5. Наукові дослідження та міжурядова співпраця з міжнародними платформами, є важливими інструментами для поширення передового досвіду і впровадження інновацій у галузі. Така співпраця може допомогти країнам швидше адаптуватися до змінних умов та досягти поставлених екологічних цілей. Ініціативи PLATINA 3, WTP, EMSA, CSC, Green Marine сприяють обміну досвідом, впровадженню стандартів та інновацій у галузі.
6. Україна має значний потенціал для покращення енергоефективності внутрішнього судноплавства. Наукові та технічні дослідження, впровадження нових норм витрат палива, а також розробка індексів енергоефективності – створюють основу для екологізації українського судноплавства.

Автори вважають, що для досягнення реального скорочення викидів в судноплавстві необхідно об’єднати зусилля урядів, міжнародних організацій, науковців та індустрії. Лише комплексний підхід дозволить не лише покращити екологічний стан, а й забезпечити економічну сталість галузі у майбутньому.

Список використаної літератури

1. Central Commission for the Navigation of the Rhine (CCNR). CCNR Roadmap for reducing inland navigation emissions [Електронний ресурс]. Strasbourg Cedex: CCNR, 2022. 75 p. URL: https://www.ccr-zkr.org/files/documents/Roadmap/Roadmap_en.pdf (дата звернення: 04.08.2025).
2. Lee T., Cho J., Lee J. Mixing properties of emulsified fuel oil from mixing marine bunker-c fuel oil and water [Електронний ресурс]. Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10, No. 11. P. 1610. DOI: https://doi.org/10.3390/jmse10111610
3. Bach H., Hansen T. IMO off course for decarbonization of shipping? Three challenges for stricter policy [Електронний ресурс]. Marine Policy. 2023. Vol. 147. P. 105379. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105379
4. Zhang Y., Liu Y., Wang J., Li C. Effects of different biodiesel-diesel blend fuel on combustion and emission characteristics of a diesel engine [Електронний ресурс]. Processes. 2021. Vol. 9, No. 11. P. 1984. DOI: https://doi.org/10.3390/pr9111984
5. Shih Y-C., Chang S.-L., Huang Y.-H., Lin C.-T. Speed and fuel ratio optimization for a dual-fuel ship to minimize its carbon emissions and cost [Електронний ресурс]. Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11, No. 4. P. 758. DOI: https://doi.org/10.3390/jmse11040758
6. Faber J. та ін. Fourth IMO GHG Study. MEPC 75/7/15 [Електронний ресурс]. London: International Maritime Organization, 2020. 524 p. URL: https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/07/Fourth-IMO-GHG-Study-2020-Full-report-and-annexes_compressed.pdf
7. Suvorov P. S., Tarasenko T. V., Zalozh V. I. Restrictive factors in the evaluation of the inland pushers’ energy efficiency with heavy convoys [Електронний ресурс]. Automation of Ship Technical Facilities. 2020. Vol. 26, No. 1. P. 94–109. DOI: https://doi.org/10.31653/1819-3293-2020-1-26-94-109

8. Суворов П. С., Тарасенко Т. В., Залож В. І. Деякі питання оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу у внутрішньому судноплавстві. Двигуни внутрішнього згоряння. Розділ Загальні проблеми двигунобудування. 2023. № 2. URL: http://dvs.khpi.edu.ua/article/view/287480

9. Головань А. І. Особливості оцінювання ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. Системи управління, навігації та зв'язку. 2024. Т. 1, № 75. DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.005

10. Kalinichenko Y., Tomchakovsky G., Oberto Santana L. Increasing energy efficiency by improving navigation methods. Technology Transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions. 2024. P. 11–14. DOI: https://doi.org/10.21303/2585-6847.2024.003567 (дата звернення: 24.05.2025).

11. Пізінцалі Л. В., Россомаха О. І., Шумило О. М., Александровська Н. І., Россомаха О.А. Аналіз впливу альтернативних видів палива на вартість життєвого циклу судна. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. 2023. № 1(490). С. 11–19. URL: http://znp.nuos.mk.ua/archives/2023/1/3.pdf

12. Александровська Н. І., Пізінцалі Л. В., Россомаха О. І., Россомаха О. А. Аналіз впливу шорсткості гребного гвинта на витрати суднового палива. Збірник наукових праць НУК ім. адмірала Макарова. 2023. № 4(493). С. 3–12. DOI: https://doi.org/10.15589/znp2023.4(493).1

13. Мельник О. М. Оцінка впливу енергоефективності на безпеку експлуатації судна. Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. 2023. № 2(39). DOI: https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-2.11

14. Россомаха О. І., Александровська Н. І., Пізінцалі Л. В., Россомаха О. А., Рабоча Т. В. Використання діаграми Ісікави при аналізі впливу шорсткості корпусу судна на витрати суднового палива. Наука і техніка сьогодні. Серія «Техніка». 2024. № 1(29). С. 763–785. DOI: https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-1(29)-763-785

15. Українське Дунайське пароплавство зменшило норму витрат палива для п… [Електронний ресурс]. URL: https://ukrport.org.ua/%D1%83%D0%B4%D0%BF-%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%88%D0%B8%D0%BB%D0%BE-%D0%BD%D0%BE%D1%80%D0%BC%D1%83-%D0%B2%D0%B8%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82-%D0%BF/

16. Indian Register of Shipping. Implementing Energy Efficiency Design Index (EEDI) [Електронний ресурс]. Mumbai, 2022. 13 p. URL: https://www.irclass.org/media/2368/energy-efficiency-design-index.pdf

17. Transport & Environment. Energy Efficiency of Ships: what are we talking about? [Електронний ресурс]. URL: https://www.transportenvironment.org/articles/energy-efficiency-ships-what-are-we-talking-about

18. IMO. 2018 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships: Resolution MEPC.308(73) [Електронний ресурс]. URL: https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.308(73).pdf

19. IMO. 2022 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships: Resolution MEPC.364(79) [Електронний ресурс]. URL: https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364(79).pdf

20. Pauli G., Ley J. Energy Efficiency Indices for carbon foot printing and as instrument for CO_2-emission reduction of inland vessels [Електронний ресурс]. Berlin: Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, 2022. 31 p. URL: https://platina3.eu/download/gernot-paulii-and-jens-ley-on-energy-efficiency-indices-as-an-instrument-for-the-reduction-of-co2-emissions-of-inland-vessels/?ind=0

21. PLATINA 3. Platform for the implementation of a future inland navigation action programme [Електронний ресурс]. URL: https://platina3.eu/download/5th-stage-all-presentations-and-agenda/

22. Waterborne Technology Platform [Електронний ресурс]. URL: https://www.waterborne.eu/

23. European Maritime Safety Agency (EMSA) [Електронний ресурс]. URL: https://www.emsa.europa.eu/

24. Clean Shipping Coalition [Електронний ресурс]. URL: https://cleanshipping.org/

25. Naval Group. 3D-printed propeller: the world's first with class approval [Електронний ресурс]. Paris, 2017. URL: https://www.3dnatives.com/de/ramlab-051220175/

26. HII Newport News Shipbuilding. 3D printing of a valve manifold for USS Enterprise [Електронний ресурс]. 2018. URL: https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/3d-objekte/newport-news-shipbuilding-setzt-auf-3d-druck-271153043/

27. INTERNATIONAL STANDARD ISO 25178-2. iTeh Standards [Електронний ресурс]. URL: https://cdn.standards.iteh.ai/samples/46065/020e133c24d648119d70b0e3f3239233/ISO-25178-1-2016.pdf

28. ASTM F42 Committee on Additive Manufacturing Technologies. Standards for Additive Manufacturing [Електронний ресурс]. ASTM International, 2020. URL: https://www.astm.org/

References

1. Central Commission for the Navigation of the Rhine (CCNR). (2022). *CCNR Roadmap for reducing inland navigation emissions* (75 p.). Strasbourg Cedex: CCNR. Retrieved August 4, 2025, from https://www.ccr-zkr.org/files/documents/Roadmap/Roadmap_en.pdf

2. Lee, T., Cho, J., & Lee, J. (2022). Mixing properties of emulsified fuel oil from mixing marine bunker-c fuel oil and water. *Journal of Marine Science and Engineering, 10*(11), 1610. https://doi.org/10.3390/jmse10111610

3. Bach, H., & Hansen, T. (2023). IMO off course for decarbonization of shipping? Three challenges for stricter policy. *Marine Policy, 147*, 105379. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105379

4. Zhang, Y., Liu, Y., Wang, J., & Li, C. (2021). Effects of different biodiesel-diesel blend fuel on combustion and emission characteristics of a diesel engine. *Processes, 9*(11), 1984. https://doi.org/10.3390/pr9111984

5. Shih, Y.-C., Chang, S.-L., Huang, Y.-H., & Lin, C.-T. (2023). Speed and fuel ratio optimization for a dual-fuel ship to minimize its carbon emissions and cost. *Journal of Marine Science and Engineering, 11*(4), 758. https://doi.org/10.3390/jmse11040758

6. Faber, J., et al. (2020). *Fourth IMO GHG Study* (524 p.). London: International Maritime Organization. Retrieved May 22, 2025, from https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/07/Fourth-IMO-GHG-Study-2020-Full-report-and-annexes_compressed.pdf

7. Suvorov, P. S., Tarasenko, T. V., & Zalozh, V. I. (2020). Restrictive factors in the evaluation of the inland pushers' energy efficiency with heavy convoys. *Automation of Ship Technical Facilities, 26*(1), 94–109. https://doi.org/10.31653/1819-3293-2020-1-26-94-109 [in Ukrainian].

8. Suvorov, P. S., Tarasenko, T. V., & Zalozh, V. I. (2023). Deiaki pytannia otsinky enerhoefektyvnosti suden v umovakh enerhetychnoho perekhodu u vnutrishnomu sudnoplavstvi [Some issues of assessing ship energy efficiency in the context of energy transition in inland navigation]. *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia. Zahalni problemy dvyhunobuduvannia, 2*. Retrieved May 24, 2025, from http://dvs.khpi.edu.ua/article/view/287480 [in Ukrainian].

9. Holovan, A. I. (2024). Osoblyvosti otsiniuvannia efektyvnosti system tekhnichnoho obsluhovuvannia vantazhnykh suden [Features of evaluating the efficiency of maintenance systems for cargo vessels]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zv'iazku, 1*(75). https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.005 [in Ukrainian].

10. Kalinichenko, Y., Tomchakovsky, G., & Oberto Santana, L. (2024). Increasing energy efficiency by improving navigation methods. *Technology Transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions*, 11–14. https://doi.org/10.21303/2585-6847.2024.003567 [in Ukrainian].

11. Pizintsali, L. V., Rossomakha, O. I., Shumylo, O. M., Aleksandrovska, N. I., & Rossomakha, O. A. (2023). Analiz vplyvu alternatyvnykh vydiv palyva na vartist zhyttievoho tsyklu sudna [Analysis of the impact of alternative fuels on the ship lifecycle cost]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK im. admirala Makarova, 1*(490), 11–19. Retrieved May 24, 2025, from http://znp.nuos.mk.ua/archives/2023/1/3.pdf [in Ukrainian].

12. Aleksandrovska, N. I., Pizintsali, L. V., Rossomakha, O. I., & Rossomakha, O. A. (2023). Analiz vplyvu shorstkosti hrebnoho hvynta na vytraty sudnovoho palyva [Analysis of propeller roughness impact on ship fuel consumption]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK im. admirala Makarova, 4*(493), 3–12. https://doi.org/10.15589/znp2023.4(493).1 [in Ukrainian].

13. Melnyk, O. M. (2023). Otsinka vplyvu enerhoefektyvnosti na bezpeku ekspluatatsii sudna [Assessment of energy efficiency impact on ship operation safety]. *Podilskyi visnyk: silske hospodarstvo, tekhnika, ekonomika, 2*(39). https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-2.11 [in Ukrainian].

14. Rossomakha, O. I., Aleksandrovska, N. I., Pizintsali, L. V., Rossomakha, O. A., & Rabocha, T. V. (2024). Vykorystannia diahramy Isikavy pry analizi vplyvu shorstkosti korpusu sudna na vytraty sudnovoho palyva [Using Ishikawa diagram for analyzing hull roughness effect on ship fuel consumption]. *Nauka i tekhnika sohodni. Seriia "Tekhnika", 1*(29), 763–785. https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-1(29)-763-785 [in Ukrainian].

15. Ukrainske Dunaiske paroplavstvo. (2025, August 24). UDP zmenshylo normu vytrat palyva dlia p... [Ukrainian Danube Shipping Company reduced the fuel consumption rate for …]. Retrieved August 24, 2025, from https://ukrport.org.ua/%D1%83%D0%B4%D0%BF-%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%88%D0%B8%D0%BB%D0%BE-%D0%BD%D0%BE%D1%80%D0%BC%D1%83-%D0%B2%D0%B8%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82-%D0%BF

16. Indian Register of Shipping. (2022). *Implementing Energy Efficiency Design Index (EEDI)* (13 p.). Mumbai. Retrieved August 16, 2025, from https://www.irclass.org/media/2368/energy-efficiency-design-index.pdf

17. Transport & Environment. (2025, August 24). Energy Efficiency of Ships: what are we talking about? Retrieved August 24, 2025, from https://www.transportenvironment.org/articles/energy-efficiency-ships-what-are-we-talking-about

18. International Maritime Organization (IMO). (2018). *2018 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships: Resolution MEPC.308(73)*. Retrieved May 2, 2025, from https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.308(73).pdf

19. International Maritime Organization (IMO). (2022). *2022 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships: Resolution MEPC.364(79)*. Retrieved May 2, 2025, from https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364(79).pdf

20. Pauli, G., & Ley, J. (2022). *Energy Efficiency Indices for carbon foot printing and as instrument for* CO_2*-emission reduction of inland vessels* (31 p.). Berlin: Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure. Retrieved August 16, 2025, from https://platina3.eu/download/gernot-paulii-and-jens-ley-on-energy-efficiency-indices-as-an-instrument-for-the-reduction-of-co2-emissions-of-inland-vessels/?ind=0

21. PLATINA 3. (2025, August 24). *Platform for the implementation of a future inland navigation action programme*. Retrieved August 24, 2025, from https://platina3.eu/download/5th-stage-all-presentations-and-agenda/

22. Waterborne Technology Platform. (2025, August 24). Retrieved August 24, 2025, from https://www.waterborne.eu/

23. European Maritime Safety Agency (EMSA). (2025, May 24). Retrieved May 24, 2025, from https://www.emsa.europa.eu/

24. Clean Shipping Coalition. (2025, August 24). Retrieved August 24, 2025, from https://cleanshipping.org/

25. Naval Group. (2017). *3D-printed propeller: the world's first with class approval*. Paris. Retrieved August 20, 2025, from https://www.3dnatives.com/de/ramlab-051220175/

26. HII Newport News Shipbuilding. (2018). *3D printing of a valve manifold for USS Enterprise*. Retrieved August 20, 2025, from https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/3d-objekte/newport-news-shipbuilding-setzt-auf-3d-druck-271153043/

27. International Organization for Standardization (ISO). (2016). *ISO 25178-2: Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters*. Retrieved from https://cdn.standards.iteh.ai/samples/46065/020e133c24d648119d70b0e3f3239233/ISO-25178-1-2016.pdf

28. ASTM International. (2020). *Standards for Additive Manufacturing* (ASTM F42 Committee on Additive Manufacturing Technologies). Retrieved from https://www.astm.org/

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 13.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025