

© *Калініченко Є.В.*

## ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА БЕЗПЕКА СУДНОПЛАВСТВА: ТОЧКИ ПОЄДНАННЯ ТА РОЗБІЖНОСТІ

*У статті розглядаються основні аспекти підвищення енергоефективності судноплавства та її вплив на безпеку морських перевезень. Аналізуються міжнародні регуляторні стандарти, ключові точки поєднання та розбіжності між енергоефективністю та безпекою, а також визначаються порогові значення, за якими переваги енергоефективності можуть негативно впливати на безпеку судноплавства. Представлені статистичні дані щодо зниження викидів парникових газів, економії пального та їхнього зв'язку із безпекою експлуатації суден. Аналіз даних свідчить про значний позитивний вплив міжнародних стандартів на скорочення викидів та підвищення енергоефективності. Водночас впровадження нових технологій потребує значних інвестицій, що може бути фінансово обтяжливим для судновласників. Розглянуто взаємозв'язок між енергоефективністю та безпекою судноплавства, а також критичні моменти, коли підвищення енергоефективності може призводити до небажаних наслідків для експлуатації суден. Виявлено, що хоча заходи з оптимізації витрат пального мають значний позитивний екологічний та економічний ефект, вони можуть створювати додаткові ризики, такі як зниження маневреності, збільшення часу реагування екіпажу на аварійні ситуації та підвищення вразливості до погодних умов. Отримано розуміння, що майбутні дослідження мають бути спрямовані на розробку збалансованих підходів до регулювання швидкості, конструкції корпусів та використання альтернативних джерел енергії, щоб забезпечити не лише економію ресурсів, а й високий рівень безпеки морських перевезень. Підвищення енергоефективності не лише сприяє економії пального та зменшенню викидів парникових газів, але й суттєво покращує рівень безпеки судноплавства. Комплексне впровадження енергоефективних технологій дозволяє знизити ризики технічних відмов, підвищити надійність навігаційних систем та забезпечити більш комфортні умови роботи для екіпажу. Отже, оптимізація енергоефективності не може бути самоціллю, а має враховувати ризики для безпеки, які виникають при перевищенні певних порогових значень.*

**Ключові слова:** енергоефективність, судноплавство, безпека, альтернативні джерела енергії, міжнародні стандарти, викиди CO<sub>2</sub>.

**Постановка проблеми.** Сучасне судноплавство є однією з основних складових світової економіки, забезпечуючи понад 80% міжнародної торгівлі. Водночас галузь є значним споживачем вичерпного пального та джерелом викидів парникових газів. Згідно зі звітом Міжнародної морської організації (ІМО), судноплавство спричиняє близько 3% глобальних викидів CO<sub>2</sub> [1].

Зменшення енергоспоживання суден є критично важливим не лише для екології, а й для підвищення безпеки морських перевезень. У той же час, досягнення високої енергоефективності може спричинити негативні наслідки для навігації та керованості суден у складних умовах. У цій статті розглядається взаємозв'язок між енергоефективністю та безпекою, а також аналізуються регуляторні норми та порогові значення, які визначають межу між економією пального та безпекою судноплавства.

**Аналіз літературних джерел** У попередніх дослідженнях [2,3] аналізувалися основні підходи до підвищення енергоефективності морського транспорту, зокрема використання альтернативних джерел енергії, оптимізація конструкцій суден та вдосконалення експлуатаційних характеристик. Роботи [4,5] зосереджували увагу на міжнародних регуляторних нормах та впливі ІМО на скорочення викидів парникових газів. Проте взаємозв'язок між енергоефективністю та безпекою судноплавства ще недостатньо вивчений, зокрема відсутні комплексні дослідження порогових значень, за якими

енергоефективні заходи можуть погіршувати безпеку експлуатації суден. Це зумовлює актуальність даного дослідження.

**Мета дослідження** – проаналізувати сучасні міжнародні стандарти енергоефективності, їхній зв'язок із безпекою судноплавства та визначити критичні порогові значення, за якими заходи з підвищення енергоефективності можуть негативно впливати на безпеку суден.

**Викладення основного матеріалу.** Міжнародна морська організація (ІМО) встановлює жорсткі вимоги щодо скорочення викидів і підвищення енергоефективності суден. Основні стандарти включають:

1. Energy Efficiency Design Index (EEDI) – встановлює мінімальні вимоги до паливної ефективності для нових суден.
2. Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) – система управління енергоефективністю для діючих суден.
3. Carbon Intensity Indicator (CII) – показник інтенсивності викидів CO<sub>2</sub> для суден, який визначає необхідність скорочення викидів [1-3].

Аналіз впливу міжнародних стандартів на енергоефективність. Для оцінки ефективності регуляторних стандартів проаналізуємо їхній вплив на скорочення викидів парникових газів та економію пального в реальних умовах експлуатації суден. Нижче наведено порівняльні дані впровадження основних стандартів:

Таблиця 1. Порівняльний аналіз впровадження міжнародних регуляторних стандартів

Показник	До впровадження стандартів	Після впровадження стандартів	Скорочення (%)
Викиди CO <sub>2</sub> (г/тонно-милю)	17.5	14.2	18.9
Споживання пального (тонн/день)	50	42	16
Витрати на паливо (\$/рік)	5 млн	4.1 млн	18
Частка LNG у світовому флоті (%)	5	12	140

Дані свідчать про значний позитивний вплив міжнародних стандартів на скорочення викидів та підвищення енергоефективності. Водночас впровадження нових технологій потребує значних інвестицій, що може бути фінансово обтяжливим для судновласників.

**Точки поєднання між енергоефективністю та безпекою.** Одним із найвагоміших аспектів взаємозв'язку між енергоефективністю та безпекою є зменшення витрат пального, що, у свою чергу, знижує ризик займання та вибухів паливних резервуарів. Оскільки судна, що використовують більш ефективні двигуни або альтернативні джерела енергії, споживають менше традиційного викопного пального, ймовірність виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних із витокami або загоряннями пального, значно скорочується. Це особливо актуально для суден, що здійснюють перевезення небезпечних вантажів, де ризик пожежі є одним із основних факторів загрози безпеці екіпажу та судна.

Ще одним важливим аспектом є впровадження автоматизованих систем моніторингу витрат пального та роботи судових механізмів. Такі системи дають змогу екіпажу оперативно реагувати на можливі несправності або неефективну роботу двигунів, що сприяє зниженню ризиків технічних відмов у критичних ситуаціях. Використання сучасних цифрових технологій у судноплаванні не лише допомагає оптимізувати енерговитрати, а й суттєво підвищує загальний рівень безпеки.

Покращення обтічності корпусу також відіграє значну роль у підвищенні керованості суден. Завдяки вдосконаленій формі корпусу знижується опір води, що дозволяє не тільки економити паливо, а й забезпечувати більш стабільний рух судна навіть у складних погодних умовах. Це особливо важливо при перетині зон із високими штормовими ризиками, оскільки покращена керованість дозволяє екіпажу ефективніше маневрувати та уникати небезпечних ситуацій.

Окремо слід відзначити роль альтернативних джерел енергії у забезпеченні безпеки судноплавства. Наприклад, перехід на зріджений природний газ (LNG) або гібридні енергетичні системи дозволяє не лише скоротити рівень шкідливих викидів, але й знизити навантаження на головні енергетичні установки, що, у свою чергу, зменшує ймовірність технічних збоїв під час експлуатації.

Крім того, використання комбінованих джерел живлення (наприклад, сонячних батарей або вітрових генераторів) може слугувати додатковим резервом енергії у разі відмови основних силових установок.

Нарешті, оптимізація режиму роботи двигуна є ще одним ключовим аспектом, що одночасно впливає як на енергоефективність, так і на безпеку судноплавства. Зменшення навантаження на двигун дозволяє продовжити термін його служби, знизити рівень викидів шкідливих речовин та забезпечити більш плавний хід судна навіть за несприятливих погодних умов. Такий підхід зменшує ризик аварій, пов'язаних із технічними несправностями, та забезпечує стабільну роботу судна на всіх етапах рейсу.

Отже, слід приділяти максимальну увагу наступним аспектам:

1. Зниження споживання пального → зменшення ризику займання пального та вибухів.
2. Автоматизовані системи моніторингу енерговитрат → підвищення контролю над справністю обладнання та швидке виявлення несправностей.
3. Покращена обтічність корпусу → зниження опору та покращення керованості судна в штормових умовах.
4. Використання альтернативних джерел енергії → зниження залежності від традиційного пального, що може підвищити стійкість судна до паливних криз.
5. Оптимізація режиму роботи двигуна → зменшення зношування механізмів та підвищення надійності судна під час тривалих рейсів.

Таким чином, підвищення енергоефективності не лише сприяє економії пального та зменшенню викидів парникових газів, але й суттєво покращує рівень безпеки судноплавства. Комплексне впровадження енергоефективних технологій дозволяє знизити ризики технічних відмов, підвищити надійність навігаційних систем та забезпечити більш комфортні умови роботи для екіпажу.

**Точки розбіжності між енергоефективністю та безпекою.** У той час як підвищення енергоефективності сприяє зменшенню експлуатаційних витрат і зниженню впливу судноплавства на навколишнє середовище, деякі заходи можуть нести ризики для безпечної експлуатації суден. Одним із найважливіших аспектів є зменшення експлуатаційної швидкості суден. Багато компаній запроваджують "повільне судноплавство" (slow steaming), що дозволяє суттєво скоротити витрати пального. Проте надмірне зниження швидкості може збільшити ризики зіткнень у портах та прибережних водах, а також зробити судна вразливими до несприятливих погодних умов. Згідно зі звітом Європейської морської безпекової агенції (EMSA), у 2021 році було зафіксовано 15% збільшення інцидентів, пов'язаних із маневреністю суден, що працювали в режимі низької швидкості [6].

Ще одним критичним аспектом є зміни в конструкції корпусу суден. Оптимізація форми для зменшення опору води дозволяє значно покращити паливну ефективність, проте може вплинути на остійність судна під час штормів. Наприклад, дослідження, проведене Інститутом морської техніки Великобританії, показало, що судна з вузьким корпусом мають на 20% вищу ймовірність втрати остійності та стійкості на курсі під час сильного хвилювання [7]. Це особливо актуально для контейнеровозів, де стабільність відіграє ключову роль у запобіганні втрати вантажу.

Крім того, впровадження альтернативних джерел енергії, таких як зріджений природний газ (LNG) або воднева тяга, має свої ризики. Хоча LNG суттєво знижує викиди CO<sub>2</sub>, зберігання цього пального потребує спеціальних умов і створює додаткові виклики для безпеки екіпажу. Для кращого розуміння компромісу між енергоефективністю та безпекою розглянемо узагальнену залежність між трьома ключовими параметрами: швидкістю, маневреністю та енергоефективністю (рис. 1).

Як видно з моделі, оптимізація енергоефективності через зниження швидкості може негативно впливати на маневреність, що, своєю чергою, збільшує ризики аварій. Таким чином, необхідно ретельно балансувати між енергоефективними рішеннями та експлуатаційною безпекою суден.

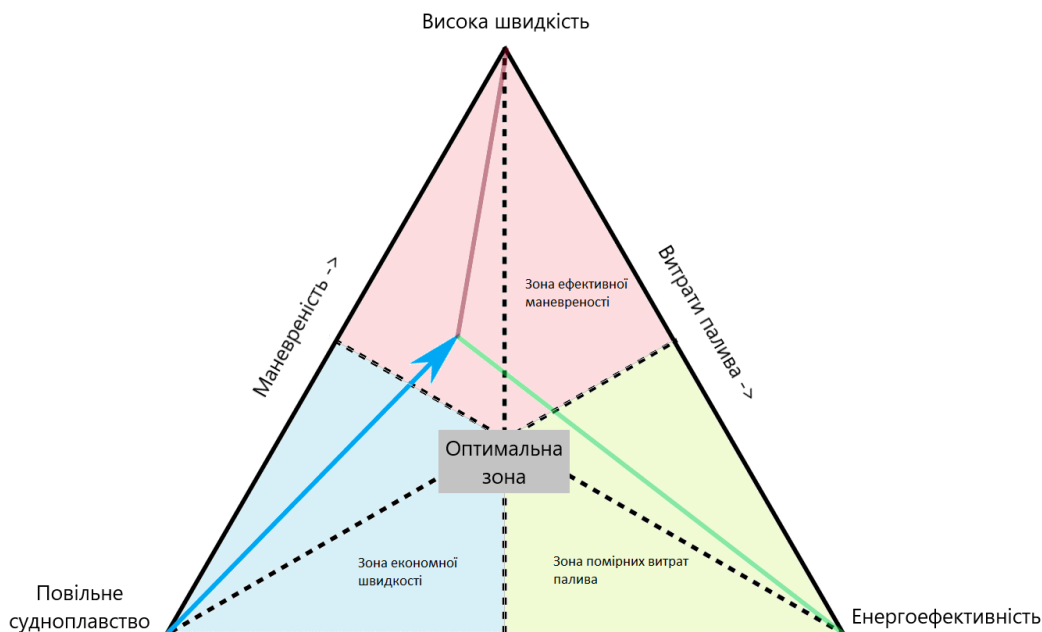


Рисунок 1 – Модель залежності швидкостей та енергоефективності судна

Отже, хоча енергоефективність є важливим чинником розвитку судноплавства, слід враховувати її потенційні загрози. Важливо розробляти технологічні рішення, які не лише підвищують паливну ефективність, але й забезпечують достатній рівень безпеки для екіпажу та вантажів.

**Аналіз порогових значень, де переваги енергоефективності починають шкодити безпеці.** Для визначення межі, за якою заходи з енергоефективності починають впливати на безпеку, необхідно враховувати кілька критичних параметрів: швидкість судна, маневреність та стійкість до погодних умов. Відомо, що зниження швидкості нижче 10 вузлів значно збільшує ризики зіткнень у вузьких проходах і портових акваторіях [7].

Крім того, при оптимізації корпусу суден для зменшення опору води може спостерігатися зниження остійності та стійкості на курсі під час штормів. Наприклад, дослідження показали, що судна з ультратонкими корпусами мають на 15-20% більшу ймовірність втрати остійності та стійкості на курсі при хвилюванні вище 5 балів за шкалою Бофорта [8].

Отже, для визначення критичних точок розбіжності між енергоефективністю та безпекою необхідно враховувати такі аспекти:

1. Критична швидкість для маневрування. За даними ІМО, судна, що йдуть на 30% повільніше від стандартної експлуатаційної швидкості, демонструють зниження ефективності маневреності на 25-40%;
2. Вплив альтернативного пального на стійкість судна. LNG, метанол та батарейні системи мають інші характеристики зберігання та розподілу ваги, що може негативно позначитися на остійності;
3. Залежність безпеки від екіпажу. Автоматизація може зменшити реакцію на нештатні ситуації, якщо кількість обслуговуючого персоналу зведена до мінімуму [9-11].

Графічний аналіз показує, що при швидкості нижче 10 вузлів маневреність судна різко знижується, що може критично вплинути на здатність реагувати на несприятливі навігаційні умови (рис. 2). Подальші дослідження мають зосередитися на побудові аналітичних моделей, що дозволять визначити оптимальні параметри для збереження рівноваги між безпекою та енергоефективністю.

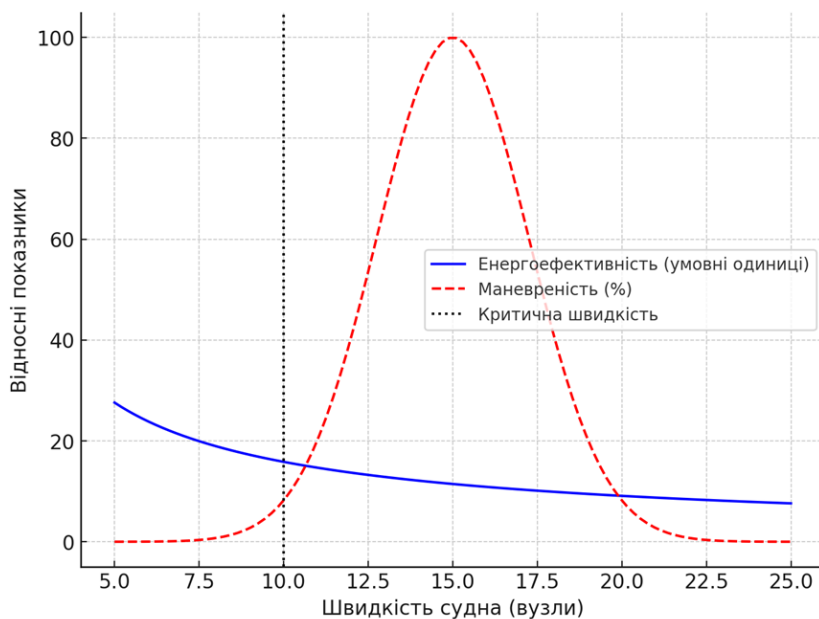


Рисунок 2 – Вплив швидкості судна на енергоефективність та маневреність

Таким чином, оптимізація енергоефективності не може бути самоціллю, а має враховувати ризики для безпеки, які виникають при перевищенні певних порогових значень. Підхід до судноплавства повинен бути комплексним, із чіткими критеріями допустимих змін у конструкції суден та експлуатаційних режимах [12].

**Висновки.** У даній статті було розглянуто взаємозв'язок між енергоефективністю та безпекою судноплавства, а також критичні моменти, коли підвищення енергоефективності може призводити до небажаних наслідків для експлуатації суден. Виявлено, що хоча заходи з оптимізації витрат пального мають значний позитивний екологічний та економічний ефект, вони можуть створювати додаткові ризики, такі як зниження маневреності, збільшення часу реагування екіпажу на аварійні ситуації та підвищення вразливості до погодних умов.

Майбутні дослідження мають бути спрямовані на розробку збалансованих підходів до регулювання швидкості, конструкції корпусів та використання альтернативних джерел енергії, щоб забезпечити не лише економію ресурсів, а й високий рівень безпеки морських перевезень.

## ЛІТЕРАТУРА

1. International Maritime Organization (IMO). Fourth IMO GHG Study 2020. London, 2020.
2. European Maritime Safety Agency (EMSA). Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2021. Lisbon, 2021.
3. IMO (2023). Guidelines for Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI). URL: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/MEPC.1-Circ.684.pdf>
4. Bouman E.A., Lindstad E., Riialand A.I., Strømman A.H. State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, vol. 52, pp. 408-421.
5. Калініченко Є.В., Мущенко П.В. (2023). Сучасні методи і технології управління використанням енергоресурсів у судноплавстві. URL: [https://www.researchgate.net/publication/369282542\\_Sucasni\\_metodi\\_i\\_tehnologii\\_upravlinna\\_vikoristanna\\_m\\_energoresursiv\\_u\\_sudnoplavstvi](https://www.researchgate.net/publication/369282542_Sucasni_metodi_i_tehnologii_upravlinna_vikoristanna_m_energoresursiv_u_sudnoplavstvi)

6. Калініченко Є.В., Постніков Є.Є. (2024). Метод оцінювання складності навігаційної ситуації. URL: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2024/06/WORLD-WAYS-AND-METHODS-OF-IMPROVING-OUTDATED-THEORIES-AND-TRENDS.pdf>
7. Калініченко Є.В., Дейкін Д.В. (2021). Розробка елементів інтелектуальної підтримки прийняття рішень судноводієм. URL: <https://kivt.duit.edu.ua/wp-content/uploads/2022/03/zbirnyk-dch-2021.pdf>
8. Kalinichenko Y., Tomchakovsky G., Santana L.O. (2024). Increasing energy efficiency by improving navigation methods. URL: [https://www.researchgate.net/publication/386527749\\_Increasing\\_energy\\_efficiency\\_by\\_improving\\_navigation\\_methodsresearchgate.net+1researchgate.net+1](https://www.researchgate.net/publication/386527749_Increasing_energy_efficiency_by_improving_navigation_methodsresearchgate.net+1researchgate.net+1)
9. Kalinichenko Y. (2020). Theory and methods for calculating the inertial-braking characteristics of a ship. URL: [Theory and methods for calculating the inertial-braking characteristics](https://www.researchgate.net/publication/338173196_Theory_and_methods_for_calculating_the_inertial-braking_characteristics_of_a_shipresearchgate.net+3researchgate.net+3researchgate.net+3)
10. Kalinichenko Y., Burmaka I. (2016). Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning. URL: [Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning](https://www.researchgate.net/publication/311959131_Analysis_of_mathematical_models_of_changing_the_vessel's_course_when_turning)
11. Kalinichenko Y. (2017). Calculation of ship's active braking characteristics. DOI: 10.21303/2585-6847.2017.00474
12. Калініченко Є.В. (2023). Енергоефективність на морських судах: стратегічний підхід. URL: [https://www.researchgate.net/publication/372152937\\_ENERGOEFEKTIVNIST\\_NA\\_MORSKIH\\_SUDNAH\\_STRATEGICNIJ\\_PIDHID](https://www.researchgate.net/publication/372152937_ENERGOEFEKTIVNIST_NA_MORSKIH_SUDNAH_STRATEGICNIJ_PIDHID)

## REFERENCES

1. International Maritime Organization (IMO). Fourth IMO GHG Study 2020. London, 2020.
2. European Maritime Safety Agency (EMSA). Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2021. Lisbon, 2021.
3. IMO (2023). Guidelines for Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI). URL: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/MEPC.1-Circ.684.pdf>
4. Bouman E.A., Lindstad E., Rialland A.I., Strømman A.H. State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, vol. 52, pp. 408-421.
5. Kalinichenko Y.V., Mushchenko P.V. (2023). Modern methods and technologies of managing the use of energy resources in shipping. URL: [https://www.researchgate.net/publication/369282542\\_Sucasni\\_metodi\\_i\\_tehnologii\\_upravlinna\\_vikoristanna\\_m\\_energoresursiv\\_u\\_sudnoplavstvi](https://www.researchgate.net/publication/369282542_Sucasni_metodi_i_tehnologii_upravlinna_vikoristanna_m_energoresursiv_u_sudnoplavstvi)
6. Kalinichenko Y.V., Postnikov Y. Y. (2024). Method for assessing the complexity of a navigation situation. URL: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2024/06/WORLD-WAYS-AND-METHODS-OF-IMPROVING-OUTDATED-THEORIES-AND-TRENDS.pdf>
7. Калініченко Є.В., Дейкін Д.В. (2021). Development of elements of intelligent support for ship navigator decision-making. URL: <https://kivt.duit.edu.ua/wp-content/uploads/2022/03/zbirnyk-dch-2021.pdf>
8. Kalinichenko Y., Tomchakovsky G., Santana L.O. (2024). Increasing energy efficiency by improving navigation methods. URL: [https://www.researchgate.net/publication/386527749\\_Increasing\\_energy\\_efficiency\\_by\\_improving\\_navigation\\_methodsresearchgate.net+1researchgate.net+1](https://www.researchgate.net/publication/386527749_Increasing_energy_efficiency_by_improving_navigation_methodsresearchgate.net+1researchgate.net+1)
9. Kalinichenko Y. (2020). Theory and methods for calculating the inertial-braking characteristics of a ship. URL: [https://www.researchgate.net/publication/338173196\\_Theory\\_and\\_methods\\_for\\_calculating\\_the\\_inertial-braking\\_characteristics\\_of\\_a\\_shipresearchgate.net+3researchgate.net+3researchgate.net+3](https://www.researchgate.net/publication/338173196_Theory_and_methods_for_calculating_the_inertial-braking_characteristics_of_a_shipresearchgate.net+3researchgate.net+3researchgate.net+3)
10. Kalinichenko Y., Burmaka I. (2016). Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning. URL: [https://www.researchgate.net/publication/311959131\\_Analysis\\_of\\_mathematical\\_models\\_of\\_changing\\_the\\_vessel's\\_course\\_when\\_turning](https://www.researchgate.net/publication/311959131_Analysis_of_mathematical_models_of_changing_the_vessel's_course_when_turning)

11. Kalinichenko Y. (2017). Calculation of ship's active braking characteristics. DOI: 10.21303/2585-6847.2017.00474
12. Kalinichenko Y. V. (2023). Energy efficiency on seagoing vessels: a strategic approach. URL: [https://www.researchgate.net/publication/372152937\\_ENERGGOEFEKTIVNIST\\_NA\\_MORSKIH\\_SUDNAH\\_STRATEGICNIJ\\_PIDHID](https://www.researchgate.net/publication/372152937_ENERGGOEFEKTIVNIST_NA_MORSKIH_SUDNAH_STRATEGICNIJ_PIDHID)

**Kalinichenko Ye. V**

## **ENERGY EFFICIENCY AND SHIPPING SAFETY: POINTS OF CONSISTENCY AND DIVERGENCE**

*The article examines the main aspects of improving the energy efficiency of shipping and its impact on the safety of maritime transport. It analyzes international regulatory standards, key points of convergence and divergence between energy efficiency and safety, and determines the threshold values at which the benefits of energy efficiency can negatively affect the safety of shipping. It presents statistical data on the reduction of greenhouse gas emissions, fuel economy and their relationship with the safety of ship operation. The analysis of the data indicates a significant positive impact of international standards on reducing emissions and increasing energy efficiency. At the same time, the implementation of new technologies requires significant investments, which can be financially burdensome for shipowners. The relationship between energy efficiency and shipping safety is considered, as well as critical points when increasing energy efficiency can lead to undesirable consequences for ship operation. It was found that although measures to optimize fuel consumption have a significant positive environmental and economic effect, they can create additional risks, such as reduced maneuverability, increased crew response time to emergencies, and increased vulnerability to weather conditions. It was understood that future research should be aimed at developing balanced approaches to speed control, hull design, and the use of alternative energy sources to ensure not only resource savings but also a high level of maritime safety. Increasing energy efficiency not only contributes to fuel savings and greenhouse gas emissions, but also significantly improves the level of shipping safety. The comprehensive implementation of energy-efficient technologies allows reducing the risks of technical failures, increasing the reliability of navigation systems, and providing more comfortable working conditions for the crew. Therefore, optimizing energy efficiency cannot be an end in itself, but must take into account the safety risks that arise when certain threshold values are exceeded.*

**Keywords:** energy efficiency, shipping, safety, alternative energy sources, international standards, CO<sub>2</sub> emissions

*Стаття прийнята 20.03.2025*