

УДК 656.61.052

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/20>**Волянська Я.Б.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Волянський С.М.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Баланський В.П.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Ковальчук М.С.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Волянський Ю.С.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

## ОЦІНКА РЕЗЕРВІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОБ'ЄКТІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ СУДНОВИХ СИСТЕМ

У статті здійснено аналіз основних факторів, за якими відбувається забруднення навколишнього середовища судами. Серед них забруднення стічними водами, сміттям, нафтопродуктами при аварійних розливах, зачистці танків, скидання баластних вод, шумове забруднення, а також зіткнення ссавців з судами. Зазначено, що збільшення активної експлуатації морського та річкового транспорту і одночасне зменшення його негативного впливу на навколишнє середовище здійснюється за рахунок проведення технічних та операційних заходів з підвищення його енергоефективності. Оцінку ефективності технічних заходів проведено за допомогою індексу енергоефективності конструкції, який розраховується один раз у період будівництва судна, і залишається фіксованим протягом всього його життєвого циклу. Підвищення енергоефективності також досягається через «операційні зусилля» за допомогою індексу оцінки ефективності операційних заходів, який погіршується в процесі експлуатації судна при частковому навантаженні і / або сильному хвилюванні та, навпаки, поліпшується при повному навантаженні і / або спокійній водній поверхні. Доведено, що проблеми забезпечення енергоефективності (дослідження засобів та методів управління суднами, впровадження інноваційних методик для розрахунків показників енергоефективності суден) поряд з підвищенням вимог до забезпечення екологічної безпеки транспорту (використання альтернативних видів палива) та посилення відповідальності судновласників є центральними об'єктами досліджень сучасної теорії і практики експлуатації засобів морського транспорту. У статті наведено розподіл суднових систем за ступенем впливу на показники енергетичної ефективності судна при різних режимах експлуатації судна. Визначено напрями підвищення енергоефективності суднових систем вентиляції та резерви підвищення індексу енергоефективності конструкції судна за рахунок застосування відомих на даний час способів скорочення споживання енергії.

**Ключові слова:** енергоефективність, забруднення навколишнього середовища, резерв, рекуператор, суднові системи.

**Постановка проблеми.** Морський та річковий транспорт, безумовно, є найбільш рентабельним способом переміщення товарів по всьому світу, він є основою міжнародної торгівлі: більше чотирьох п'ятих обсягу світової торгівлі здійснюється водними шляхами [1].

Але незважаючи на кращі екологічні характеристики в порівнянні з автомобільним та повітряним транспортом, судноплавство характери-

зується і негативними впливами на навколишнє середовище, а саме викидами різних забруднюючих речовин, що викликає ряд проблем. Це особливо чутливо в сучасних умовах, коли постійно зростає обізнаність про зміну клімату та екологічні проблеми. Отже, актуальним трендом сьогодні у секторі судноплавства є збільшення активної експлуатації морського та річкового транспорту і одночасного зменшення його нега-

тивного впливу на навколишнє середовище за рахунок здійснення технічних та операційних заходів з підвищення його енергоефективності.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

В сучасних умовах зростаючий інтерес до впливу судноплавства на навколишнє середовище обумовлює значний ступінь актуальності цього питання і характеризується збільшенням наукових публікацій, присвячених дослідженням, заходам, ініціативам, політиці, спрямованим на зменшення його негативних наслідків [2, 3]. Проблеми забезпечення енергоефективності (дослідження засобів та методів управління суднами, впровадження інноваційних методик для розрахунків показників енергоефективності суден [4–6]) поряд з підвищенням вимог до забезпечення екологічної безпеки транспорту (використання альтернативних видів палива [7, 8, 10]) та посилення відповідальності судовласників [9, 10] стають центральними об'єктами досліджень сучасної теорії і практики експлуатації засобів морського транспорту [2].

Отже, питання пошуку шляхів контролю зниження шкідливих викидів в атмосферу з суден та резервів підвищення енергетичної ефективності судна, у тому числі за рахунок оптимізації судових систем, є сучасними і своєчасними.

#### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Негативний вплив суден на навколишнє середовище відбувається відразу по декількох каналах:

- морські та річкові судна забруднюють біосферу відходами, одержуваними в результаті експлуатаційної діяльності;
- забруднення здійснюється в результаті аварійних подій, під час яких відбувається викид токсичних речовин (в більшій частині, нафти і нафтопродуктів);
- викид парникових газів;
- шумове (акустичне) забруднення;
- вихід зі строю і затоплення суден.

Вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ) є найбільш значимим парниковим газом (ПГ), що викидається суднами. Викиди парникових газів є основною причиною глобального потепління. Оксиди сірки ( $\text{SO}_x$ ) і азоту ( $\text{NO}_x$ ) сприяють утворенню кислотних дощів і вкрай небажані через їх вплив на здоров'я людини. Чадний газ (CO), леткі органічні сполуки (ЛОС) і тверді частинки (ТЧ) також впливають на здоров'я людини. До ТЧ відноситься чорний вуглець (ЧВ), який не тільки особливо шкідливий для людини, але є другим за значимістю фактором впливу на клімат після  $\text{CO}_2$ .

ІМО (*International Maritime Organization*) як орган, відповідальний за регулювання морських

викидів, розробила складну дорожню карту для декарбонізації сектору. Так, у 2018 р. було прийнято оригінальну стратегію ІМО щодо зменшення викидів парникових газів від судноплавства. Беручи за базовий рік 2008 р., Стратегія спрямована на те, щоб до 2050 р. скоротити як мінімум удвічі загальні викиди ПГ від судноплавства і знизити середню вуглеродємність ( $\text{CO}_2$  на тонно-милю) як мінімум на 40 % до 2030 р. і на 70 % до середини століття [6].

Діяльність ІМО щодо вирішення проблеми викидів парникових газів судами можна описати виразом

Викиди  $\text{CO}_2 = (\text{діяльність}) \times (\text{енергоефективність})$ , де діяльність – обсяг транспорту помножений на відстань (тонно-милі); енергоефективність – викиди  $\text{CO}_2$  за видами.

Виходячи з цієї формули маємо наступне, скоротити викиди  $\text{CO}_2$  при міжнародному судноплавстві можливо за рахунок зниження активності судноплавства. Але це, в свою чергу, призведе до стагнації мирової економіки. Для того, щоб цього уникнути треба проводити заходи щодо підвищення енергоефективності судноплавства.

Основною метою вимог Додатку VI до Міжнародної Конвенції (МК) MARPOL є скорочення викидів парникових газів із суден за рахунок підвищення їх енергетичної ефективності. Отже, енергоефективність є інструментом, що сприяє зменшенню шкідливих викидів з суден в атмосферу [1].

Заходами з підвищення енергоефективності є технічні та операційні заходи, які характеризуються відповідними індексами.

Технічні заходи дозволяють підвищити енергетичну ефективність судна за рахунок використання удосконаленого, модернізованого обладнання. Такими заходами є

- покращення форми корпусу (зниження опору при русі);
- удосконалення гвинта (підвищення ефективності тягової сили);
- удосконалення фіюзеляжу виступаючих частин судна для енергозбереження відпрацьованого тепла;
- використання поновлюваних джерел енергії тощо.

Оцінка ефективності технічних заходів проводиться за допомогою індексу енергоефективності конструкції (EEDI), який є однією з специфікацій суден, вимірює кількість грамів викидів  $\text{CO}_2$  на тонну на морської милі і розраховується виходячи з конструкції суден і показників експлуатації двигунів за формулою

$$EEDI = \frac{\text{Фактор CO}_2 \times \text{Питома витрата палива} [\text{FOC}] (\text{г/кВтг}) \times \text{Потужність двигуна} (\text{кВт})}{\text{Кубатура} (\text{т}) \times \text{Швидкість судна} (\text{миль/год})}$$

Показник EEDI розраховується один раз у період будівництва судна, фіксована вартість протягом всього життєвого циклу судна.

Операційні заходи. Підвищення енергоефективності досягається через «операційні зусилля» (оптимізацію операційного плану для кожного судна, зниження швидкості провідки з урахуванням погодних умов, прибуття в порт вчасно, обслуговування корпусу, двигуна тощо) без модифікації обладнання.

Індекс оцінки ефективності операційних заходів (EEOI)

$$EEOI = \frac{\text{Фактор CO}_2 \times \text{Питома витрата палива} [\text{FOC}] (\text{г/кВтг}) \times \text{Операційна здатність} (\text{г})}{\text{Маса вантажу} (\text{т}) \times \text{Пройдена відстань} (\text{миль})}$$

В процесі експлуатації судна показник EEOI погіршується при частковому навантаженні і / або сильному хвилюванні та, навпаки, поліпшується при повному навантаженні і / або спокійній водній поверхні.

Індекси EEDI та EEOI мають дещо різний фізичний зміст. Якщо EEDI – це відношення до величини транспортної роботи судна, яка виробляється судном, що йде з максимальним завантаженням, з потужністю на валу, яка дорівнює 75 % максимальної потужності головного двигуна, то EEOI – це кількість виробленого CO<sub>2</sub> за певний період часу (рейс, рік тощо), віднесене до величини транспортної роботи судна за той самий період.

Резолюцією ІМО МЕРС.282(70) передбачена розробка заходів щодо підвищення енергоефективності експлуатації конкретного судна (план SEEMP) [4]. В якості таких заходів зазначеною резолюцією пропонується використання більш якісного палива, обмеження часу простою в портах за рахунок чіткішого планування рейсів, правильне баластування судна, своєчасне обслуговування корпусу та двигуна тощо [5, 6]. Щодо головного двигуна (ГД), то в керівництві ІМО справедливо говориться, що коефіцієнт корисної дії сучасних судових дизелів вкрай високий (~ 50 %) і можливість подальшого його підвищення без залучення нових технологій (наприклад, паливних елементів) викликає сумніви. Але у допоміжних системах та механізмах резерви оптимізації енергоспоживання наявні. Тому питання виявлення та використання резервів підвищення енергоефективності судів за рахунок оптимізації

суднових систем, а саме систем, що задіяні на ходу судна; що забезпечують вантажні операції та систем, що не споживають енергію, є безумовно актуальними.

В системах, які задіяні на ходу судна, енергія, що споживається враховується при розрахунку індексу енергоефективності конструкції, тобто системи беруть участь у виробництві транспортної роботи, і споживана ними енергія враховується при розрахунку EEDI. До таких систем відносяться:

- системи, що обслуговують головний двигун (охолодження палива, олії, вентиляції машинного відділення (МВ), систему підігріву палива);

- системи, що обслуговують вантаж у процесі перевезення (вентиляції вантажних трюмів, холодильна установка, що обслуговує рефтрюми, системи охолодження вантажу);

- системи, що забезпечують загальносудові потреби (побутові, холодильна установка провізійної комори, вентиляції та кондиціонування житлових та службових приміщень, баластова та осушувальна системи при їх використанні на ходу судна).

До систем, які забезпечують вантажні операції відносять системи розвантаження (вантажну, баластну, інертних газів, вентиляції трюмів суден РО-РО, заморожування вантажу в рефтрюмах, систему підігріву вантажу на танкерах). Група систем, що не споживають енергію, включає газовідвідну систему шпігатів з відкритих палуб, а також рідко задіяні системи – пожежні, обігрів баластових танків тощо.

Основними способами економії за рахунок оптимізації роботи судових систем є застосування забортних охолоджувачів і частотного регулювання насосів охолодження забортною водою; оснащення приводів вентиляторів машинних приміщень та вантажних трюмів частотними регуляторами; будову рекуператорів з утилізацією теплоти витяжного повітря для нагрівання припливного в системах вентиляції та кондиціонування житлових та службових приміщень; використання утилізаційних котлів для підігріву важкого палива та побутових потреб [9].

Розглянемо специфіку енергоспоживання судової системи вентиляції з метою визначення додаткових факторів та особливостей, які слід врахувати для більш повного та адекватного визначення енергетичної ефективності судна, а також виявлення потенційних можливостей енергозбереження.

Система вентиляції служить для підтримки нормальної повітряної атмосфери в судових

приміщеннях шляхом заміни забрудненого повітря свіжим. Машинна вентиляція повинна забезпечувати температуру в машинному відділенні в межах, зазначених Правилами Регістру судноплавства України (45°C) та комфортне перебування людей.

Сумарна номінальна потужність електроприводів (ЕП) вентиляторів відповідно [10, 11] визначається в залежності від сумарної максимальної тривалої потужності ГД за формулою

$$P_{\text{вМВ}} = 0,025N^{0,6}, \quad (1)$$

де  $N$  – потужність головного двигуна, МВт.

Потужність, що споживається електроприводом вентиляторів машинних відділень, визначається за формулами в режимі стоянки в помірній та арктичній зонах і становить чверть від зазначеної потужності, а в режимі стоянки в тропічній зоні – половину цієї величини. У ходовому режимі судна вентиляція МВ зазвичай постійно працює з повним завантаженням і входить в інтегральну потужність. Аналіз формули (1) показує, що частка електроенергії, що витрачається на вентиляцію машинного приміщення, становить 20–30 % від усієї електроенергії, що споживається на ходу судна, що дуже суттєво. Це, наприклад, збільшує витрати на привід насосів охолодження головного двигуна.

Для перевірки адекватності застосування формули (1) проведено тепловий розрахунок вентиляції МВ з вихідними даними при підвищенні температури повітря на 15°C і виділенні двигунами тепла в повітря машинного відділення 1,2 % від потужності двигуна. Результати розрахунку збіглися із наведеною вище формулою (1).

Розрахункова кількість припливного повітря в машинних відділеннях визначається з розрахунку на асиміляцію надлишкових тепловиділень виходячи з розрахункового значення температури зовнішнього повітря, яка вибирається хоч і з урахуванням передбачуваного району плавання судна, але з великим запасом для найбільш спекотної пори року. Регулювання подачі повітря до МВ залежно від температури можна розглядати як спосіб зменшення енерговитрат на вентиляцію. Якщо регулювати подачу повітря зміною частоти обертання вентилятора, то економія може становити половину і більше витрат енергії на вентилятор, а економія палива на ходу судна складе близько 0,5 %.

Витрата електроенергії на вентиляцію в житлових і службових приміщеннях правильніше оцінювати спільно з системами опалення та кондиціонування повітря, так як від кратності вентиляції в таких приміщеннях залежить споживання енергії системою опалення та електронагрівальними приладами для обігріву службових приміщень та непрацюючого обладнання. Засоби електрообігріву службових приміщень встановлюються практично на всіх типах суден, тому споживана ними потужність входить в інтегральну потужність судна і враховується при розрахунках EED1 в тих 5 % від потужності головного двигуна, рівним яким приймається енергоспоживання на ходовому режимі.

Різні способи економії тепла, холоду та електроенергії в суднових системах вентиляції описані в роботі [12], де наводяться схеми різних рекуператорів, які можуть знайти застосування на суднах. Основною характеристикою рекуператорів є коефіцієнт ефективності рекуперації. Це відношення між максимально можливим отриманим теплом і теплом, отриманим насправді. Коефіцієнт залежить від типу рекуператора, змінюється від 30 до 90 %. Таким чином, за попередніми оцінками при їх застосуванні можна заощаджувати до 70 % споживаної електроенергії на обігрів та кондиціонування.

**Висновки.** Доведено, що енергоефективність морського транспорту, загалом, вища за інші види транспорту, тому заходи стимулювання і регулювання, створені задля підвищення енергоефективності судів послідовно зростатимуть. Аналіз основних інструментів управління енергоефективністю судна демонструє реалізацію ефективних способів економії енергії на борту суден через комплексну оцінку та прогнозування ефективності, а також зниження вуглецевого сліду в навколишньому середовищі.

Проведено аналіз енергоспоживання суднових систем. Визначено основні способи економії за рахунок оптимізації роботи суднових систем. Розглянуто варіант оснащення приводів вентиляторів машинних приміщень частотними регуляторами; систем вентиляції та кондиціонування житлових та службових приміщень – пристроями рекуператорів з утилізацією теплоти витяжного повітря для нагрівання припливного.

#### Список літератури:

1. UNCTAD – United Nations Conference on Trade and Development. *Review of maritime Transport*; United Nations: New York, NY, USA, 2019.

2. Lee P. T. Transportation research trends in environmental issues: A literature review of methodology and key subjects. *Int. J. Shipp. Transp. Logist.* 2016. Vol. 8. P. 612–631.
3. Мельник О. М., Онищенко С. П., Волошин А. О., Калініченко Є. В., Заяц С. В. Огляд основних механізмів управління енергоефективністю та контролю за викидами з морських суден. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ.* 2021. Вип. 197. С. 121–129.
4. Onishchenko O., Golikov V., Melnyk O., Onyshchenko S., Obertiur K. Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport.* 2022. Vol. 116. P. 223–235.
5. Yupeng Yuan, Zhixiong Li, Reza Malekian & Xinping Yan Analysis of the operational ship energy efficiency considering navigation environmental impacts. *Journal of Marine Engineering & Technology.* 2017. Vol. 16. № 3. P. 150–159.
6. Volyanskaya Y., Volyanskiy S., Volkov A., Onishchenko O. Determining energy-efficient operation modes of the propulsion electrical motor of an autonomous swimming apparatus. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2017. Vol. 6/8 (90). P. 11–16.
7. Serra P. Fancello G. Towards the IMO's GHG Goals: A Critical Overview of the Perspectives and Challenges of the Main Options for Decarbonizing International Shipping. *Sustainability.* 2020. № 12 (8). 3220.
8. Acomi N., Acomi O. C. The influence of different types of marine fuel over the energy efficiency operational index. *European Geosciences Union General Assembly. Energy Procedia.* 2014. № 59. P. 243–248.
9. Єгоров Г. В., Колесник Д. В. Оцінка енергетичної ефективності вантажних суден змішаного плавання. Автоматизація суднових технічних засобів: науково-технічна збірка ОНМА. 2012. Вип. 18. С. 27–43.
10. Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології: монографія / Букарос А. Ю., Волянська Я. Б., Волянський С. М. та ін.; за наук. ред. В. А. Голікова та О. А. Онищенко. Миколаїв: Іліон, 2022. 396 с.
11. Голіков С. П., Чорний С. Г., Жук Д. О., Івановський М. В. Суднові електричні станції: навч. посібник. Частина 1. Київ: Кондор, 2013. 198 с.
12. Krmek, I., Mrzljak V., Poljak I. Analysis and Comparison of Ship Propulsion Systems. *Journal of Maritime & Transportation Science.* 2022. 62 (1). P. 75–95.

**Volianska Ya.B., Volyanskyy S.M., Balanskyi V.P., Kovalchuk M.S., Volianskyi Ju.S. ESTIMATION OF RESERVES FOR INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF WATER-CARRIAGE'S OBJECTS BY TO OPTIMIZING OF THE SHIP SYSTEMS**

*The article analyzes the main factors that cause environmental pollution by ships. Among them are pollution by sewage, garbage, petroleum products during emergency spills, tank cleaning, discharge of ballast water; noise pollution, as well as collisions between mammals and ships. It is noted that increasing the active exploitation of sea and river transport and simultaneously reducing its negative impact on the environment is carried out at the expense of carrying out technical and operational measures to increase its energy efficiency. The evaluation of the effectiveness of technical measures was carried out using the energy efficiency index of the structure, which is calculated once during the construction of the ships, and remains fixed throughout its life cycle. The increase in energy efficiency is also achieved through "operational efforts" with the help of the index of evaluation of the efficiency of operational measures, which deteriorates during the operation of the ships at partial load and / or strong turbulence and, on the contrary, improves at full load and / or a calm water surface. It has been proven that the problems of ensuring energy efficiency (research of means and methods of ship management, implementation of innovative methods for calculating the energy efficiency indicators of ships) along with increasing requirements for ensuring the environmental safety of transport (use of alternative types of fuel) and strengthening the responsibility of ship owners are the central objects of research in modern theory and practices of operation of sea transport means. The article presents the distribution of ship systems according to the degree of influence on the ship's energy efficiency indicators during different modes of ship operation. The directions for increasing the energy efficiency of the ship's ventilation systems and the reserves for increasing the energy efficiency index of the ship's structure due to the use of currently known methods of reducing energy consumption have been determined.*

**Key words:** energy efficiency, environmental pollution, reserve, recuperator, ship's systems.