

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІРНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ ПАСАЖИРСЬКИХ СУДЕН З УРАХУВАННЯМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

О.М. Шумило

к.т.н., професор кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-0574-1954

Анотація

Екологічність будь-якого виробництва – сучасна вимога, яка, у тому числі, стосується морського судноплавства. Коефіцієнт енергоефективності EEDI є показником, який оцінює співвідношення шкоди навколишньому середовищу та роботи, яку виконує судно. Діюча нормативна база ІМО у сфері міжнародного судноплавства спрямована на забезпечення поступового зниження даного показника, що у комплексі забезпечить технологічно можливу мінімізацію екологічного впливу морського судноплавства.

Один з варіантів забезпечення допустимого рівня EEDI є модернізація, у тому числі, розмірна, за результатами якої збільшується GT судна, а це, в свою чергу, підвищує обсяг транспортної роботи судна та зменшує відповідний рівень EEDI.

У роботі проведено аналіз енергоефективності суден провідних світових компаній, який можна застосовувати для визначення їх модернізаційної привабливості. Запропоновано модель оптимізації розмірної модернізації пасажирського судна з визначенням довжини додаткової секції в районі мідель-шпангоуту судна при інтегральному розгляді економічних та екологічних аспектів подальшої експлуатації даного судна. Виконано експериментальна перевірка моделі, яка обґрунтувала її достовірність та придатність для практичного використання у процесах прийняття рішень щодо розмірної модернізації пасажирських суден.

Ключові слова: коефіцієнт енергоефективності, математична модель, оптимізація, модернізації, екологічність.

OPTIMIZATION OF PASSENGER VESSELS DIMENSIONAL MODERNIZATION TAKING INTO ACCOUNT THE ENERGY EFFICIENCY

O.M. Shumylo

PhD, Associate Professor at the Department
“Ship Power Plants and Technical Operation”,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-0574-1954

Summary

The environmental friendliness of any production is a modern requirement, which, among others, concerns the maritime shipping. The EEDI energy efficiency coefficient is an indicator that evaluates the ratio of the vessels' negative impact to the environment

and the vessel transport work. The current regulatory framework of the IMO in the field of international shipping is aimed at ensuring a gradual reduction of this indicator, what in the complex will ensure technologically possible minimization of the maritime shipping environmental impact.

One of the directions for ensuring the permissible level of EEDI is modernization, including dimensional modernization, as a result of which the GT of the vessel increases, and this, in turn, increases the volume of vessel transport work and reduces the corresponding level of EEDI.

The paper analyzes the energy efficiency of the world's leading cruise companies' vessels for determination their modernization attractiveness. An optimization model for the passenger vessel dimensional modernization for the determination of the additional section length in the middle frame area of the ship is proposed, based on an integral consideration of the economic and ecological aspects of the vessel further operation. An experimental study of the model was carried out and substantiated its reliability and suitability for practical use in decision-making processes regarding the passenger vessels dimensional modernization.

Key words: *energy efficiency coefficient, mathematical model, optimization, modernization, environmental impact.*

Постановка проблеми и огляд літератури. Міжнародна морська організація (International maritime organization, далі ІМО) встановлює системні вимоги до забезпечення екологічності морських суден. Круїзні пасажирські лайнери займають серед них особливе місце, оскільки для них характерно значне споживання електроенергії, пару, холодної і гарячої води, генерація яких обумовлена використанням вуглеводного палива. Саме цей вид палива є основним джерелом забруднення атмосфери і збільшенням кількості парникових газів.

Проблеми захисту навколишнього середовища, з якими стикаються і борються людство на сучасному етапі свого розвитку, потребують системного і невідкладного вирішення. Зростання світової економіки обумовлює підвищення водотоннажності світового торговельного флоту – збільшення потужності енергоустановок і споживання палива, як результат – зростання викидів відпрацьованих газів.

Доля забруднення навколишнього середовища в світі, що припадає на судноплавство складає 3% на вуглекислий газ (CO_2), 15% оксидів азоту (NO_x) і 13% оксидів сірки (SO_x) [1].

До боротьби світового співтовариства з екологічними загрозами активно долучилась ІМО, яка прийняла ще в 1973 році Міжнародну конвенцію щодо запобігання забруднення з суден (The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL 73/78) [2] – головний нормативно-правовий документ, що регламентує процедури і правилами, пов'язані з захистом та ліквідацією забруднення морського середовища з різних джерел і встановлення відповідальності. Правила, які охоплюють різноманітні джерела забруднення з суден, містяться в шести додатках. Додаток VI встановлює щодо запобігання забруднення атмосфери з суден які набрали чинності з 01.01.2005 р. і закріплює правила обмеження і запобігання повітря в результаті викидів оксиду сірки, азоту та інших шкідливих викидів, включаючи тверді частинки.

За останні двадцять років людство стикається з ще однією небезпечною загрозою – кліматичні зміни, стале підвищення температури планети, які викликані техногенними факторами різнобічної діяльності людини. Морська спільнота за лідерством ІМО не залишається в стороні від вирішення цих викликів: було прийнято відповідне рішення комітету ІМО по захисту морського середовища (MEPS – The Marine Environment Protection Committee), яке оформлене у вигляді резолюції MEPS.203 (63). Згідно цієї резолюції конвенція MARPOL 73/78 15.07.2011 була доповнена розділом IV, до складу якого було додано правило 19 – застосування; правило 20 – досягнутий коефіцієнт енергоефективності EEDI (Energy Efficiency Design Index); правило 21 – необхідний (потрібний, допустимий) коефіцієнт енергоефективності EEDI; правило 22 – план управління енергоефективності (Ship Energy Management plan, SEEMP); правило 23 – сприяння технічному співробітництву і передачі технологій (Promotion of technical cooperation and technology transfer) [3].

Основні положення щодо структури, формули та практичних аспектів застосування EEDI наведено у нормативних документах [4-11], що у сукупності створюють нормативну базу для впровадження та подальших досліджень питань енергоефективності суден. З урахуванням технологічних та технічних особливостей різних за спеціалізацією суден слід відзначити низку робіт, у яких розглядалися варіанти трансформації базової формули EEDI. Так, у [12] обґрунтовано модифікований варіант формули EEDI з урахуванням специфіки суден-контейнеровозів, у [13] – теж саме для пасажирських Ро-Ро. Особливості застосування EEDI для нових суден викладено у [14].

Окремі питання впливу судноплавства в загалі та конкретного судна на навколишнє середовище у контексті EEDI проаналізовано у [15-22]. Наприклад, у [16] проаналізовано вплив швидкості судна EEDI, у [20] враховано вплив навігаційних умов на рівень EEDI, шляхи зменшення EEDI охарактеризовано у [21].

Тем не менш, практично не розглянуто у сучасній науковій літературі питання зменшення EEDI у результаті модернізації суден, а це є один з головних критеріїв модернізації.

Розмірна модернізація пасажирських суден, як правило, розглядається виключно або з технічних позицій (наприклад, роботи [23,24]), або аналізується як комерційний проєкт ([25]) з приводу його економічної ефективності для замовника модернізації. Тем не менш, саме інтегральне врахування комплексу технологічних, економічних та екологічних умов відповідає сучасному підходу до реалізації будь-яких проєктів. Таким чином, розмірна модернізація пасажирських (як будь-яких інших) суден має забезпечувати необхідні рівень екологічності, що враховується за допомогою EEDI – тобто співвідношення «школа довікллю – корисна робота судна» повинно не перевищувати припустимий рівень. Все вищевикладене обумовлює актуальність даного дослідження.

Мета дослідження. Метою дослідження є розробка моделі оптимізації розмірної модернізації пасажирських суден з урахуванням енергоефективності, тобто моделі, яка забезпечує інтегральний розгляд економічних та екологічних аспектів.

Досягнення мети базується на послідовному розгляді наступних питань:

- 1) дослідження EEDI для пасажирських суден провідних світових компаній в сфері круїзного бізнесу;
- 2) розробка математичної моделі для визначення оптимального проведення розмірної модернізації (конверсії) пасажирських лайнерів;
- 3) експериментальні дослідження моделі.

Визначення та дослідження енергоефективності пасажирських суден.

Коефіцієнт енергоефективності EEDI покликаний стимулювати використання двигунів, установок і обладнання, що в меншій мірі забруднюють довкілля (тобто більш енергоефективних). З 01 січня 2013 р., після початкового етапу, що розпочався з 01 липня 2011 року, що проектується повинно мати енергоефективність, визначену коефіцієнтом EEDI, що повинна не перевищувати допустимий (граничний, еталонний) рівень енергоефективності. Цей рівень повинен підвищуватись кожні п'ять років, що ставить за мету запроваджувати нововведення, винаходи, останні дослідження науково-технічного прогресу в галузі морської інженерії, які здійснюють вплив на ефективність використання палива, починаючи зі стадії проектування судна.

Як відомо, EEDI являє собою визначене значення для конкретного проекту судна, яке розраховується в грамах діоксиду вуглецю (CO_2) у відношенні місткості судна на морську милю – найменше значення EEDI характеризує судно як більш енергоефективне. Рівень скорочення викидів CO_2 (г/тона-миль) для першого етапу (фази) установлено на рівня 10% і буде посилено кожні п'ять років, щоб відповідати сучасному рівню розвитку техніки щодо підвищення енергоефективності і скорочення викидів.

Зменшення значень коефіцієнтів EEDI були встановлені на період до 2025 року і далі, коли для визначених типів суден скорочення передбачено на 30%, яке розраховується на основі контрольної (еталонної) лінії, що являє собою середню ефективність для суден, які побудовані в період 2000 по 2010 роки. Коефіцієнт EEDI було розроблено для найбільших і найенергоємніших сегментів світової торговельного флоту і охоплює наступні типи суден: танкери, балкери, газозови, універсальні судна, контейнеровози, рефрижераторні і комбіновані судна. В 2014 році МЕРС прийняв поправки до правил для визначення EEDI, щоб розширити сферу дії цього коефіцієнту на: газозови, Ро-Ро, пасажирські судна. Ці поправки означали, що типи суден, які відповідають за 85% викидів CO_2 світового судноплавства, включені в міжнародний режим регулювання.

З 2012 р. Комітетом по захисту морського судноплавства (МЕРС) прийнято поправки в наступні керівні документи, зосереджених на реалізацію обов'язкових правил з забезпечення енергоефективності суден в додатку VI до конвенції MARPOL 73/78 [2-10]:

- 2014, Керівництво щодо обстеження та сертифікації індексу проектування енергоефективності EEDI зі змінами;
- 2014, Керівництво щодо методу розрахунку досягнутого (допустимого) індексу енергоефективності для нових суден зі змінами;
- 2013, Керівництво щодо розрахунку допустимих (референтних) ліній для визначення коефіцієнтів енергоефективності EEDI;
- 2013, Керівництво щодо розрахунку допустимих (референтних) ліній для використання з індексом проектування енергоефективності для крупних пасажирських суден з традиційною силовою установкою;
- 2013, Тимчасові рекомендації визначення мінімальної потужності руху в несприятливих умовах;
- 2016, Керівництво з розробки плану управління енергоефективністю судна (ship energy efficient management plan, SEEMP);

– 2013, Керівництво з використання інноваційних технологій щодо забезпечення енергоефективності досягнутого (проектного) EEDI суден.

Енергоефективність морських суден завжди грала ключову роль в процесі проектування, побудови, експлуатації і модернізації. Яку традиційно визначали коефіцієнтом корисної дії або витратою палива, хоча ефективність витрати палива і визначається к.к.д. Ці величини відіграють фундаментальну роль у визначенні енергетичної і економічної ефективності, але не дозволяють визначити вплив парникових газів, і насамперед діоксиду вуглецю CO₂.

Таким чином, перед світовим співтовариством постає суттєва дилема: перша – необхідність забезпечити зростання глобальної економіки, що нерозривно пов'язано зі зростання водотоннажності світового флоту і, як наслідок збільшенням потужності суднових енергетичних установок, друга – зменшити вплив парникових газів, насамперед CO₂, при забезпеченні зростання економіки. Іншими словами, потрібно встановити відповідний критерій, що вимірюється в умовних координатах «школа-користь». Такий критерій було запропоновано ІМО – це коефіцієнт енергоефективності суден EEDI і надані рекомендації щодо його кількісного визначення. Основний сенс формули, що запропонована для оцінки негативного впливу – шкода визначається масою CO₂, користь – масою вантажу помноженою на відстань його доставки [11]:

$$EEDI = \frac{\text{маса } CO_2}{\text{маса вантажу} \cdot \text{відстань}} \quad (1)$$

Правило 20 розділу Додатка IV Конвенції MARPOL 73/78 у відповідності до резолюції 203 (62) Комітету з безпеки на морі встановлює норми при: визначенні розрахункового коефіцієнту EEDI; для всіх нових суден, контракт на будівництво якого укладено на 01 липня або на суттєву його модернізацію.

Значення коефіцієнта EEDI повинно бути визначено для кожного судна, що відображається у відповідних супроводжувальних документах.

Розрахунковий коефіцієнт EEDI визначається у відповідності до керівництва схваленого резолюцією комітету по захисту морського середовища MEPS. 245 (66), згідно з яким розрахункова формула EEDI має вигляд [11]:

$$EEDI = \frac{\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME_i} \cdot C_{FME_i} \cdot SFC_{ME_i} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot f_c \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} + \frac{\left(\prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nRTI} P_{RTI_i} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff_i} \cdot P_{AE_{eff_i}} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff_i} \cdot P_{eff_i} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f_i \cdot f_c \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w}, \quad (2)$$

де SFC_{ME} , SFC_{AE} – питома ефективна головних (індекс ME), допоміжних двигунів (індекс AE), г/(кВт/год);

$Capacity$ – фактор, що визначається наступним чином: для суховантажів, наливних суден, газозовів, вантажних суден типу Ro-Ro, універсальних суден для перевезення генеральних вантажів приймається рівною дедвейту, т; для пасажирських суден, в тому числі вантажопасажирські порами приймаються рівною валовій місткості судна, т; для контейнерних суден – 70% від дедвейту;

$C_{FME_i}, C_{FAE}, C_{FME}$ – коефіцієнти кореляції (безрозмірні) між витратою палива і кількістю оксиду вуглецю C_{O_2} , що утворюються при згорянні відповідного виду палива в дизелі, який визначається вмістом вуглецю;

V_{ref} – швидкість судна, що забезпечується максимально допустимою пропульсивною потужністю двигунів, вузли;

P_{ME_i} – потужність приймається рівною 75% від номінальної встановленої потужності кожного головного двигуна (i -го) після вирахування потужності, що підводиться до валогенераторів (P_{PTO_i}), кВт;

P_{RTI} – потужність визначається лише у разі наявності пристроїв проведення додаткової потужності до валопроводів (окрім головних двигунів), що входять до складу пропульсивного комплексу, кВт;

P_{eff_i} – потужність приймається рівною 75% від потужності виробленої з використанням інноваційних технологій (без використання палив) та враховується до загальної пропульсивної потужності, кВт;

P_{AEff_i} – потужність, що складає 75% від потужності допоміжних двигунів в результаті використання інноваційних технологій для зменшення витрат палива дизель-генераторів, кВт;

f_j – сумарна потужність допоміжних двигунів, необхідна для забезпечення всіх споживачів електричною енергією на ходовому режимі, кВт;

f_j – поправочний коефіцієнт, що враховує специфічні конструктивні елементи судна;

f_i – коефіцієнт, що враховує необхідність (технічних і правових) обмежень дедвейту і розраховується за рівняннями для суден льодового класу;

f_{eff_i} – коефіцієнт, що враховує впровадження і застосування на судні відповідних енергоефективних технологій;

f_c – коефіцієнт, що враховує валовий обсяг вантажних приміщень;

f_w – хвильовий коефіцієнт, що враховує зменшення швидкості руху судна при погіршенні метеорологічних умов.

Формула (2) носить універсальний характер для всіх типів суден. Сучасні круїзні лайнери, які застосовують пропульсивні установки з електричними приводами, обладнаними синхронними двигунами, мають об'єднану енергосистему, генератори (дизельні або турбінні) якої здійснюють живлення тягових двигунів, допоміжних загальносуднових механізмів і спеціальних систем, орієнтованих на забезпечення пасажирів. Таким чином формула (2) може бути перетворена і подана у наступному вигляді:

$$EEDI = \frac{\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{n_{DG}} P_{DG_i} C_{FDG_i} SFC_{DG_i} \right)}{f_i f_c f_l GT f_w V_{ref}} - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff_i} P_{DG_{eff_i}} \right) C_{FDG_i} SFC_{DG_i}}{f_i f_c f_l GT f_w V_{ref}} - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff_i} P_{eff_i} C_{FDG_i} SFC_{DG_i} \right)}{f_i f_c f_l GT f_w V_{ref}} \quad (3)$$

де n_{DG} – число дизель-генераторів;

$$\sum_{i=1}^{n_{DG}} P_{DG_i} - \text{фактична сумарна експлуатаційна потужність дизель-генераторів, кВт;}$$

$$\sum_{i=1}^{n_{DG}} P_{DG_i} = 0,75 MCR_{DG}$$

C_{FDG_i}, C_{FDG} – коефіцієнти кореляції (безрозмірні) між витратою палива і кількістю оксиду вуглецю C_{O_2} , що утворюються при згорянні відповідного виду палива в дизелі, який визначається вмістом вуглецю;

SFC_{DG_i} – питома ефективна для дизель-генераторів, г/(кВт/год);

$P_{DG_{eff_i}}$ – потужність, яка генерується з застосуванням енергії відпрацьованих газів дизель-генераторів;

P_{eff_i} – потужність, яка виробляється інноваційними енергоефективними пристроями, і використовується для зменшення потужності дизель-генераторів, кВт.

У відповідності до правила 21 було введено поняття як граничне (обов'язкове, обмежувальне) значення коефіцієнту (required EEDI), яке розповсюджуються на всі нові судна та судна, що провели глибоку модернізацію, тому це дало можливість морським адміністраціям розглядати їх як нові судна. Згідно з цим правилом умова яка повинна виконуватись при проектуванні і модернізації суден:

$$EEDI \leq [EEDI], \quad (4)$$

де $EEDI$ – розрахункове (досягнуте, attained) значення коефіцієнта енергоефективності; $[EEDI]$ – допустиме (required), граничне значення коефіцієнта енергоефективності.

Під егідою Міжнародної морської організації було проведено комплексні дослідження, на базі отриманих результатів яких запропоновано визначати коефіцієнт EEDI у вигляді графічної функції залежності цього коефіцієнту від дедвейту або грощ тону (gross tonnage GT), які рекомендовано зображати у вигляді еталонних ліній (reference lines) для різних типів суден (суховантажів, балкерів, танкерів, газозовів, контейнеровозів та інше). Резолюція 231 (65) Комітету по захисту навколишнього середовища (MEPC) затвердила «Керівництво з розрахунку еталонних ліній для використання при визначенні коефіцієнту енергоефективності». Еталонна лінія (reference line) – це лінія, що являє собою усереднену криву, яка визначена за індивідуальними значеннями конкретної групи суден. За допомогою апроксимації сімейства EEDI кривих з використанням степеневі функції було отримано рівняння виду:

$$[EEDI] = a \cdot b^{-c}, \quad (5)$$

де a, c – коефіцієнти [2];

b – аргумент функції, який має значення дедвейта DW для суховантажних, рефрижераторних суден, контейнеровозів, танкерів, балкерів, суден типу Ro-Ro і грощ тону GT для пасажирських суден. Для останніх рівняння (5) можна переписати у вигляді степеневі функції:

$$f(GT) = [EEDI] = a \cdot GT^{-c}, \quad (6)$$

де $a=170,84, c=0,214$ – коефіцієнти, які отримані в результаті кореляційно-регресійного аналізу [2].

Рівняння (6) дозволяє побудувати обмежувальні криві на викиди CO_2 . Правило 21 Додатку VI Конвенції MARPOL 73/78 вимагає від судновласників зменшувати

величину $[EEDI]$ і положення обмежувальної кривої $[EEDI] = (DWT, GT)$ кожні п'ять років на величину X , що вимірюється у відносних одиницях.

Для суден, перерахованих у Правилах 2.25-2.31, 2.33-2.35 і 2.39 передбачено збільшення вимог щодо обмежувальної кривої $[EEDI]$: по-етапного, кожні п'ять років зменшення $[EEDI]$ на величину коефіцієнта X , що отримав назву коефіцієнта зменшення (reduction factor) $[EEDI]_i = \left(1 - \frac{X_i}{100}\right)[EEDI]_{i-1}$.

Для кожного етапу (фази) допустиме значення коефіцієнту $[]$:

$$\begin{cases} [EEDI]_{phase1} = \left(1 - \frac{X_{phase1}}{100}\right)[EEDI]_{phase0} \\ [EEDI]_{phase2} = \left(1 - \frac{X_{phase2}}{100}\right)[EEDI]_{phase1} \\ [EEDI]_{phase3} = \left(1 - \frac{X_{phase3}}{100}\right)[EEDI]_{phase2} \\ [EEDI]_{phase4} = \left(1 - \frac{X_{phase4}}{100}\right)[EEDI]_{phase3} \end{cases}, \quad (7)$$

Правило 21 встановлює вимоги щодо граничних значень етапів та темпів зменшення значення $[EEDI]$. Етапи (фази), які регламентуються цим правилом, мають наступну тривалість:

- початковий (phase 0) з 01.12.2013 до 31.12.2014;
- перший (phase 1) з 01.01.2015 до 31.12.2019;
- другий (phase 2) з 01.01.2020 до 31.12.2024;
- третій (phase 3) з 01.12.2025 і далі.

Рівняння (7) дає можливість побудувати сімейство граничних кривих кривих для кожного зі згаданих етапів.

В роботі [3] було здійснено аналіз факторів, що впливають на конкурентоздатність круїзних компаній, в якому, на жаль, не приділено уваги екологічній привабливості і, зокрема не враховано фактору ефективності використання палива і зменшення кількості парникових викидів. Цю місію виконує коефіцієнт енергоефективності, що в розглядається цій роботі. У зв'язку з чим виникла необхідність провести ґрунтовну оцінку відповідності значень коефіцієнтів $EEDI$ суден провідних компаній, розрахованих за формулою (3), сучасним вимогам, що нормуються правилом 21 Додатку VI Конвенції MARPOL 73/78.

З метою визначення відповідності енергоефективності круїзних лайнерів найбільших світових компаній новітнім вимогам правила 21 Додатку VI Конвенції MARPOL 73/78 було проведено відповідний аналіз, що ґрунтувався на застосуванні рівнянь (4) і (7). На рис. 1 і 2 представлені результати таких розрахунків для лайнерів 16 найвідоміших круїзних компаній, де показано, що всі судна відповідають нормам енергоефективності для встановленого періоду введення до експлуатації. Зокрема, найбільший коефіцієнт $EEDI$ мають судна: Queen Elizabeth (1965 р.) компанії Gunard Line, Amsterdam (2000 р.) компанії HOLLAND LINE, Oceania Regatta (1998 р.), Oceania Insignia (1998 р.), Oceania Nautica (1998 р.), Oceania Sirena (1998 р.), Oceania Riviera (1998 р.) компанії Oceania. В той же час слід підкреслити, що судна останніх років спорудження мають коефіцієнт $EEDI$,

що значно менше ніж допустимі, регламентовані обмежувальною лінією і після 2025 року спорудження.

Необхідно зазначити, що низка суден, незважаючи на те, що вони споруджені біля двадцяти років тому, мають коефіцієнт енергоефективності $EEDI$, суттєво менший ніж вимоги правила 21 для третьої фази (при тому, що вона набирає чинності після 2025 р.). Мова йде про лайнери (рис.1 і рис.2): Carnival Miracle (2004) компанії Carnival, Queen Mary 2 (2003) компанії Cunard Line, Hamburg (1997), Deutschland (1988), Amadea (1991), Amera (2002) компанії PHOENIX, Seven Seas Voyager (2003) компанії Regent Seven Seas, Brilliance of the Seas (2002) компанії Royal Caribbean, Mein Schiff 1 (1996) компанії TUI.

Модернізація суден традиційно вважалась дуже ефективним інструментом підвищення конкурентоздатності судноплавних компаній, особливо тих, які займаються круїзним бізнесом. В роботі [3] проведено дослідження щодо визначення оптимальних розмірів подовження суден при проведенні розмірної модернізації. Саме такий вид переобладнання (конверсії) суден зі збільшенням розмірів відіграє особливу роль в проведенні модернізації, оскільки при цьому створюється нове судно, яке відрізняється від прототипу морехідними якостями, техніко-економічними, техніко-експлуатаційними і безпековими характеристиками.

Модель визначення оптимального розміру додаткової секції для модернізації пасажирського судна

Отже, модернізація пасажирських суден забезпечує більш високий рівень комфортабельності, і, яка наслідок, більш високий прибуток. Розмірна модернізація пасажирського судна передбачає не тільки підвищення комфортабельності судна, а, перш за все, підвищення розміру судна GT , та відповідної пасажиромісткості та зростання прибутку за рахунок не тільки підвищення статусу судна. Звичайно, що основною метою розмірної модернізації пасажирського судна є комерційна мета, тобто отримання підвищеного прибутку від експлуатації судна незалежно від форми цієї експлуатації. Тобто навіть якщо судновласник надає операторові це судно у тайм-чартерну оренду, то відповідна ставка $F^{t-ch}(GT)$ залежить від розміру судна $EEDI$.

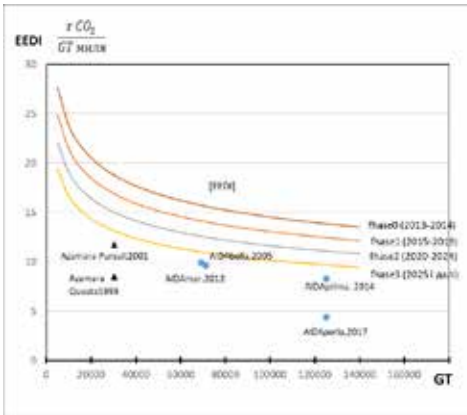
Але ж у сучасних умовах екологічні аспекти мають не менший пріоритет, ніж комерційні. З урахуванням зворотного зв'язку між коефіцієнтом енергоефективності $EEDI$ та GT , розмірна модернізація передбачає й зменшення екологічного навантаження на зовнішнє середовище за рахунок збільшення знаменника у (5), але ж за умови, що використовуватимуться сучасні технології, які забезпечують вплив на коефіцієнт f_{eff} , а також за витрати палива.

Таким чином, економічні результати розмірної модернізації так саме як й екологічні, є функціями від розміру судна GT , а якщо точніше, від збільшення розміру судна на величину ΔGT : $Z(\Delta GT)$ характеризує залежність економічних результатів розмірної модернізації від збільшення розміру судна на ΔGT , $EEDI(\Delta GT)$ – рівня енергоефективності від цієї ж величини.

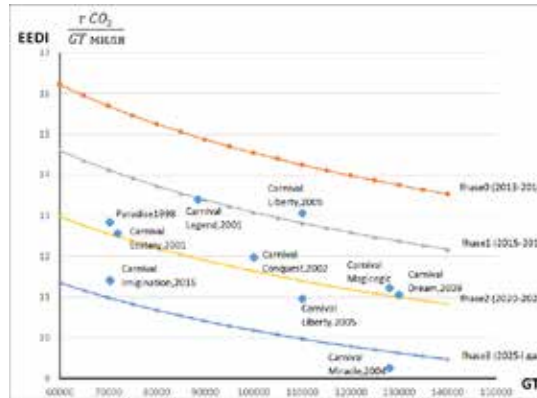
Збільшення розміру судна ΔGT досягається за рахунок додаткової секції довжиною $x > 0$, яка для кожного конкретного судна з урахуванням його конструктивних особливостей обумовлює величину $\Delta GT(x)$, таким чином, й економічні показники, й коефіцієнт енергоефективності є функціями від x :

$$Z(\Delta GT) = Z(\Delta GT(x)) = Z(x) \quad (8)$$

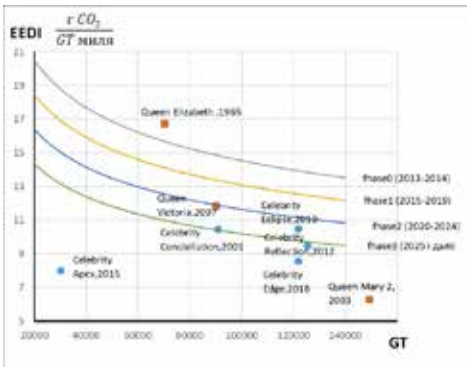
$$EEDI(\Delta GT) = EEDI(\Delta GT(x)) = EEDI(x) \quad (9)$$



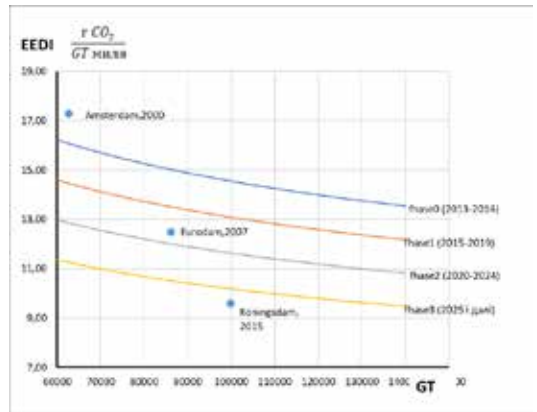
а



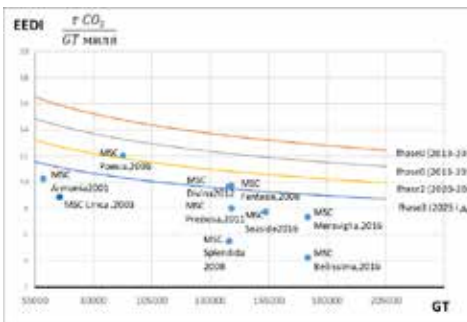
б



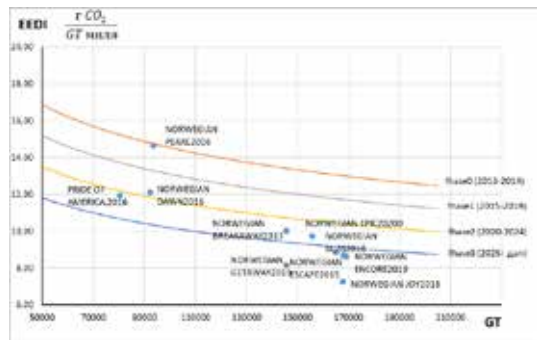
в



г



д



е

Рис. 1. Результати розрахунку коефіцієнтів енергоефективності і порівняння їх з еталонними кривими для круїзних суден компаній AZAMARA і AIDA (а), CARNIVAL (б), GUNARD LINE і CELEBRITY (в), HOLLAND LINE (г), MSC Cruises (д), NCL (е)

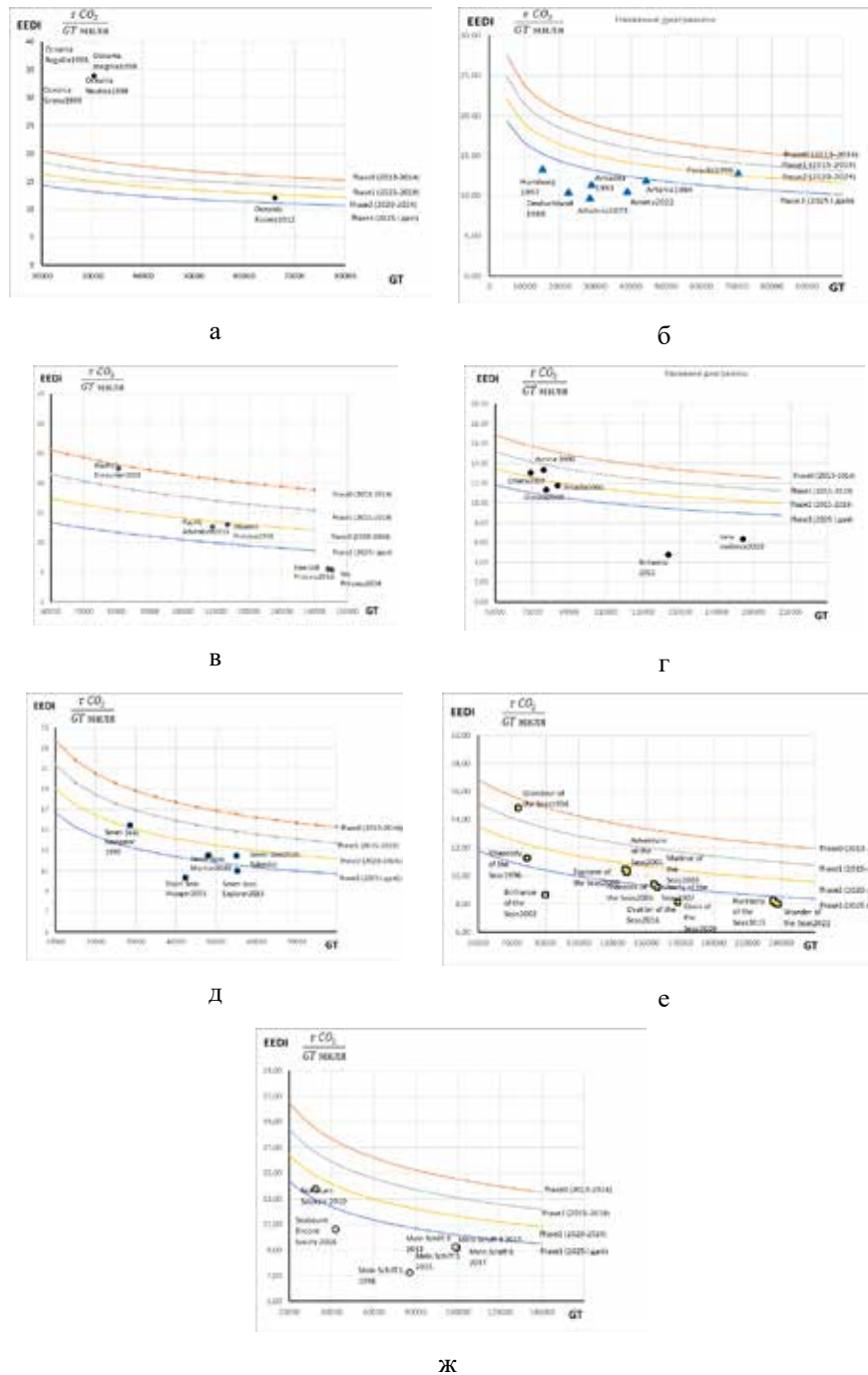


Рис. 2. Результати розрахунку коефіцієнтів енергоефективності і порівняння їх з еталонними кривими для круїзних суден компаній OCEANIA (а), PHOENIX (б), PRIENCES cruises (в), P&O (г), REGENT SEVEN SEAS (д), ROYAL CORIBBEAN (е), TUI та SEABOURN (ж)

З урахуванням викладеного вище пропонується при оптимізації розмірної модернізації пасажирських суден враховувати як економічні чинники, так й коефіцієнт енергоефективності, який, як і економічні показники, залежить від розміру додаткової секції судна ΔGT . Такий інтегральний підхід дозволить врахувати багатоаспектність економіко-екологічних вимог щодо подальшої експлуатації суден після модернізації.

З урахуванням цільового використання додаткової секції, а саме, створення додаткових кают, необхідно врахувати «кратність» довжини додаткової секції довжині планованих кают $n_c > 0$, тобто:

$$\frac{x}{n_c} \in Z^+. \quad (10)$$

Така умова забезпечує комерційну доцільність кожного сантиметру додаткової секції. Варто відзначити, що $x=0$ виключено із розгляду, що відповідає умові вже прийнятого рішення про збільшення розміру судна.

З іншого боку збільшення розміру судна має певні обмеження з точки зору конвенції MARPOL 73/78 [], тому введемо у розгляд l_s – допустиму довжину додаткової секції, що визначається з урахуванням вимог вказаної конвенції. Таким чином:

$$x \leq l_s. \quad (11)$$

Збільшення судна за рахунок додаткової секції пов'язано з витратами $C(x)$ на проектування, на проведення модернізації $g_1(x)$, встановлення додаткового обладнання $g_2(x)$, забезпечення умов міцності корпусу R_m . Усі ці витрати, звичайно, обмежені можливостями фінансування розмірної модернізації R_m :

$$C(x) + g_1(x) + g_2(x) \leq R_m \quad (12)$$

В деяких випадках доцільно розглядати окремі обмеження по кожній позиції витрат, пов'язаних безпосередньо з реалізацією заходів з модернізації:

$$g_1(x) \leq R_1 \quad (13)$$

$$g_2(x) \leq R_2 \quad (14)$$

$$g_3(x) \leq R_3 \quad (15)$$

Проведення модернізації шляхом збільшення розміру судна за рахунок додаткової секції має своєю метою отримання судновласником додаткового прибутку протягом певного періоду часу. Як правило цей термін встановлюється у кожній ситуації окремо з урахуванням специфіки судна, його стану та інших факторів. Приймаємо у подальшому цей термін як T . Щорічний додатковий прибуток $\Delta P^y(x)$ пов'язаний з використанням додаткових кают і в загальному вигляді може бути представлений як:

$$\Delta P^y(x) = (P_c + P_{ae}) \cdot N_d \cdot \frac{x}{n_c}, \quad (16)$$

де P_c – середній річний прибуток від однієї каюти певного класу (що передбачається модернізацією) пов'язаний з розміщенням пасажирів, P_{ae} – середній річний прибуток від кількості пасажирів, передбачених каютами, що розглядаються, пов'язаний з витратами на відпочинок протягом рейсу пасажирів на судні (ресторан, розваги, магазини, тощо);

N_d – кількість палуб, на яких планується розташування кают у додатковій секції;

$N_d \cdot \frac{x}{n_c}$ – характеризує кількість кают у додатковій секції.

Таким чином, протягом прийнятого терміну розгляду T додатковий прибуток від збільшення розміру судна складає:

$$\Delta P(x) = T \cdot \Delta P^y(x) = T \cdot (P_c + P_{ae}) \cdot N_d \cdot \frac{x}{n_c}. \quad (17)$$

Збільшення розміру судна призводить до додаткових щорічних експлуатаційних витрат $\Delta C_{op}^y(x)$, наприклад, перш за все, за рахунок збільшення портових зборів та плат, які встановлюються саме за розміром судна (як правило, за NT та/або GT). Таким чином, за певний період часу додаткові експлуатаційні витрати складають:

$$\Delta C_{op}(\Delta GT(x)) = \Delta C_{op}(x) = T \cdot \Delta C_{op}^y(x). \quad (18)$$

Отже, прикінцевий економічний результат модернізації по збільшенню розміру пасажирського судна без врахування дисконтування може бути поданий у вигляді:

$$Z(x) = \Delta P(x) - \Delta C_{op}(x) - C(x) - g_1(x) - g_2(x) - g_3(x). \quad (19)$$

Тобто (19) формує баланс усіх потоків грошових коштів, які пов'язані саме з модернізацією. Саме цей вираз пропонується використовувати в якості критерію оптимізації:

$$Z(x) = \Delta P(x) - \Delta C_{op}(x) - C(x) - g_1(x) - g_2(x) - g_3(x) \rightarrow \max. \quad (20)$$

Параметр управління – змінна моделі – довжина додаткової секції x .

Слід відзначити, що максимальне значення (20) не обов'язково забезпечить необхідну ефективність судновласнику.

Тому слід врахувати дві умови: перша – це умова отримання судновласником щорічного додаткового прибутку на певному рівні, друга – це доцільність інвестиційних ресурсів, спрямованих на дану модернізацію. Зазначимо, що витрати (12) за своєю сутністю відносяться до інвестиційних витрат, тому економічна доцільність збільшення розміру судна має базуватися на їх врахуванні у вказаному сенсі.

Отже, щорічний прибуток від використання додаткових кают має забезпечувати заданий рівень ΔP^{\min} :

$$\Delta P^y(x) - \Delta C_{op}^y(x) \geq \Delta P^{\min}. \quad (21)$$

Ефективність інвестицій може бути враховано за допомогою, наприклад, показника рентабельності інвестицій ROI:

$$\frac{\Delta P(x) - \Delta C_{op}(x)}{C(x) + g_1(x) + g_2(x) + g_3(x)} \geq ROI^{\min}, \quad (22)$$

де ROI^{\min} – мінімально припустимий рівень рентабельності (здається замовником модернізації). Так як $x > 0$, то знаменник у (20) теж більш 0.

Отже, (10)-(12), (20)-(22), формують основну структуру моделі для оптимізації розмірної оптимізації пасажирського судна. З урахуванням пропонованого підходу – інтегрального розгляду економічних на екологічних аспектів модернізації – доповним (10)-(12), (20)-(22) обмеженням на зміни у енергоефективності $\Delta EEDI$, які забезпечують виконання умов 3-ї фази (з 2025 року):

$$\Delta EEDI = [EEDI] - EEDI(x) > 0 \quad (23)$$

Відзначимо, що міжнародна морська організація регламентує норми енергоефективності не тільки для нових суден, але й до суден, що зазнали таких видів модернізації як переобладнання (конверсія) і модернізація СЕУ. Резолюціями комітету з безпеки на морі МЕРС 203.(62) і МЕРС 251.(66) було внесено відповідні поправки до розділів I і II конвенції MARPOL 73/78, в яких для суден, що пройшли модернізацію, визначаються додаткові вимоги щодо перерахунку коефіцієнту $EEDI$ і порівнянні його з допустимим значенням $[EEDI]$.

З урахуванням викладеного вище:

$$\begin{aligned} \Delta EEDI(GT(x)) &= \Delta EEDI(x) = [EEDI] - EEDI(x) = \\ &= k^{3ph} \cdot 170,84 \cdot (GT * + \Delta GT(x))^{-0,214} - EEDI(x) \end{aligned} \quad (24)$$

де k^{3ph} – знижуючий коефіцієнт для 3-ої фази. Отже, для пасажирських суден від 85,000 GT $k^{3ph} = 0,7$, тобто базовий припустимий рівень енергоефективності зменшується на 30% ([]).

Таким чином, (23) набуває наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta EEDI(GT(x)) &= \Delta EEDI(x) = [EEDI] - EEDI(x) = \\ &= k^{3ph} \cdot 170,84 \cdot (GT * + \Delta GT(x))^{-0,214} - EEDI(x) > 0 \end{aligned} \quad (25)$$

де

$$\begin{aligned} EEDI(x) &= \frac{\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{n_{DG}} P_{DG_i} C_{FDG_i} SFC_{DG_i} \right)}{f_i f_c f_l GT(x) f_w V_{ref}} - \\ &- \frac{\left(\left(\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff_i} P_{DG_{eff_i}} \right) C_{FDG_i} SFC_{DG_i} \right)}{f_i f_c f_l GT(x) f_w V_{ref}} - \\ &- \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff_i} P_{eff_i} C_{FDG_i} SFC_{DG_i} \right)}{f_i f_c f_l GT(x) f_w V_{ref}} \end{aligned} \quad (24)$$

Дана модель дозволяє визначати оптимальний розмір додаткової секції пасажирського судна у процесі модернізації з урахуванням інтегрального підходу до розгляду економічних та екологічних аспектів подальшої експлуатації даного судна. Модель відноситься до класу нелінійних моделей – критерій оптимізації та більшість обмежень не є лінійними функціями.

Сутність критерію оптимізації – економічний результат модернізації для заданого періоду експлуатації судна після модернізації, обмеження враховують необхідність дотримання нормативних вимог до розміру додаткової секції та енергоефективності судна, а також можливі витрати на модернізацію.

Експериментальні дослідження моделі.

Для експериментальної перевірки моделі були прийняті функціональні залежності наближені до реальних даних (табл. 1).

Слід зазначити, що умова (10) передбачає кратність довжини додаткової секції довжині каюти (для прикладу прийнято 3,5 м). Але ж на практиці під час досліджень доцільним є розглядання такого обмеження як перевіркою умови після оптимізації. Наприклад, при оптимальній за усіма економічними, технологічними

та екологічними умовами довжині додаткової секції, але не кратної заданої величини, якщо відхилення складає припустиму довжину, то доцільним є корегування умов з довжині кают (якщо, наприклад, мова йде про 10-25 см).

Таблиця 1

Прийняті функціональні залежності та вихідні дані

| Позначення | Прийняті значення чи залежності | Одиниці виміру |
|-----------------------------------|---------------------------------|----------------|
| ΔP^{\min} | 1000 | тис. дол |
| ROI^{\min} | 1,1 | - |
| $\Delta C_{op}^y(x)$ | $500 \cdot x^{0,714}$ | тис. дол. |
| T | 10 | роки |
| n_c | 3,5 | м |
| l_c | 48 | м |
| $C(x) + g_1(x) + g_2(x) + g_3(x)$ | $1031 \cdot x^{0,928}$ | тис. дол |
| R_m | 10000 | тис. дол |
| $EEDI(x)$ | $86,7 \cdot x^{-0,868}$ | |
| $\Delta P^y(x)$ | $740 \cdot x^{0,824}$ | тис. дол |

У процесі експериментальних досліджень моделі змінювався рівень обмежень по фінансуванню розмірної модернізації R_m у межах 20000 тис. долл – 50000 тис. дол. Оптимальний розмір додаткової секції та основні характеристики результатів модернізації наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Варіанти оптимального рішення та відповідних показників розмірної модернізації для різних вихідних умов

| № | R_m | x | $Z(x)$ | $\Delta EEDI$ | ROI |
|---|-------|-----|--------|---------------|-------|
| 1 | 50000 | 48 | 62942 | 7,58 | 2,68 |
| 2 | 30000 | 38 | 50709 | 7,05 | 2,69 |
| 3 | 20000 | 24 | 34010 | 5,57 | 2,7 |

Як бачимо, більш доцільним при розмірної модернізації є максимальна припустима її величина, тобто та, яка відповідає умовам діючих нормативних документів (варіант 2), саме цей варіант забезпечують максимальні значення як економічних показників, так й відстань між досягнутим за результатами розмірної модернізації EEDI та його припустимим значенням [EEDI].

Слід зазначити, що у даному конкретному прикладі «економічна ефективність» та «енергоефективність» оптимального рішення гармонічно доповнюють одна одну та не суперечать. Тобто забезпечення економічної ефективності відбувається разом із забезпеченням енергоефективності. Але ж умовою для цього є необхідний рівень фінансування модернізації, отже за умов недостатнього

рівня ресурсів економічні показники більш оптимістичні, ніж коефіцієнт енергоефективності.

Тем не менш необхідно підкреслити, що у експериментальних розрахунках не враховані можливі зміни у EEDI за рахунок, наприклад, змін у технологічному обладнанні судна на якісному рівні. Тобто у розрахунках враховано тільки вплив зміни розміру судна GT та, як наслідок, обсяг його транспортної роботи.

Подальші дослідження питання розмірної модернізації у контексті її впливу на екологічному рівні пов'язано саме с даними питаннями, що потребує значної кількості статистичних даних щодо шкоди довкіллю різними типами суднового обладнання.

Висновки. Екологічність будь-якого виробництва – сучасна вимога, яка, у тому числі, стосується морського судноплавства. Коефіцієнт енергоефективності EEDI є показником, який оцінює співвідношення шкоди навколишньому середовищу та роботи, яку виконує судно. Діюча нормативна база у сфері міжнародного судноплавства спрямована на забезпечення поступового зниження даного показника, що у комплексі забезпечить технологічно можливу мінімізацію екологічного впливу морського судноплавства.

Один з варіантів забезпечення допустимого рівня EEDI є модернізація, у тому числі, розмірна, за результатами якої збільшується GT судна, а це, в свою чергу, підвищує обсяг транспортної роботи судна та зменшує відповідний рівень EEDI.

У роботі проведено аналіз енергоефективності суден провідних світових компаній, який можна застосовувати для визначення їх модернізаційної привабливості; запропоновано модель оптимізації розмірної модернізації пасажирського судна з визначенням довжини додаткової секції судна при інтегральному розгляді економічних та екологічних аспектів подальшої експлуатації даного судна; виконано експериментальна перевірка моделі, яка обґрунтувала її достовірність та придатність для практичного використання у процесах прийняття рішень щодо розмірної модернізації пасажирських суден.

ЛІТЕРАТУРА

1. Global Forum on Transport and Environment in a Globalising World 10-12 November 2008, Guadalajara, Mexico The Environmental Impacts of Increased International Maritime Shipping. Oyvind Endresen and Magnus Eide, Det Norske Veritas, Høvik, Stig Dalsøren and Ivar S. Isaksen, University of Oslo and Eirik Sorgård, Pronord AS, Bodo, Norway. URL: <https://www.oecd.org/greengrowth/greening-transport/41373767.pdf>
2. Міжнародна конвенція щодо запобігання забруднення з суден 1973 року з поправками. URL: [Imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\)](http://Imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL)).
3. Резолюція комітету з захисту морського середовища Міжнародної морської організації 231(65). 2013 Guidelines for calculation of reference lines for use with the energy efficiency design index (EEDI) URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.231\(65\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.231(65).pdf)

4. Implementing Energy Efficiency Design Index (EEDI) <https://www.irclass.org/media/1393/energy-efficiency-design-index.pdf>
5. IMO (2010) “Module 2 – Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines”, IMO Train the Trainer (TTT) Course on Energy Efficient Ship Operation.
6. IMO (2014) “2014 Guidelines on the method of calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships”, MEPC 66/21/Add.1 p: 1.
7. IMO (2010) “Preventions of Air Pollution from Ships”, Marine Environment Protection Committee, 59th Session, Agenda item 4.
8. FaiC (2011) “IMO Technical Measures in Reducing Greenhouse Gas Emissions from ships: A Lloyd’s Register Perspective”, Lloyd’s Register Approach to IMO Technical Measures in Reducing Greenhouse Gas Emissions from Ships.
9. Energy Efficiency Design Index (EEDI) <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx>
10. MARPOL Annex VI, MEPC.1 / Circ.684. Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (EEOI), 17 August 2009.
11. MEPC.1/Circ.815: 2013. Guidance on treatment of innovative energy efficiency technologies for calculation and verification of the attained EEDI for ships in adverse conditions.
12. Tokuslu, A. (2020). Analyzing the Energy Efficiency Design Index (EEDI) Performance of a Container Ship. *International Journal of Environment and Geoinformatics (IJEGEO)*, 7(2): 114-119. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.703255>
13. Ančić, Ivica & Sestan, Ante & Vladimir, Nikola. (2015). Modification of the EEDI for Ro-ro Passenger Ships. <https://doi.org/10.5957/WMTC-2015-053>
14. ICCT (2011) “The Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships”, Policy Update 15, October 3-2011.
15. Tran, Tien Anh. (2016). Calculation and Assessing the EEDI Index in the Field of Ship Energy Efficiency for M/V Jules Garnier. *Journal of Marine Science: Research & Development*. 06. <https://doi.org/10.4172/2155-9910.1000212> .
16. Psaraftis, Harilaos & Kontovas, Christos. (2014). Ship speed optimization: Concepts, models and combined speed-routing scenarios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 44. 52–69. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.03.001> .
17. Haakont (2011) “Development of small versus large hydropower in Norway-comparision of environmental impacts”, *Energy Procedia* 20: 185-199.
18. Tu, H.; Yang, Y.; Zhang, L.; Xie, D.; Lyu, X.; Song, L.; Guan, Y.; Sun, J. A modified admiralty coefficient for estimating power curves in EEDI calculations. *Ocean Eng.* 2018, 150, 309–317
19. Ren H, Ding Y, Sui C. Influence of EEDI (Energy Efficiency Design Index) on Ship–Engine–Propeller Matching. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019; 7(12):425. <https://doi.org/10.3390/jmse7120425>

20. Yuan Y., Z. Li, R. Malekian, X. Yan (2017) Analysis of the operational ship energy efficiency considering navigation environmental impacts. *Journal of Marine Engineering & Technology* 16(3): 150-159. <https://doi.org/10.1080/20464177.2017.1307716> .
21. Onishchenko, O., Golikov, V., Melnyk, O., Onyshchenko, S., Obertiur, K. Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022, 116, 223-235. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.116.14>.
22. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Koryakin, K. (2021) Nature and origin of major security concerns and potential threats to the shipping industry. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 113, pp. 145–153 <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2021.113.11>
23. Гундобин А.А., Финкель Г.Н. Размерная модернизация и переоборудование судов: монография. Ленинград: Судостроение, 1977, 192 с.
24. Wolf, R., Dickman, J., & Boas, R. (2005). *Ship Design Using Heuristic Optimization Methods*. 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. <https://doi.org/10.2514/6.2005-1980>
25. Шумило О.М. Визначення оптимальних розмірів подовження пасажирських суден при їх модернізації. *Розвиток транспорту: Науковий журнал*. № 1 (12), 2022. С. 89-104.

REFERENCES

1. Global Forum on Transport and Environment in a Globalising World 10-12 November 2008, Guadalajara, Mexico The Environmental Impacts of Increased International Maritime Shipping. Oyvind Endresen and Magnus Eide, Det Norske Veritas, Høvik, Stig Dalsøren and Ivar S. Isaksen, University of Oslo and Eirik Sorgård, Pronord AS, Bodo, Norway. Retrieved from <https://www.oecd.org/green/growth/greening-transport/41373767.pdf>
2. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as amended [Mizhnarodna konventsiiia shchodo zapobihannia zabrudnennia z suden 1973 roku z popravkamy]. Retrieved from [imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\)](http://imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL)).
3. International Maritime Organization Marine Environment Protection Committee Resolution 231(65). [Rezoliutsiia komitetu z zakhystu morskoho seredovyscha Mizhnarodnoi morskoi orhanizatsii 231(65)]. (2013) Guidelines for calculation of reference lines for use with the energy efficiency design index (EEDI) Retrieved from [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.231\(65\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.231(65).pdf)
4. Implementing Energy Efficiency Design Index (EEDI) <https://www.irclass.org/media/1393/energy-efficiency-design-index.pdf>
5. IMO (2010) “Module 2 – Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines”, IMO Train the Trainer (TTT) Course on Energy Efficient Ship Operation.

6. IMO (2014) “2014 Guidelines on the method of calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships”, MEPC 66/21/Add.1 p: 1.
7. IMO (2010) “Preventions of Air Pollution from Ships”, Marine Environment Protection Committee, 59th Session, Agenda item 4.
8. FaiC (2011) “IMO Technical Measures in Reducing Greenhouse Gas Emissions from ships: A Lloyd’s Register Perspective”, Lloyd’s Register Approach to IMO Technical Measures in Reducing Greenhouse Gas Emissions from Ships.
9. Energy Efficiency Design Index (EEDI) <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx>
10. MARPOL Annex VI, MEPC.1 / Circ.684. Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (EEOI), 17 August 2009.
11. MEPC.1/Circ.815: 2013. Guidance on treatment of innovative energy efficiency technologies for calculation and verification of the attained EEDI for ships in adverse conditions.
12. Tokuslu, A. (2020). Analyzing the Energy Efficiency Design Index (EEDI) Performance of a Container Ship. *International Journal of Environment and Geoinformatics (IJEGEO)*, 7(2): 114-119. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.703255>
13. Ančić, Ivica & Sestan, Ante & Vladimir, Nikola. (2015). Modification of the EEDI for Ro-ro Passenger Ships. <https://doi.org/10.5957/WMTC-2015-053>
14. ICCT (2011) “The Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships”, Policy Update 15, October 3-2011.
15. Tran, Tien Anh. (2016). Calculation and Assessing the EEDI Index in the Field of Ship Energy Efficiency for M/V Jules Garnier. *Journal of Marine Science: Research & Development*. 06. <https://doi.org/10.4172/2155-9910.1000212>.
16. Psaraftis, Harilaos & Kontovas, Christos. (2014). Ship speed optimization: Concepts, models and combined speed-routing scenarios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 44. 52–69. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.03.001>.
17. Haakont (2011) “Development of small versus large hydropower in Norway-comparision of environmental impacts”, *Energy Procedia* 20: 185-199.
18. Tu, H.; Yang, Y.; Zhang, L.; Xie, D.; Lyu, X.; Song, L.; Guan, Y.; Sun, J. A modified admiralty coefficient for estimating power curves in EEDI calculations. *Ocean Eng.* 2018, 150, 309–317.
19. Ren H, Ding Y, Sui C. Influence of EEDI (Energy Efficiency Design Index) on Ship–Engine–Propeller Matching. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019; 7(12):425. <https://doi.org/10.3390/jmse7120425>
20. Yuan Y., Z. Li, R. Malekian, X. Yan (2017) Analysis of the operational ship energy efficiency considering navigation environmental impacts. *Journal of Marine Engineering & Technology* 16(3): 150-159. <https://doi.org/10.1080/20464177.2017.1307716>.

21. Onishchenko, O., Golikov, V., Melnyk, O., Onyshchenko, S., Obertiur, K. Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022, 116, 223-235. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.116.14>.
22. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Koryakin, K. (2021) Nature and origin of major security concerns and potential threats to the shipping industry. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 113, pp. 145–153. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2021.113.11>
23. Hundobyn A.A., Fynkel H.N. (1977). Dimensional modernization and conversion of ships [Razmernaia modernyzatsyia y pereoboru-dovanye sudov]. Lenynhrad: Sudostroenye, 192 p.
24. Wolf, R., Dickman, J., & Boas, R. (2005). Ship Design Using Heuristic Optimization Methods. 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. <https://doi.org/10.2514/6.2005-1980>
25. Shumylo O.M. (2022). Determining the optimal dimensions of the lengthening of passenger ships during their modernization. *Transport development [Vyznachennia optymalnykh rozmiriv podovzhennia pasazhyrskykh suden pry yikh modernizatsii]*. *Rozvytok transportu* № 1 (12). pp. 89-104.