

П.С. Суворов, Т.В. Тарасенко, В.І. Залож

## ДЕЯКІ ПИТАННЯ ОЦІНКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУДЕН В УМОВАХ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПЕРЕХОДУ У ВНУТРІШНЬОМУ СУДНОПЛАВСТВІ

Досліджується проблема оцінки енергоефективності внутрішнього судноплавства. Дослідження зосереджені на аналізі сучасного стану та досягненні цілей переходу до еконавігації. Підкреслюється важливість розробки нових стратегій та рішень для підвищення ефективності судноплавства в умовах енергетичного переходу. Аналізуються існуючі методики та підходи до вимірювання ефективності споживання палива та викидів CO<sub>2</sub>, а також вплив енергоефективних технологій на судноплавні системи. Звертається увага на використання альтернативних палив та оптимізацію швидкості як способи зниження споживання палива та викидів. Особлива увага приділяється дунайському судноплавству, де для перевезення вантажів використовуються великотоннажні каравани. Аналізуються технологічні особливості цього виду перевезень та навігаційні умови, що можуть впливати на енергоефективність суден. Пропонуються заходи для покращення ефективності судноплавства. Автори пропонують новий підхід до формування індексу енергоефективності, який враховує специфіку судноплавства, а саме великотоннажні каравани та умови навігації. Цей підхід дозволяє визначити рівень енергоефективності суден у контексті енергетичного переходу, не обмежуючись лише вимірюванням викидів CO<sub>2</sub>. Зазначається, що недостатня забезпеченість навігаційних умов може впливати на енергоефективність суден, зокрема шляхом збільшення опору води та необхідності використання більшої потужності для руху. Автори розглядають можливість застосування нових технологій та рішень, які допоможуть знизити споживання палива та покращити енергоефективність суден у таких умовах та пропонують нові підходи до вимірювання та оцінки енергоефективності судноплавства. У результаті проведених досліджень запропоновано підхід до трансформації форми індексу енергоефективності для суден внутрішнього плавання, який дозволяє уникати обмежень вимірювання лише викидів CO<sub>2</sub> і надає можливість комплексного оцінювання енергоефективності суден. Запропонований підхід сприятиме більшій точній оцінці та порівнянню різних суден в контексті енергетичного переходу, дозволяючи враховувати їхню продуктивність та витрати палива в реальних умовах судноплавства. Результати дослідження можуть бути корисними для вчених та фахівців у галузі внутрішнього судноплавства для розробки ефективних стратегій та політик з питань зменшення викидів парникових газів та поліпшення енергоефективності суден.

**Ключові слова:** дизельний двигун, шкідливі викиди, енергоефективність, внутрішнє плавання, паливна ефективність, еконавігація.

### Вступ

Процеси формування загальноєвропейських тенденцій покращення екологічності, енергоефективності та привабливості внутрішнього водного транспорту (ВВТ) тривають та отримують нові пріоритетні визначення та форми. Численні документи міжнародних організацій та проектів відображають прагнення до підвищення стійкості та мобільності ВВТ при досягненні його кліматичної нейтральності, що є політичним пріоритетом як на національному, так й на міжнародному рівні.

Підвищення сталості та мобільності формується як «модальний зсув», який передбачає перенесення більшого обсягу вантажних перевезень на внутрішні водні шляхи.

Приведення ВВТ до кліматичної нейтральності, тобто до нульового рівню викидів парникових газів та речовин, що забруднюють, до 2050 р. припускається досягнути з допомогою комплексу заходів, які включають різні дії з перегляду діючої та створенню нової нормативної бази для ринку і ВВТ, модернізації флоту і нових підходів до його технічної експлуатації, впровадження нових цифрових технологій до управління рухом флоту та стандартів підготовки фахівців флоту.

Враховуючи спрямованість спільних дій в рамках певних європейських проектів на досягнення найкращих екологічних показників роботи внутрішнього водного транспорту, метою даної роботи є дослідження поточного стану та напрямів покращення енергоефективності для внутрішніх водних шляхів, як невід'ємної складової комплексної оцінки ефективності роботи флоту та його екологічності.

Відповідно до оголошених цілей Паризької угоди (грудень 2015 р.), "Зеленого пакту для Європи" (European Green Deal) Європейської Комісії (ЄК), прийнятого в грудні 2019 р., та "Стратегії сталої та розумної мобільності" ЄК (грудень 2020 р.), визначені пріоритетні напрямки політики, серед яких стала мобільність та дії, які необхідно реалізувати для досягнення кліматичної нейтральності ВВТ до 2050 р. Так, на рівні Європейського Союзу (ЄС) виконані та подовжуються роботи зі створення основних нормативних і інформаційних робочих документів для постановки і розв'язання поставлених задач (План дій Європейської Комісії NAIADES III, COM (2021) 324 final, Директиви (ЄС) 2016/2397, 2017/1629, Стандарт ES-TRIN (2021), матеріали робочих груп CESNI, Регламент (ЄС) 2016/1628, підсумки проекту GRENDDEL

(2018-2020 рр.), матеріали проекту PLATINA 3, дорожня карта Центральної комісії з судноплавства на Рейні (ЦКСР) зі зменшення викидів внутрішнього судноплавства [1]). Доступними альтернативними видами палива для суден є: зріджений природний газ (ЗПГ), метанол, аміак та водень.

Така масштабна активність з орієнтацією на найбільш розвинуте внутрішнє судноплавство Західної Європи може у найближчому майбутньому призвести до втрати позицій дунайських судновласників, флот яких та умови роботи вкрай відрізняються від роботи малими самохідними суднами при цілорічній забезпеченості навігаційного фарватеру. Існує дуже великий ризик розповсюдження однакових нормативних вимог як для ВВП Західної Європи, так й для водного шляху Дунаю та дунайського судноплавства, що є нездійсненним. Тому постійне звернення уваги на особливості дунайського судноплавства та його потреби є вкрай актуальним задля створення умов подальшої сталої роботи учасників дунайського судноплавства.

#### Аналіз існуючих досліджень і публікацій

Існує багато різних розробок і проектів, спрямованих на зменшення шкідливих викидів в атмосферу від судових двигунів [2-5]. Для відповідності нормам викидів існують пристрої доочищення, які встановлюються на систему вихлопу для зменшення кількості викидів, а також методи попередньої обробки, які спрямовані на поліпшення якості самого палива. Стосовно пристроїв доочищення, наразі найбільш відомими підходами до зменшення викидів є рециркуляція вихлопних газів, селективна і каталітична нейтралізація та застосування сажового фільтра. Однак такі пристрої доочищення не можуть зменшити витрати палива. Крім того, вони пов'язані з численними проблемами, такими як необхідність структурної модифікації складних механічних пристроїв, а також періодичне технічне обслуговування, що тільки підвищує витрати.

Доступними альтернативними видами палива для суден є: зріджений природний газ (ЗПГ), метанол, аміак та водень. У дослідженні [5] автори прогнозують палива, які будуть використовуватися в майбутньому для досягнення мети нульових викидів до 2050 року. Очікується, що ЗПГ замінить традиційні види палива, такі як мазут з низьким вмістом сірки та суднове дизельне паливо, і найближчим часом стане основним паливом. Також очікується, що використання аміаку значно зросте після 2030 р., а до 2050 р. аміак стане основним морським паливом. В роботі [6] висвітлені методи підвищення ефективності суден. Ці методи можна розділити на чотири групи: використання енергозберігаючих технологій, використання відновлюваних

джерел енергії, використання альтернативних видів палива та зниження швидкості ходу судна.

#### Виклад основного матеріалу

Для внутрішнього судноплавства основними задачами при реалізації підходу до «енергетичного переходу» (фактично – переходу на такі види пального, які є альтернативними паливам викопного походження) є розробка та впровадження у певні строки конкретних організаційних, технічних та соціальних заходів, які передбачають перехід судноплавства до нульового рівню шкідливих викидів судових двигунів по визначених сценаріям, а саме:

а) послідовне зменшення маси парникових газів, приведених до CO<sub>2</sub>, в випускних газах двигунів в процесі руху суден,

б) послідовне забезпечення виконання нормативних вимог зі скорочення (зменшення) рівню інших шкідливих викидів в випускних газах двигунів,

в) підсумкове забезпечення переходу флоту на роботу з нульовими викидами парникових газів та інших шкідливих речовин.

Це погано кореспондується з прагненням бізнес-кіл учасників судноплавства до збереження звичайного ведення справ, тобто такого стану справ, до якого застосовується термін «бізнес-як-завичай» (business-as-usual, BAU), при якому масштабні проекти модернізації та впровадження інноваційних технологій можливі виключно за рахунок зовнішньої фінансової підтримки у зв'язку з їх коштовністю та тривалою окупністю.

Вочевидь така дуальність є підставою для активного пошуку підходів до експлуатації нині існуючого флоту з мінімальними фінансовими вкладеннями, але при цьому з максимально можливим результатом щодо покращення екологічності.

Крім того, у внутрішньому судноплавстві залишається невизначеним питання енергоефективності та її оцінки. Це питання активно обговорюється на різних рівнях – як у міжнародних організаціях та на форумах, так й учасниками судноплавства. Обговорення триває, визначення форми показників енергоефективності залишається актуальним завданням, але рух у напрямку розв'язання цього завдання є не дуже результативним та не пішов далеко від базового визначення індексів енергоефективності за методикою Міжнародної морської організації (ІМО) [7, 8]. Звісно, це не турбує міжнародні організації, які зосереджені на енергетичному переході та досягненні кліматичної нейтральності. Але такий підхід формує основу для поступового виникнення певних ризиків для подальшої

експлуатації існуючого флоту та «бізнесу-як-завичай».

Комплекс обмежуючих факторів в оцінці енергоефективності суден внутрішнього плавання на прикладі суден-штовхачів великовантажних составів розглянуто у роботі [7]. Це особливий тип з'єднань одного самохідного та до 9 несамохідних суден, якій є характерним для дунайського судноплавства. Він відрізняється от тих, які працюють на інших ВВШ Європи, тим, що здійснює перевезення великої кількості вантажів на великі (до 2000 км) відстані одночасно. Визначення показника енергоефективності для штовхача має значення не тільки для контролю його екологічності, але й для оцінки ефективності використання палива та економічності.

Для такого комплексного призначення пропонується розглянути деяку трансформацію індексу енергоефективності ІМО з метою його застосування для суден внутрішнього плавання в умовах енергетичного переходу та досягнення кліматичної нейтральності для внутрішнього водного транспорту.

При обранні способів (технологій) управління енергоефективністю необхідно враховувати вплив навігаційних умов як визначне в умовах їх абсолютної нестабільності. Також мають бути врахованими вік судна та поточний технічний стан суднової енергетичної установки (СЕУ). Оперативним менеджментом з використанням локальних річкових інформаційних систем (РІС) у поєднанні з підтримкою технічного стану СЕУ можна досягти найбільшого підвищення енергоефективності суден внутрішнього плавання [8].

Для досягнення мети даного дослідження слід згадати початкову ідею, закладену у форму індексу енергоефективності [9], в якій пропонується розглядати цей показник, як співвідношення шкідливого впливу на навколишнє середовище та загальної користі, яку отримує спільнота:

$$EEI = \frac{\text{Вплив на навколишнє середовище}}{\text{Користь для спільноти}} \quad (1)$$

Така форма наочно нагадує, що обчислення показника енергоефективності має бути простим і придатним для широкого застосування. Сам показник є інструментом сприяння зусиллям усіх зацікавлених сторін щодо зменшення шкідливих викидів, приведених до CO<sub>2</sub>, шляхом надання можливості обчислення та порівняння проектних, фактичних та референтних значень. Такій підхід також стимулює постійний технічний розвиток усього обладнання та комплектуючих, що впливають на ефективність використання пального. Також у індексі енергоефективності реалізована можливість відокремлення

технічних та проектних заходів (*EEEDI* – *Energy Efficiency Design Index* – проектний для нових суден) від операційних і комерційних (*EEOI* – *Energy Efficiency Operational Index* – експлуатаційний; *EEEXI* – *Energy Efficiency Index for Existing Ships* – для суден, побудованих та введених в експлуатацію до початку дії конвенційних вимог до енергоефективності).

За час існування формула індексу енергоефективності зазнала різні трансформації. Одна з форм [10] базується на властивостях логарифмічної функції:

$$EEEDI = \frac{\log(\text{CO}_2\text{ref} / \text{CO}_2)}{(C \cdot \log(Dw) + B)} \quad (2)$$

де *CO<sub>2</sub>ref* – еталонне значення викидів CO<sub>2</sub> для суден даного типу й розміру; *CO<sub>2</sub>* – фактичне значення викидів CO<sub>2</sub> для даного судна; *Dw* – дедвейт судна; *C*, *B* – коефіцієнти, які враховують вплив розмірень судна на його енергоефективність.

Така форма (2) оснований на спостереженні, що при збільшенні розмірень судна його відносна поверхня (як відношення змоченої поверхні до водомісткості) зменшується, що призводить до зменшення й опору руху судна та, відповідно, до зменшення витрати пального на одиницю пройдені дистанції. Цей ефект носить нелінійний характер, тож логарифмічна залежність використовується для його врахування. Логарифмічна залежність у знаменнику віддзеркалює той факт, що збільшення розмірень судна призводить до нелінійної зміни його енергоефективності, тому більш крупні судна мають більш високі значення *EEEDI*.

Актуальна методика обчислення індексу енергоефективності для морського судноплавства [11] прийнята 79-ю сесією ІМО та містить крім формули та роз'яснень до неї деякі оновлення. Зокрема, це включення етану до списку паливних, надання коефіцієнта перетворення (конверсійний фактор *CF*) для використання в розрахунках, роз'яснення максимально допустимого відрахування через використання валогенератора та роз'яснення для забезпечення послідовного підходу при роботі в змінних географічних умовах з застосуванням кількох вантажних марок.

Усі наведені трансформації форми індексу енергоефективності лише додають впевненості у можливості реалізації гнучкого підходу та знаходження такої його форми, у якій були б враховані усі значні особливості судноплавства на Дунаї та інших внутрішніх водних шляхах Європи.

При цьому слід визначитись з єдиним тлумаченням основних термінів:

- «енергоефективне судноплавство» у контексті використання показника енергоефективності

ті, аналогічного прийнятому ІМО індексу енергоефективності у вигляді питомої маси шкідливих викидів на одиницю транспортної роботи судна внутрішнього плавання;

- «зменшення інших викидів» у контексті викидів інших шкідливих речовин CO, HC, NO<sub>x</sub> та часток типу PM у вихлопних газах суднових двигунів як результат згоряння дизельного пального.

Інший важливий аспект – тлумачення сценаріїв перехідного періоду послідовної модернізації флоту, наприклад, по аналогії з Дорожньою картою ЦКСР [1], зокрема:

- консервативний, до 2035 року, який передбачає, наприклад, зменшення викидів парникових газів та часток на 35% у порівнянні з 2015 роком;

- інноваційний, до 2050 року, який передбачає, наприклад, значне зменшення шкідливих викидів парникових газів та часток (до 90%) у порівнянні з 2015 роком.

В консервативному сценарії пріоритет віддається вибору ефективних технологій скорочення викидів CO<sub>2</sub> та забруднюючих повітря газів та часток у вихлопних газах двигунів для суден, що знаходяться в експлуатації, або встановлення нових двигунів з граничними значеннями рівнів викидів, що встановлені Регламентом (ЄС) 2016/1628, фаза V (табл. 1; IWA – допоміжні двигуни, призначені виключно для використання на суднах внутрішнього плавання та які мають контрольну потужність 19 кВт або більше; IWP – двигуни, призначені виключно для використання на суднах внутрішнього плавання, для їх руху).

Таблиця 1. Граничні значення викидів по фазі V для категорій IWP, IWA двигунів

Під категорія двигунів	Діапазон потужності	CO	HC	NO <sub>x</sub>	PM	PN
	кВт					
IWP-v-1 IWP-c-1 IWA-v-1 IWA-c-1	19 <P<75	5,0	(HC+NO <sub>x</sub> ) < 4,70		0,30	
IWP-v-2 IWP-c-2 IWA-v-2 IWA-c-2	75<P<130	5,0	(HC+NO <sub>x</sub> ) < 5,40		0,14	—
IWP-v-3 IWP-c-3 IWA-v-3 IWA-c-3	130<P<300	3,5	1,0	2,10	0,10	—
IWP-v-4 IWP-c-4 IWA-v-4 IWA-c-4	P >300	3,5	0,19	1,80	0,015	10 <sup>12</sup>

Перехід до інноваційного сценарію передбачає підготовку до використання на суднах альтер-

нативних видів пального з низькими температурами запалення або інших технологій.

Спроба систематизації та оцінки можливості подальшого застосування в якості головних та допоміжних суднових двигунів класичних двигунів внутрішнього згоряння викладена у Дорожній карті ЦКСР [1] (табл. 2).

Досягненню кліматичної нейтральності ВВТ у значній мірі сприятиме також підвищення енергоефективності судноплавства, а також зменшення витрати пального, в тому числі альтернативного дизельному, в процесі руху судна, при цьому необхідно забезпечити:

а) визначення ефективних систем моніторингу руху суден для забезпечення енергоефективності судноплавства, а саме управлінських та технічних рішень з оптимального планування рейсової витрати пального (включаючи й альтернативні дизельному), з навчання менеджменту та екіпажів суден методам забезпечення паливної економічності руху суден;

б) вибір ефективних технологій зменшення викидів CO<sub>2</sub> та забруднюючих повітря газів та часток у вихлопних газах двигунів для суден, що знаходяться в експлуатації, або встановлення нових двигунів з межовими значеннями рівнів викидів, встановлених Регламентом (ЄС) 2016/1628, фаза V [7], підготовка до використання на суднах альтернативних видів пального з низькими температурами займання або інших інноваційних технологій [1];

в) обґрунтування раціонального переходу до застосування на суднах певного класу гібридних (дизель-електричних), електричних пропульсивних комплексів та установок з застосуванням потужних акумуляторних систем.

При цьому доцільним вважається збереження застосування індексів енергоефективності:

- проектного для внутрішнього судноплавства  $EEDI_{inland}$ ;

- експлуатаційного для внутрішнього судноплавства  $EEOI_{inland}$ , але в трансформованому варіанті, з новим фізичним смислом (без приведення до CO<sub>2</sub>).

У внутрішньому судноплавстві питання застосування показників енергоефективності є досі не визначеним. Але ставлення до нього також пройшло певні стадії трансформації. Так, вперше поняття енергоефективності стосовно до суден внутрішнього плавання для дунайського судноплавства було використано у проекті "The Innovative Danube Vessel" (2012 – 2015 pp.) у вигляді  $EEl$ , який аналогічен експлуатаційному показнику ІМО ( $EEOI$ ), також вимірюється у г CO<sub>2</sub>/т·км, та є питомою ма-

сою викидів CO<sub>2</sub> на транспортну роботу (тонно-кілометр дистанції руху судна). У подальшій програмі *PROMINENT* (2015 – 2018 pp.) використовується той же аналог показника енергоефективності IMO. У роботі [12] запропоновано інший, спрощений підхід:

$$EEDI = \frac{FC_j \cdot CF}{m \cdot dist}, \quad (3)$$

де  $FC_j$  – витрата пального на  $j$ -ій ділянці внутрішнього водного шляху;  $CF$  – конверсійний фактор приведення шкідливих викидів до CO<sub>2</sub>;  $m$  – маса вантажу, що перевозиться;  $dist$  – дистанція, довжи-

на даної ділянки.

Слід зазначити, що основні фактори впливу, зазначені у [11], застосовні також й для суден внутрішнього плавання, перш за все – для поодиноких суден, але у різному ступеню вагомості.

Дослідження, що проводяться у рамках програми *PLATINA 3* [13], розглядають можливість застосування *EEI* у варіантах як операційного *EEOI*, так й конструктивного *EEDI*, аналогічних IMO, але для умов плавання на ВВП. Логічно було б одразу ж розглядати й механізм покращення показників енергоефективності.

Таблиця 2. Технології, рівень готовності технологій (РГТ) та потенційне скорочення викидів

Враховані технології	Опис	РГТ (1-9) для застосування на судах	РГТ (1-9) пальне/виробництво енергії і поставки	Потенційне скорочення викидів (при ідеальній послідовності подей)		
				ПГ <sup>1</sup> /CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	частки
ЦКСП 2 або менше, дизпальне	Рідке дизпальне в двигуні внутрішнього згорання, що задовольняє граничні показники по викидах ZKR II, або більш старий двигун	9	9	0%	0%	0%
ЦКСП 2 + SCR, дизпальне	Рідке дизпальне в двигуні внутрішнього згорання, що задовольняє граничні показники по викидах ZKR II та оснащений додатково селективною каталітичною системою скорочення викидів	9	9	0%	82%	54%
Етап V, дизпальне	Рідке дизпальне в двигуні внутрішнього згорання, що задовольняє граничні показники по викидах ЄВРО V	9	9	0%	82%	92%
ЗПГ/LNG	Зріджений природний газ в двигуні внутрішнього згорання, що задовольняє граничні показники по викидах ЄВРО V	9	9	10%	81%	97%
Етап V, HVO	Гідроочищена рослинна олія в двигуні внутрішнього згорання, що задовольняє граничні показники по викидах ЄВРО V. HVO охоплює гідроочищені рослинні олії (без додавання вкопного пального) та всі аналогічні види біопалива (включаючи пальне E), а також синтетичне дизельне пальне, що виробляється з сепарацією CO <sub>2</sub> та електроенергією з поновлюваних джерел	9	9	100%	82%	92%
LBM	Зріджений біометанол (або біо ЗПГ/ LNG) в двигуні внутрішнього згорання, що задовольняє граничні показники по викидах ЄВРО V	9	8	100%	81%	97%
Акумуляторні батареї	Рушійні електричні системи, що використовують стаціонарні або змінні системи акумуляторів	8	7	100%	100%	100%
H <sub>2</sub> FC	Паливний елемент, який використовує водень, що зберігається у рідкій або газоподібній формі	7	7	100%	100%	100%
H <sub>2</sub> ICE	Двигун внутрішнього згорання, який використовує водень, що зберігається в рідкій або газоподібній формі	5	7	100%	82%	92%
MeOH FC	Паливний елемент, що використовує метанол	7	6	100%	100%	100%
MeOH ICE	Двигун внутрішнього згорання, що використовує метанол	5	6	100%	82%	92%

<sup>1</sup> THG – парникові гази

Враховуючи попередній досвід досліджень питань енергоефективності, пропонується низка організаційних та технічних рішень не тільки для нового флоту, але й для існуючого флоту, який вже знаходиться в експлуатації.

На рівні менеджменту судноплавних компаній ці рішення містяться у наступному:

- у визначенні раціональних інтервалів руху та орієнтовної швидкості судна для забезпечення приходу «точно у строк» з забезпеченням економічних режимів руху з урахуванням прогнозованої навігаційної обстановки при плануванні рейсів;
- у зниженні частки баластних переходів впродовж рейсу;
- у забезпеченні належного стану пропульсивного комплексу (регулярне доковання та технічне обслуговування двигунів);
- у можливому застосуванні експлуатаційного індексу енергоефективності в процесі експлуатації судна.

На операційному рівні (рівні судноводіння) це має забезпечуватись:

- вибором безпечної та економічної по витраті пального швидкості руху судна (каравану);
- оптимізацією форми состава;
- врахуванням поточних навігаційних умов (проходження критичних частин, поточні глибини суднового ходу, вітрові та хвильові навантаження тощо).

При будівництві нових суден у нових підходах до конструкції це забезпечується:

- оптимізацією обводів корпусу судна, застосуванням спеціальних спрямовуючих потоку обтікання в кормовій частині корпусу судна, збільшенням діаметру гвинтів, розміщенням гвинтів в насадках тощо, що дозволяє покращити показники енергоефективності на 5-10%, застосуванням високоекономічних двигунів у складі суднової енергетичної установки з глибокою утилізацією вторинних джерел тепла;
- можливим застосуванням конструктивного індексу енергоефективності при проектуванні судна.

Перехід до еконавігації як по консервативному, так й по інноваційному сценаріям, має підтримуватись відповідними заходами щодо усіх складових безпечного судноплавства, а саме:

- належного утримання суднового ходу з боку національних адміністрацій водних шляхів ініціюванням і реалізацією нових гідротехнічних проєктів з метою створення сталих та збалансованих умов судноплавства;
- забезпечення безпеки судноплавства та умов для безперешкодних перевезень по європей-

ському транспортному коридору *TEN-T* Рейн-Дунай через усунення надлишкових адміністративних перевірок та бар'єрів;

- вдосконалення професійної підготовки судноводіїв (Директива (ЄС) 2017/2397) для внутрішніх водних шляхів Європи (компетенції по еконавігації) з акцентом на повноцінне використання річкових інформаційних служб РІС при операційнім управлінні (рівень судноводіння);
- введення в судноплавних компаніях на рівні менеджменту системи моніторингу енергоефективності та екологічної безпеки за рахунок активного використання інформації від сучасних систем РІС для прогнозування руху при рейсовому плануванні (швидкості руху, форми караванів тощо) та стеження за поточним рухом суден;
- цифровізації технологічних та адміністративних процесів управління рухом флоту;
- екологізації дунайських портів та створення інфраструктури забезпечення флоту альтернативними видами пального.

В рамках роботи проєкту *PLATINA 3* [13] був запропонований новий механізм застосування системи маркування викидів від роботи двигунів суден внутрішнього плавання та визначені 5 рівнів, з яких:

- рівень А враховує тільки роботу силової установки (двигуна) при русі судна;
- рівень В враховує роботу всіх основних перетворювачів енергії на борту судна (головної силової установки, допоміжних силових установок, насосів, систем опалення та охолодження тощо);
- рівень С враховує роботу судна в цілому, включаючи його гідродинаміку, для визначених умов експлуатації);
- рівень D враховує експлуатаційні показники, включаючи швидкість руху судна, загальну кількість рейсів, періоди плавання в баласті;
- рівень E враховує переваги мультимодальних перевезень «від двері-до двері», визначаючи попередній / кінцевий пункти перевезення вантажів.

Рівні В, С, D найбільш повно відображають екологічні показники та ступінь енергоефективності роботи судна. При цьому рівень В може бути застосованим на всіх судах ВВТ оскільки всі необхідні вихідні дані для розрахунку викидів саме по цьому рівню можуть бути визначені по фактичним характеристикам (дані про споживання енергії, типу енергії, викидах парникових газів тощо).

Суть та цілі впровадження системи маркування викидів у внутрішньому судноплавстві полягають у наступному:

- диференціювати флот в межах певного класу (самохідні поодинокі судна, штовхачі, тощо) шляхом визначення показників від усіх силових перетворювачів енергії на борту;

- попередньо оцінити енергоефективність (викиди, приведені до CO<sub>2</sub>) конкретних типів суден внутрішнього плавання з врахуванням того, як вони спроектовані / побудовані, а також з врахуванням ймовірних умов експлуатації;

- представити теоретичні характеристики енергоефективності і викидів конкретного судна на основі змодельованих умов плавання (з врахуванням конкретного водного шляху і типу судна), оптимізувати, зокрема, конструкцію корпусу та гребного гвинта для передбачуваного району плавання та реальних умов експлуатації;

- оцінити рівень експлуатаційних викидів парникових газів від двигунів суден внутрішнього плавання з врахуванням розрахунків вуглецевого сліду в логістичній схемі перевезень та зіставити ці показники з іншими видами транспорту (на базі підходу, який застосовується *GLEC* – Глобальна рада з викидів в логістиці).

Даний інструмент може бути застосований до вантажних суден та суден-штовхачів великовантажних караванів, а також до спеціалізованого флоту (наприклад, днопоглиблювальних, гідрографічних суден і поромів).

### Висновки

Якщо об'єднати усі зазначені напрями та підходи в рамках енергетичного переходу з необхідністю зберегти на ринку внутрішнього судноплавства сприятливі умови для подальшого його існування, розвитку та привабливості для вантажовласників, то очевидними стають умови для пошуку компромісного підходу до формування схеми комплексної оцінки покращення екологічності, паливної економічності та корисності для суспільства. Основною складовою такої схеми можна розглядати аналог індексу енергоефективності, трансформованого з врахуванням особливостей внутрішнього судноплавства. У першу чергу доцільним вважається застосування різних форм такого показника:

- для суден різних типів;
- для етапів рейсу з застосуванням різних технологій (наприклад, технологій проводки та паузки при русі на обмеженому по глибині фарватері важковагового складу зі штовхача та несамохідних барж);
- для кожного з 5 рівнів маркування викидів відповідно до результатів *PLATINA 3*.

Такі висновки та пропозиції створюють передумови для подальшого опрацювання та вивчення

можливих форм показника енергоефективності для внутрішнього судноплавства.

### Список літератури:

1. CCNR Roadmap for reducing inland navigation emissions. [Electronic resource]. – France : Central Commission for the Navigation of the Rhine (CCNR), Strasbourg Cedex, 2022. – 75 p. – Mode of access: [https://www.ccr-zkr.org/files/documents/Roadmap/Roadmap\\_en.pdf](https://www.ccr-zkr.org/files/documents/Roadmap/Roadmap_en.pdf) (date of access: 04.05.2023).
2. Lee T. Mixing properties of emulsified fuel oil from mixing marine bunker-c fuel oil and water [Electronic resource] / Taeho Lee, Jinho Cho, Jeekeun Lee // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10, no. 11. – P. 1610. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/jmse10111610> (date of access: 04.05.2023).
3. Bach H. IMO off course for decarbonisation of shipping? Three challenges for stricter policy [Electronic resource] / Hanna Bach, Teis Hansen // *Marine Policy*. – 2023. – Vol. 147. – P. 105379. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105379> (date of access: 11.05.2023).
4. Zhang Y. Effects of different biodiesel blend fuel on combustion and emission characteristics of a diesel engine [Electronic resource] / Yanhui Zhang [et al.] // *Processes*. – 2021. – Vol. 9, no. 11. – P. 1984. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/pr9111984> (date of access: 11.05.2023).
5. Shih Y-C. Speed and fuel ratio optimization for a dual-fuel ship to minimize its carbon emissions and cost [Electronic resource] / You-Chen Shih [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 11, no. 4. – P. 758. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/jmse11040758> (date of access: 14.05.2023).
6. Fourth IMO GHG Study. MEPC 75/7/15 [Electronic resource] / J. Faber [et al.]. – London, UK : International Maritime Organization, 2020. – 524 p. – Mode of access: [https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/07/Fourth-IMO-GHG-Study-2020-Full-report-and-annexes\\_compressed.pdf](https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/07/Fourth-IMO-GHG-Study-2020-Full-report-and-annexes_compressed.pdf) (date of access: 22.05.2023).
7. Suvorov P. Restrictive factors in the evaluation of the inland pushers' energy efficiency with heavy convoys [Electronic resource] / P. S. Suvorov, T. V. Tarasenko, V. I. Zalozh // *Automation of ship technical facilities*. – 2020. – Vol. 26, no. 1. – P. 94–109. – Mode of access: <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2020-1-26-94-109> (date of access: 24.05.2023).
8. Суворов П. С. Оцінка енергоефективності для умов навігаційних невизначеностей у внутрішньому судноплаванні / П. С. Суворов, Т. В. Тарасенко, В. І. Залож // *Автоматизація судових технічних засобів: наук.-техн. зб.* – Одеса: НУ «ОМА», 2019. – Вип. 25. – С. 90 – 100. – Режим доступу: <http://ast.onma.edu.ua/wp-content/uploads/2019/12/astf-2019-1-25-90-100.pdf> (дата звернення: 20.05.2023).
9. Implementing Energy Efficiency Design Index (EEDI) [Electronic resource]. – Powai, Mumbai : Indian Register of Shipping. – 13 p. – Mode of access: <https://www.irclass.org/media/2368/energy-efficiency-design-index.pdf> (date of access: 16.05.2023).
10. 2018 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships [Electronic resource] : Resolution MEPC.308(73) of 26.10.2018. – Mode of access: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.308\(73\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.308(73).pdf) (date of access: 02.05.2023).
11. 2022 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships [Electronic resource] :

Resolution MEPC.364(79). – Mode of access: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364\(79\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364(79).pdf) (date of access: 02.05.2023). 12. Pauli G. Energy Efficiency Indices for carbon foot printing and as instrument for CO<sub>2</sub>-emission reduction of inland vessels [Electronic resource] / Gernot Pauli, Jens Ley. – Berlin : Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure. – 31 p. – Mode of access: [https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=https://platina3.eu/download/gernot-paulii-and-jens-ley-on-energy-efficiency-indices-as-an-instrument-for-the-reduction-of-co2-emissions-of-inland-vessels/?ind=0&filename=PLATINA3\\_session+4\\_pauli\\_ley\\_energy\\_index.pdf&wpdmdl=391&refresh=642c2a489dd681680616008&open=1](https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=https://platina3.eu/download/gernot-paulii-and-jens-ley-on-energy-efficiency-indices-as-an-instrument-for-the-reduction-of-co2-emissions-of-inland-vessels/?ind=0&filename=PLATINA3_session+4_pauli_ley_energy_index.pdf&wpdmdl=391&refresh=642c2a489dd681680616008&open=1) (date of access: 16.05.2023). 13. Platform for the implementation of a future inland navigation action programme PLATINA 3 [Electronic resource] // PLATINA 3. – Mode of access: <https://platina3.eu/download/5th-stage-all-presentations-and-agenda/> (date of access: 24.05.2023).

#### **Bibliography (transliterated):**

1. CCNR Roadmap for reducing inland navigation emissions [online], (2022). France: Central Commission for the Navigation of the Rhine (CCNR), Strasbourg Cedex. [Viewed 4 April 2023]. Available from: [https://www.ccr-zkr.org/files/documents/Roadmap/Roadmap\\_en.pdf](https://www.ccr-zkr.org/files/documents/Roadmap/Roadmap_en.pdf) 2. Lee, T., Cho, J. and Lee, J. (2022). Mixing Properties of Emulsified Fuel Oil from Mixing Marine Bunker-C Fuel Oil and Water. *Journal of Marine Science and Engineering*. [Online]. 10 (11). p.p. 1610. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse10111610> 3. Bach, H. and Hansen, T., (2023). IMO off course for decarbonisation of shipping? Three challenges for stricter policy. *Marine Policy* [Online]. Vol. 147, p. 105379. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105379> 4. Zhang, Y., Zhong, Y., Wang, J., Tan, D., Zhang, Z. and Yang, D., (2021). Effects of Different Biodiesel-Diesel Blend Fuel on Combustion and Emission Characteristics of a Diesel Engine. *Processes* [Online]. 9(11), p. 1984. Available from: <https://doi.org/10.3390/pr9111984> 5. Shih, Y.-C., Tzeng, Y.-A., Cheng, C.-W. and Huang, C.-H., (2023). Speed and Fuel Ratio Optimization for a Dual-Fuel Ship to Minimize Its Carbon Emissions and Cost. *Journal of Marine Science and Engineering* [Online]. 11(4), p. 758. Available from: <https://doi.org/10.3390/jmse11040758> 6. Faber, J., Hanayama, S., Zhang, S., Pereda, P., Comer, B., Hauerhof, E., Schim van der Loeff,

W., Smith, T., Zhang, Y. and Kosaka, H., (2020). Fourth IMO GHG Study MEPC 75/7/15 [Online]. London, UK: International Maritime Organization. [Viewed 22 May 2023]. Available from: [https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/07/Fourth-IMO-GHG-Study-2020-Full-report-and-annexes\\_compressed.pdf](https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/07/Fourth-IMO-GHG-Study-2020-Full-report-and-annexes_compressed.pdf) 7. Suvorov, P. S., Tarasenko, T. V. and Zalozh, V. I., (2020). Restrictive factors in the evaluation of the inland pushers' energy efficiency with heavy convoys. *Automation of ship technical facilities* [Online]. 26(1), p. 94–109. [Viewed 24 May 2023]. Available from: <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2020-1-26-94-109> 8. Suvorov, P. S., Tarasenko, T. V. and Zalozh, V. I., (2019) Otsinka enerhoefektyvnosti dlya umov navihatsiynykh nevyznachenostey u vnutrishn'omu sudnoplavstvi. *Avtomatyzatsiya sudnovykh tekhnichnykh zasobiv*. 25, p. 90 - 100. [Viewed 20 May 2023]. Available from: <http://ast.onma.edu.ua/wp-content/uploads/2019/12/astf-2019-1-25-90-100.pdf> 9. Implementing Energy Efficiency Design Index (EEDI) [Online]. Powai, Mumbai: Indian Register of Shipping. 13 p. [Viewed 16 May 2023]. Available from: <https://www.irclass.org/media/2368/energy-efficiency-design-index.pdf> 10. International Maritime Organization, (2018). 2018 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships. Resolution MEPC.308(73) [Online]. 38 p. [Viewed 23 May 2023]. Available from: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.308\(73\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.308(73).pdf) 11. International Maritime Organization, (2022). 2022 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships. Resolution MEPC.364(79). [Online]. 39 p. [Viewed 23 May 2023]. Available from: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364\(79\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364(79).pdf) 12. Pauli, G. ma Ley, J. Energy efficiency indices for carbon foot printing and as instrument for CO<sub>2</sub>-emission reduction of inland vessels [Online]. Berlin: Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure. [Viewed 16 May 2023]. Available from: [https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=https://platina3.eu/download/gernot-paulii-and-jens-ley-on-energy-efficiency-indices-as-an-instrument-for-the-reduction-of-co2-emissions-of-inland-vessels/?ind=0&filename=PLATINA3\\_session+4\\_pauli\\_ley\\_energy\\_index.pdf&wpdmdl=391&refresh=642c2a489dd681680616008&open=1](https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=https://platina3.eu/download/gernot-paulii-and-jens-ley-on-energy-efficiency-indices-as-an-instrument-for-the-reduction-of-co2-emissions-of-inland-vessels/?ind=0&filename=PLATINA3_session+4_pauli_ley_energy_index.pdf&wpdmdl=391&refresh=642c2a489dd681680616008&open=1) 13. Platform for the implementation of a future inland navigation action programme PLATINA 3 [Website]. PLATINA 3. [Viewed 24 May 2023]. Available from: <https://platina3.eu/download/5th-stage-all-presentations-and-agenda/>

Надійшла до редакції 30.05.2023 р.

**Суворов Петро Семенович** – доктор техн. наук, професор, академік Транспортної академії України, професор кафедри суднових енергетичних установок і систем, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл, Україна, e-mail: [petr.s.suvorov@gmail.com](mailto:petr.s.suvorov@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-5160-3966>.

**Тарасенко Тетяна Владиславівна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інженерних дисциплін, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл, Україна, e-mail: [tarasenko@dinuoma.com.ua](mailto:tarasenko@dinuoma.com.ua), <https://orcid.org/0000-0001-8107-3524>.

**Залож Віталій Іванович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інженерних дисциплін, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл, Україна, e-mail: [zalozh@dinuoma.com.ua](mailto:zalozh@dinuoma.com.ua), <https://orcid.org/0000-0002-5213-6896>.

## **SOME ISSUES OF VESSELS ENERGY EFFICIENCY ASSESSMENT IN THE INLAND SHIPPING ENERGY TRANSITION CONDITIONS**

**P. Suvorov, T. Tarasenko, V. Zalozh**

The problem of evaluating the energy efficiency in inland navigation is being investigated. The research focuses on analyzing the current state and achieving the goals of transitioning to eco-navigation. Emphasis is placed on the importance of developing new strategies and solutions to enhance the efficiency of navigation in the context of the energy transition. Existing methodologies and approaches for measuring fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions efficiency, as well as the impact of energy-efficient

technologies on navigation systems, are being examined. Attention is given to the use of alternative fuels and speed optimization as means of reducing fuel consumption and emissions. Special attention is devoted to Danube navigation, where large-tonnage convoys are used for cargo transportation. The technological peculiarities of this type of transport and navigation conditions that can affect vessel energy efficiency are analyzed. Measures are proposed to improve the efficiency of navigation. The authors suggest a new approach to forming an energy efficiency index that takes into account the specifics of inland navigation, specifically large-tonnage convoys and navigation conditions. This approach allows determining the level of vessel energy efficiency in the context of the energy transition, beyond the conversion to CO<sub>2</sub> emissions alone. It is noted that inadequate navigation conditions can impact vessel energy efficiency, particularly by increasing water resistance and the need for higher power for propulsion. The authors explore the possibility of applying new technologies and solutions that can help reduce fuel consumption and enhance vessel energy efficiency under such conditions, and they propose new approaches to measuring and assessing the energy efficiency of navigation. As a result of the conducted research, an approach to transforming the form of the energy efficiency index for inland navigation vessels is proposed, which avoids limitations associated with measuring only CO<sub>2</sub> emissions and allows for a comprehensive assessment of vessel energy efficiency. The proposed approach will contribute to a more accurate evaluation and comparison of different vessels in the context of the energy transition, considering their performance and fuel costs under real navigation conditions. The research findings can be valuable for scientists and experts in the field of inland navigation in developing effective strategies and policies for reducing greenhouse gas emissions and improving vessel energy efficiency.

**Key words:** diesel engine; harmful emissions; energy efficiency; inland navigation; fuel efficiency; econavigation.

УДК 656.13 : 621.43 : 681.518

DOI: 10.20998/0419-8719.2023.2.06

*І.В. Грицук, Д.С. Погорлецький, А.П. Полив'янчук, І.В. Худяков, В.В. Черненко, О.В. Поліщук*

## ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТИ ПАЛИВА ТА ВИКИДІВ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН ДВИГУНІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З СИСТЕМАМИ ПОДАЧІ БЕНЗИНУ І ГАЗУ (ДВИГУН З СИСТЕМАМИ ПОДАЧІ БЕНЗИНУ І ЗРІДЖЕНОГО НАФТОВОГО ГАЗУ)

*Застосування системи теплової підготовки транспортного двигуна на основі теплового акумулятора фазового переходу дозволяє суттєво знизити витрати палива та викидів шкідливих речовин. В той же час використання систем теплової підготовки для транспортних засобів, працюючих на бензині і зрідженому нафтовому газі, і оцінювання витрати палива та викидів шкідливих речовин в умовах експлуатації не проводилось. В статті розглядаються особливості формування методу визначення витрати палива та викидів шкідливих речовин двигунів транспортних засобів з системами подачі бензину і газу, які оснащені системою теплової підготовки з використанням теплового акумулятора фазового переходу. Виконаний аналіз методів оцінювання витрати палива та викидів шкідливих речовин двигунів з урахуванням формування в умовах експлуатації теплової підготовки. Розроблений алгоритм визначення та оцінювання окремих критеріїв забезпечення в умовах експлуатації теплової підготовки транспортного двигуна. Удосконалено метод розрахунку витрати палива і викидів шкідливих речовин у відпрацьованих газах транспортних засобів з двигунами, переобладнаними для роботи на газовому паливі, оснащені тепловим акумулятором фазового переходу, саме в процесах передпускової і післяпускової теплової підготовки. В результаті реалізації розробленого методу визначення витрати палива та викидів шкідливих речовин двигунів транспортних засобів з системами подачі бензину і газу підтверджено можливість визначення суттєвого зниження в умовах експлуатації часових параметрів теплової підготовки (прогріву) двигуна транспортного засобу і зниження витрати палива (бензин / газ) на прогрів.*

**Ключові слова:** автомобільний двигун; система подачі палива; бензин; зріджений нафтовий газ; метод; витрата палива; викиди шкідливих речовин.

### Вступ

В даний час не викликає сумнівів актуальність проблеми забезпечення зниження витрати палива та викидів шкідливих речовин двигунів транспортних засобів. Не менш важливо це і для багатопаливних двигунів, які можуть працювати не тільки на бензині, а й на зрідженому нафтовому газі.

Одним із дієвих засобів покращення паливної економічності і екологічності двигунів транспортного призначення є використання системи теплової

підготовки на основі теплових акумуляторів фазового переходу [1, 2].

Проте часто є проблематичним однозначно визначити точні значення економії палива і зниження шкідливих викидів двигунів транспортних засобів, що працюють на рідкому нафтовому і газовому паливі. Потрібні особливі методи визначення і засоби реалізації, щоб урахувати режими теплової підготовки і витрати різних палив, як рідкого нафтового так і газового в процесах прогріву. Тим більше потрібно враховувати особливості отримання