

## ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУДЕН ВНУТРІШНЬОГО ПЛАВАННЯ ЗА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ПАРАМЕТРАМИ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ

**Тарасенко Т. В.**, к.т.н., доцент, завідувачка кафедри інженерних дисциплін Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл, Україна, e-mail: tarasenko@dinuota.com.ua, ORCID: 0000-0001-8107-3524;  
**Залож В. І.**, д.т.н., доцент кафедри інженерних дисциплін Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл, Україна, e-mail: zalozh@dinuota.com.ua, ORCID: 0000-0002-5213-6896.

Показники енергоефективності суден внутрішнього плавання, що перебувають в експлуатації, залишаються недостатньо регламентованими. Вони продовжують активно досліджуватися як на регуляторних, так і на науково-дослідних рівнях. Стаття присвячена аналізу сучасних підходів до визначення показників енергоефективності самохідних суден внутрішнього плавання та штовхачів-буксирів. Особливу увагу приділено європейському контексту та специфічним умовам дунайського судноплавства. Більшість відомих підходів ґрунтуються на адаптації морського індексу EEDI до умов внутрішніх водних шляхів. Виконано порівняльний аналіз існуючих методів оцінювання експлуатаційних показників енергоефективності з визначенням їхніх основних припущень та обмежень. Розглянуто, зокрема, метод Белградського університету та метод DST, розроблений на замовлення Федерального міністерства транспорту Німеччини. Показано, що більшість сучасних підходів не враховують належним чином фактичний технічний стан головних двигунів. Технічний стан суттєво впливає на реальне споживання палива, ефективну потужність і, відповідно, на експлуатаційну енергоефективність судна. Розглянуто застосування параметричного діагностування головних двигунів для уточнення експлуатаційних параметрів робочого процесу. Такий підхід забезпечує фізично обґрунтовану основу для безперервного моніторингу енергоефективності судна в умовах експлуатації. Обґрунтовано необхідність розроблення трансформаційного методу, який інтегрує результати параметричного діагностування у розрахунок показників енергоефективності. Метод передбачає поетапний аналіз рейсу з диференційованим застосуванням уточнених навантажувальних характеристик головного двигуна. Типові етапи охоплюють рух на глибокій воді, проходження мілководдя, маневрування на перекатах і провідку частини каравану. На цій основі будуються реалістичні профілі витрати палива, потужності та швидкості суден внутрішнього плавання. Це підвищує достовірність і практичну значущість оцінювання енергоефективності у внутрішньому судноплавстві.

**Ключові слова:** внутрішній водний транспорт; енергоефективність; дунайське судноплавство; судновий дизельний двигун; параметричне діагностування; робочий процес двигуна; питома ефективна витрата палива; EEDI; штовхач з баржевим караваном.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2026.1.32.020-032**

**Вступ.** Попри тривалий період, значні фінансові вкладення та суттєві зусилля, докладені на різних рівнях до розроблення програм зі скорочення шкідливих викидів [11–13], енергетичного переходу та досягнення цілей еконавігації й руху до концепції zero-emission, переважна більшість суден внутрішнього водного транспорту й надалі рухається за рахунок енергії, що виробляється двигунами внутрішнього згоряння під час спалювання викопного нафтового палива. Така ситуація зумовлена насамперед тим, що переобладнання наявного флоту є економічно неприйнятним і за відсутності зовнішніх інвестицій з боку державних фондів та відповідних регуляторних механізмів є фактично недосяжним для більшості судновласників в умовах сучасного стану ринку дунайських перевезень [15, 16]. Ті самі чинники пояснюють майже повну відсутність нових замовлень на будівництво суден, за поодинокими винятками, пов'язаними з реалізацією окремих проєктів за підтримки Європейського Союзу [2].

У найближчій перспективі основними засобами транспорту на внутрішніх водних шляхах Європи залишатимуться самохідні судна, оснащені двигунами внутрішнього згоряння, а на Дунаї – також штовхачі з баржевими караванами, що мають аналогічні силові

установки [1, 14]. Ефективність використання палива безпосередньо впливає як на експлуатаційні витрати, так і на обсяги шкідливих викидів під час навігації [3]. Внутрішнє судноплавство відзначається значною різноманітністю – від окремих самохідних суден до великотоннажних караванів різної структури та складу, – а його енергоефективність, на відміну від морського транспорту, додатково залежить від таких параметрів, як глибина води та судового ходу, швидкість течії, гідрометеорологічні умови тощо [14]. Водночас внутрішній водний транспорт посідає вагоме місце на європейському ринку вантажних перевезень та ефективно конкурує з автомобільним і залізничним транспортом, передусім у сегменті масових навалочних вантажів [15, 16].

**Мета дослідження** – порівняльний аналіз існуючих підходів до розрахунку показників енергоефективності суден внутрішнього водного транспорту та обґрунтування можливостей застосування параметричного діагностування двигунів внутрішнього згоряння для підвищення достовірності такого оцінювання.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Оцінювання енергоефективності суден внутрішнього водного транспорту впродовж останніх років перебуває у фокусі уваги як міжнародних організацій, так і наукової спільноти. На основі морського індексу *EEDI* було запропоновано низку адаптованих підходів для внутрішніх водних шляхів [4], що враховують специфіку плавання в умовах обмеженого фарватеру – вплив мілководдя, річкової течії та конфігурації караванів.

Зокрема, дослідницька група Белградського університету (*Kalajdžić, Momčilović* та ін.) запропонувала підхід до оцінювання енергоефективності самохідних вантажних суден на основі адаптації *EEDI* до умов дунайського судноплавства [5, 6]. Було показано, що навіть у межах єдиної концепції *EEDI* різні варіанти математичних моделей – з урахуванням потужності двигуна, глибини води, осадки та течії дають суттєво різні значення енергоефективності й можуть призводити до суперечливих висновків щодо відповідності суден проєктним критеріям [5].

Паралельно, у дослідженні Центру розвитку суднобудівних технологій та транспортних систем для Федерального міністерства транспорту Німеччини для внутрішнього водного транспорту запропоновано спеціалізовані індекси – *EEDI<sub>inland</sub>* / *EEDI<sub>lww</sub>* – та індекс експлуатаційної енергоефективності (*EEO*) як адаптації морських *EEDI* та *EEOI* до умов річкової навігації [4, 7]. Показано, що індекс *EEO* є чутливим до варіацій глибини, швидкості течії, осадки та навантаження двигуна, проте демонструє значну варіативність результатів, що ускладнює порівняння суден за єдиними критеріями [6].

Окремий напрям становлять дослідження у сфері параметричного діагностування судових ДВЗ, де запропоновано методи контролю технічного стану за індикаторними параметрами, температурою та складом відпрацьованих газів, а також інструментальні системи для реалізації такого діагностування в реальних умовах експлуатації [10]. Дедалі більше досліджень пропонують уточнювати розрахунки індексів через використання скоригованих характеристик ДВЗ, отриманих за результатами натурних вимірювань, замість усереднених значень питомої витрати палива, закладених у базові формулювання індексів типу *EEDI* [8, 9]. Комплексні моделі енергетичних характеристик та маневрування суден на внутрішніх водних шляхах також підтверджують суттєвий вплив гідрологічних умов та експлуатаційних параметрів на витрату палива й обсяги викидів [18, 19].

**Постановка проблеми.** Зазначене обґрунтовує доцільність розроблення методів, що поєднують уточнені параметри ДВЗ із поетапним аналізом рейсу за характерними експлуатаційними режимами: плавання на глибокій воді, прохід мілководних ділянок, маневрування на перекатах, робота в розібраному караванному складі тощо. Перспективи альтернативних видів пропульсії на Дунаї у найближчій перспективі залишаються обмеженими [17], що додатково підсилює важливість енергоефективності існуючого флоту з ДВЗ. Водночас систематична інтеграція результатів параметричного діагностування у методики розрахунку індексів енергоефективності суден внутрішнього плавання

залишається недостатньо опрацьованою – саме ця прогалина визначає актуальність, наукову новизну та практичну значущість представленого дослідження.

**Виклад основного матеріалу.** Запропонована методологія оцінювання енергоефективності суден внутрішнього водного транспорту поєднує дві взаємопов'язані складові: параметричне діагностування головного двигуна внутрішнього згоряння в реальних умовах експлуатації та поетапний аналіз рейсу з урахуванням мінливості навігаційних умов [8, 9]. На відміну від підходів, що використовують усереднені або паспортні характеристики двигуна, запропонований метод передбачає отримання уточнених навантажувальних характеристик ДВЗ безпосередньо під час експлуатації судна та їх диференційоване застосування для кожного з виділених етапів рейсу.

Типовий рейс судна внутрішнього плавання – як самохідного вантажного судна, так і штовхача з баржевим караваном характеризується суттєвою неоднорідністю навігаційних умов, що безпосередньо впливає на навантаження головного двигуна та питому ефективну витрату палива [14]. З метою підвищення достовірності оцінювання енергоефективності рейс розбивається на такі типові експлуатаційні етапи:

- рух у глибокій воді при повному завантаженні та сталій швидкості ходу;
- рух в умовах мілководдя з обмеженою глибиною судноплавного ходу, що супроводжується зростанням гідродинамічного опору;
- проходження перекатів з виконанням різних маневрів, яке характеризується змінним режимом роботи двигуна та підвищеною витратою палива;
- провідка частини каравану із розділенням баржевого складу, що змінює масу та гідродинамічний профіль буксированого об'єкта.

Для кожного етапу визначаються характерні значення швидкості ходу, частоти обертання та навантаження головного двигуна, які використовуються як вхідні дані для розрахунку показників енергоефективності.

Безаварійну експлуатацію головних двигунів забезпечують шляхом регулярного контролю параметрів робочого процесу в окремих циліндрах. Систематичний аналіз цих параметрів дозволяє оптимізувати роботу двигуна, рівномірно розподіляти навантаження між циліндрами та своєчасно виявляти небезпечні тенденції у зміні технічного стану основних систем і вузлів [10, 20]. У контексті задачі оцінювання енергоефективності параметричне діагностування виконує ще одну ключову функцію – забезпечує отримання уточнених термодинамічних характеристик робочого процесу ДВЗ безпосередньо в умовах експлуатації, що є фізично обґрунтованою альтернативою використанню усереднених паспортних показників.

Періодичний контроль дає змогу виявити дефекти циліндрів та обслуговуючих систем двигуна, що зароджуються у процесі експлуатації. Частина з них ідентифікують за формою індикаторної діаграми на ділянках стиснення та згоряння, а також за значеннями основних параметрів робочого процесу: максимального тиску згоряння  $P_{max}$ , тиску кінця стиснення  $P_{comp}$ , середнього індикаторного тиску  $MIP$ , кута початку згоряння тощо. Типовими діагностичними ознаками є зниження  $MIP$ ,  $P_{max}$  або  $P_{comp}$  відносно еталонних значень.

Методика проведення вимірювань передбачає встановлення датчика тиску на індикаторний кран після його попереднього продування. Вібродатчик послідовно встановлюється у трьох характерних точках: на торці форсунки, на відсічці паливного насоса високого тиску та, за потреби, на кришці циліндра. Для кожного положення вібродатчика синхронно реєструють індикаторну та вібраційну діаграми.

Паралельний аналіз індикаторної та вібраційних діаграм дозволяє визначити затримку самозаймання палива, а також розбіжність між геометричними та дійсними фазами паливоподачі. Ці величини несуть цінну діагностичну інформацію про процеси сумішоутворення та згоряння в циліндрі та дають змогу локалізувати першопричину дефекту. Запропонований алгоритм виявився особливо дієвим при діагностуванні паливної апаратури високого тиску та клапанів газорозподілу [21].

Зіставлення отриманих індикаторних діаграм з еталонними дає змогу виявити відхилення в роботі окремих циліндрів та оцінити рівномірність розподілу навантаження між ними, що є необхідною умовою коректного визначення фактичної ефективної потужності двигуна – одного з ключових вхідних параметрів для розрахунку експлуатаційних показників енергоефективності.

Приклад одночасної реєстрації індикаторної та вібраційної діаграм наведено на рис. 1. Експериментальні дані діагностування головного двигуна *SKL NVD48 (6VDS 48/42 AL-2)*, отримані за допомогою портативної системи *DEPAS D4.0H* [9, 22], подано на рис. 2.

На рис. 1 наведено типовий звіт системи діагностування *DEPAS D4.0H*, сформований за результатами індиціювання циліндра №1 середньообертного чотиритактного дизельного двигуна *SKL* типу *6VDS 48/42*. Звіт містить повний обсяг діагностичної інформації, що автоматично формується системою за цикл вимірювання: індикаторну діаграму в координатах  $P(\text{°ПКВ})$ , розраховані параметри робочого процесу циліндра ( $P_{max}$ ,  $P_{comp}$ ,  $MIP$ ), а також похідні показники, які надалі використовуються для оцінювання ефективної потужності двигуна та питомої ефективної витрати палива.

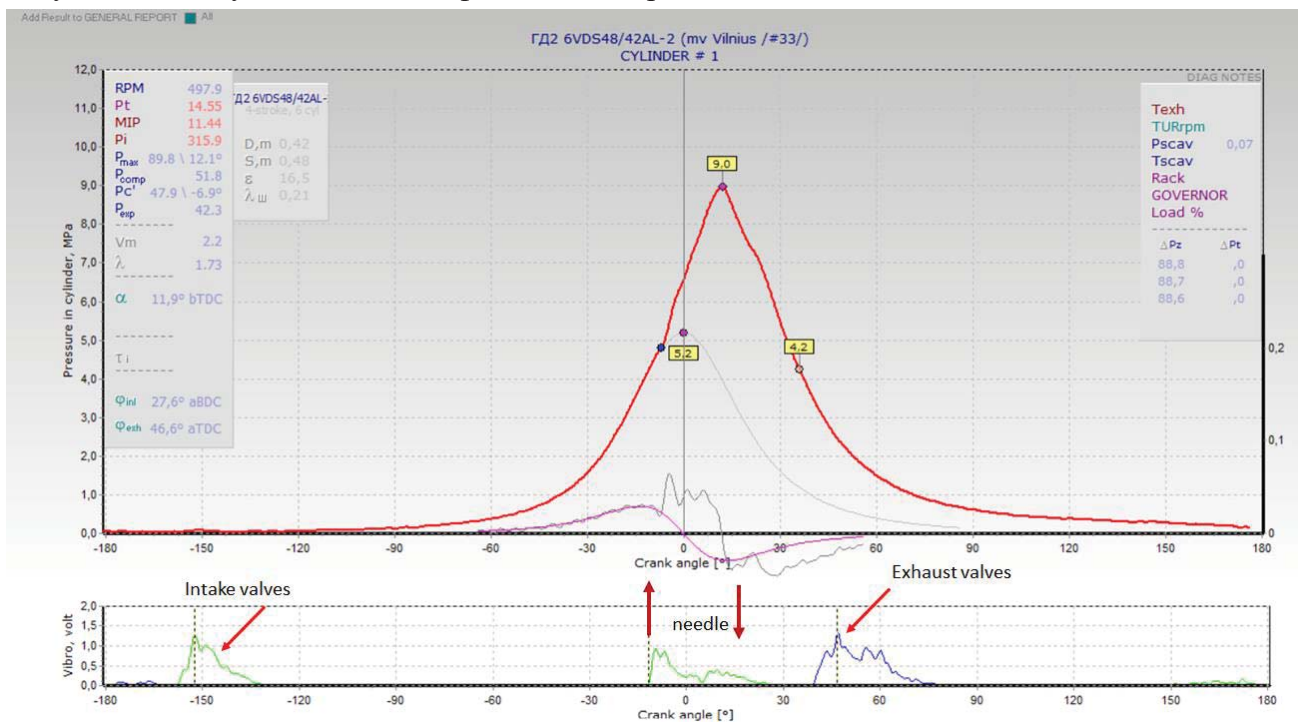


Рисунок 1 – Індикаторна та вібраційна діаграми циліндра №1 головного двигуна *SKL NVD48 (6VDS 48/42 AL-2)* [9]

Паралельно з індикаторною діаграмою (червона лінія) у функції кута повороту колінчастого вала реєструється вібродіаграма, на якій ідентифікуються характерні віброімпульси:

- *intake valves* закриття впускних клапанів;
- *needle up* початок впорскування палива (фаза підйому голки форсунки);
- *needle down* кінець впорскування палива (фаза посадки голки форсунки);
- *exhaust valves* закриття випускних клапанів (синя крива).

Окрім штатних параметрів робочого процесу, вібродіаграма дозволяє ідентифікувати дефекти механізму газорозподілу. На рис. 1 чітко спостерігається асинхронна робота випускних клапанів: віброімпульс *exhaust valves* є подвійним: спочатку реєструється удар одного клапана, а згодом, із певним запізненням за кутом ПКВ, удар другого. Роздвоєння імпульсу свідчить про розбалансування траверси приводу випускних клапанів. Для усунення дефекту траверсу необхідно відрегулювати таким чином, щоб обидва клапани закривалися одночасно, формуючи одинарний віброімпульс, вершина якого відповідає фазі закриття клапанів, зазначеній у паспортній документації двигуна. Виявлення асинхронної роботи

випускних клапанів має важливе практичне значення, оскільки їх несинхронне закриття спричиняє: нерівномірне зношування сідел і тарілок клапанів; підвищений рівень шуму та вібрації механізму газорозподілу; погіршення якості газообміну й, як наслідок, зниження індикаторної потужності циліндра та зростання питомої ефективної витрати палива.

На рис. 2 наведено зведений звіт (*general report*) системи діагностування DEPAS D4.0H, що містить комплексну інформацію про технічний стан усіх циліндрів двигуна SKL типу 6VDS 48/42. Звіт структурно поділено на декілька секцій.

У верхній секції розміщено індикаторні діаграми  $P(\varphi)$  для всіх циліндрів, суміщені в єдиній системі координат зі зміщенням по осі абсцис для наочного візуального порівняння. Таке представлення дозволяє оперативно оцінити рівномірність розподілу навантаження між циліндрами та виявити відхилення у протіканні робочого процесу окремих циліндрів. На рис. 2 червоним і сірим кольором виділено діаграми 1-го та 6-го циліндрів, для яких зафіксовано відхилення максимального тиску згоряння  $P_{max}$  від середнього значення по всіх циліндрах понад 3,5 %.

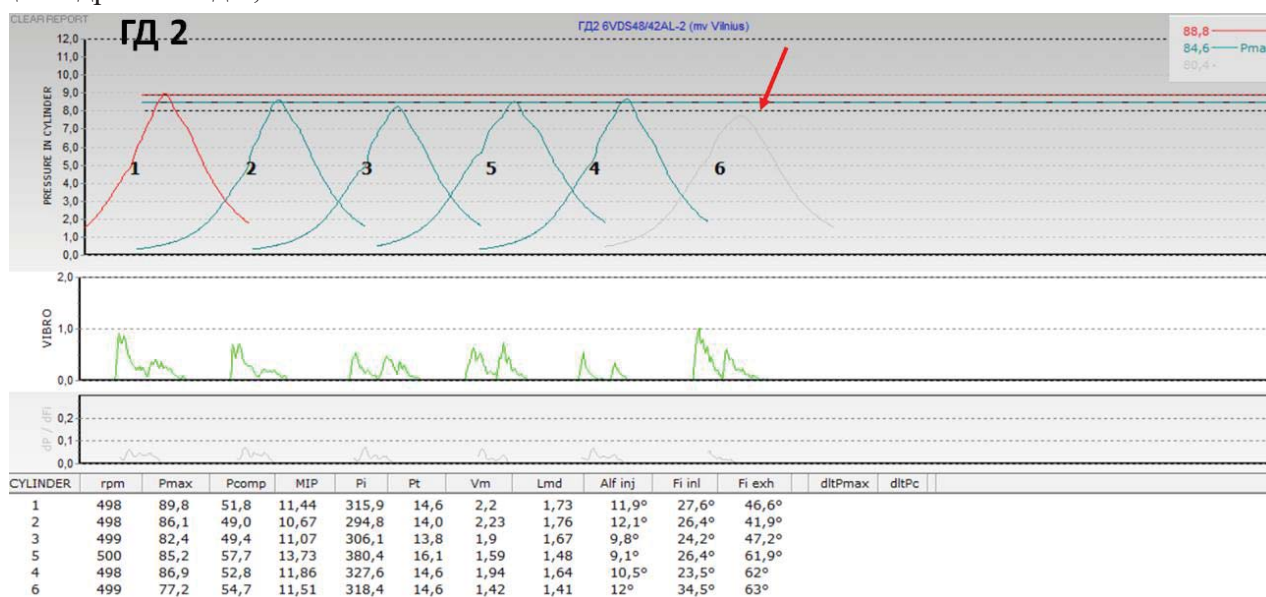


Рисунок 2 – Експериментальні дані діагностування головного двигуна SKL NVD48 (6VDS 48/42 AL-2) [9]

На підставі статистично оброблених результатів діагностичних вимірювань будуються уточнені навантажувальні характеристики головного двигуна – залежності питомої ефективної витрати палива  $SFC$  від ефективної потужності  $N_e$  та частоти обертання колінчастого вала  $n$ , що відображають фактичний технічний стан двигуна у конкретних умовах експлуатації. Такі характеристики суттєво відрізняються від паспортних заводських даних, оскільки враховують ступінь зношення та поточний технічний стан двигуна, режими часткового навантаження, характерні для річкового судноплавства, а також вплив якості застосовуваного палива й умов технічного обслуговування.

Отримані уточнені характеристики слугують вхідними даними для розрахунку показників енергоефективності на кожному з виділених етапів рейсу відповідно до методу трансформації, описаного далі.

**Основні результати та їх обговорення.** Для розрахунку показників енергоефективності суден внутрішнього плавання на кожному з виділених етапів рейсу у цій роботі проаналізовано два підходи, запропоновані в літературі, та обґрунтовано власний метод трансформації.

Метод, запропонований дослідницькою групою Белградського університету (*Kalajdžić, Momčilović* та ін.) [5, 6], ґрунтується на адаптації морського індексу  $EEDI$  до умов дунайського судноплавства та передбачає визначення двох показників – досяжного ( $Attained EEDI^*$ ) і нормованого ( $Required EEDI^*$ ) індексів енергоефективності.

Досяжний індекс розраховується за формулою:

$$EEDI^* = \frac{P_{Bref} \cdot SFC \cdot CF}{m_{DWT} \cdot v}, \quad (1)$$

де  $P_{Bref}$  – референсне значення потужності головного двигуна, необхідної для досягнення розрахункової швидкості  $v$ ;  $SFC$  – питома витрата палива;  $CF$  – конверсійний коефіцієнт  $CO_2$  для відповідного виду палива;  $m_{DWT}$  – дедвейт судна або каравану;  $v$  – швидкість судна відносно води.

За своєю структурою вираз (1) майже повністю відповідає формулі морського індексу  $EEDI$ , проте має суттєву відмінність у застосуванні: референсна потужність  $P_{Bref}$  не прив'язується до 75%  $MCR$ , як у підході  $IMO$ , а визначається як потужність, необхідна для досягнення розрахункової швидкості в конкретних навігаційних умовах. Метод застосовується для діапазонів швидкості  $v = 10 \dots 22$  км/год, числа Фруда по глибині  $Fr_H = 0,40 \dots 0,65$  та дедвейта  $m_{DWT} = 100 \dots 3000$  т.

Нормований індекс визначається за емпіричною залежністю:

$$EEDI_{Req}^* = a \cdot m_{DWT}^c, \quad (2)$$

де  $a$  і  $c$  – емпіричні коефіцієнти, що розраховуються окремо для умов глибокої води та мілководдя, залежать від типу суден і є функціями швидкості  $v$  (для глибокої води) або числа Фруда по глибині  $Fr_H$  (для умов мілководдя). В оригінальному тексті [5] використано запис “ $a \cdot m_{DWT}^c$ ”; у даному випадку запис переписаний як “ $a \cdot m_{DWT}^c$ ” для виключення двозначності. Відповідність судна вимогам енергоефективності встановлюється шляхом порівняння:  $EEDI^* \leq EEDI_{Req}^*$ .

Метод, розроблений Центром розвитку суднобудівних технологій і транспортних систем (*Development Centre for Ship Technology and Transport Systems*, Дуйсбург) на замовлення Федерального міністерства транспорту Німеччини та *CESNI* [4, 7], також передбачає визначення досяжного та нормованого індексів енергоефективності.

Досяжний індекс для суден внутрішнього плавання розраховується як:

$$EEDI_{IWT} = \frac{P_D \cdot SFC \cdot CF}{m_{DWT} \cdot v}, \quad (3)$$

де  $P_D$  – доставлена потужність головного двигуна, що розраховується окремо для умов глибокої води та мілководдя із застосуванням системи з 33 емпіричних коефіцієнтів; решта позначень відповідає прийнятим у (1).

Принципова відмінність від методу Белграда полягає у способі визначення потужності:  $P_D$  розраховується на основі тягових характеристик корпусу та гвинта для базового значення швидкості судна з подальшим перерахунком в умовах течії зі швидкістю  $v_t$ . Метод застосовується для суден з осадкою  $d = 2,0 \dots 3,2$  м (глибока вода) та  $d = 2,0 \dots 2,8$  м (мілководдя), довжиною  $L = 40 \dots 135$  м, шириною  $B = 5 \dots 17$  м, дедвейтом  $m_{DWT} = 250 \dots 6000$  т та швидкістю течії  $v_t = 2 \dots 8$  км/год. Метод охоплює чотири типи суден: самохідні суховантажні та контейнерні судна, танкери, штовхачі з несамохідними секціями та пасажирські судна.

Нормований індекс для методу  $DST$  визначається за залежністю:

$$EEDI_{Req} = \alpha_4 + \beta_2 \cdot \exp\left(\frac{m_{DWT}}{-\gamma_2}\right) + v_1 \cdot \exp\left(\frac{m_{DWT}}{-\delta_1}\right), \quad (4)$$

де  $\alpha_4$ ,  $\beta_2$ ,  $\gamma_2$ ,  $v_1$ ,  $\delta_1$  – емпіричні коефіцієнти, визначені окремо для кожного типу суден та навігаційної зони.

Слід зазначити, що в методі  $DST$  показники енергоефективності є функцією швидкості течії:  $EEDI_{IWT} = f(v_t)$ , що є його суттєвою перевагою порівняно з методом Університету Белграда, який течію не враховує. Водночас обмеження за осадкою, прив'язане до діаметра гребного гвинта як  $d = 1.5D_p$ , звужує практичну застосовність методу.

На відміну від розглянутих вище підходів, метод трансформації, запропонований авторами [8, 9], ґрунтується на принципово іншій концепції: замість використання усереднених або паспортних характеристик двигуна він передбачає отримання уточнених навантажувальних характеристик ДВЗ безпосередньо в умовах експлуатації на основі параметричного діагностування [10, 20, 21] та їх диференційоване застосування для кожного з виділених експлуатаційних етапів рейсу.

У загальному вигляді витрата палива за рейс є неперервним процесом, що описується інтегралом:

$$EEOI_{voyage} = \frac{CF}{m \cdot d_{total}} \int_0^T N_e(t) \cdot SFC(N_e(t), n(t)) dt, \quad (5)$$

де  $N_e(t)$  – миттєва ефективна потужність головного двигуна, як функція часу  $t$ ;  $SFC(N_e(t), n(t))$  – питома витрата палива як функція потужності та частоти обертання;  $T$  – тривалість рейсу;  $m$  – маса вантажу;  $d_{total}$  – відстань, на яку перевозиться вантаж (транспортна відстань), що може суттєво відрізнятись від фактичного шляху, пройденого самохідним судном з урахуванням маневрів, проводки частини каравану через перекати та павузок.

Оскільки рейс розбивається на скінченну кількість типових експлуатаційних етапів, кожен з яких характеризується статистично усередненими параметрами двигуна, отриманими за результатами параметричного діагностування, інтеграл (5) апроксимується дискретною сумою:

$$EEOI_{voyage} = \frac{CF}{m \cdot d_{total}} \sum_1^k N_{e_i} \cdot SFC_i(N_{e_i}, n_i) \cdot t_i, \quad (6)$$

де  $i$  – індекс експлуатаційного етапу рейсу;  $N_{e_i}$  – ефективна потужність головного двигуна на  $i$ -му етапі;  $SFC_i(N_{e_i}, n_i)$  – питома витрата палива на  $i$ -му етапі, визначена за уточненими характеристиками ДВЗ;  $t_i$  – тривалість  $i$ -го етапу;  $k$  – загальна кількість етапів рейсу;  $d_{total}$  – транспортна відстань (визначення наведено вище).

Окремої уваги заслуговує коректне визначення транспортної відстані  $d_{total}$  у знаменнику формули (6). На відміну від морського судноплавства, де відстань рейсу, як правило, збігається з відстанню перевезення вантажу, для суден внутрішнього плавання, особливо штовхачів з баржевими караванами, ці величини можуть суттєво різнитися [14]. Фактичний шлях, пройдений судном, включає маневри на перекатах з численними проводками, багаторазові переходи між перекатом і місцем стоянки каравану під час павузки, а також переміщення судна без вантажу у процесі розділення та збирання складу. В усіх цих випадках судно витрачає паливо і виконує роботу двигуна, не пов'язану з транспортуванням вантажу на відповідну відстань. Методи Белградського університету та *DST* не розрізняють ці складові, оперуючи єдиною «відстанню рейсу», що може призводити до систематичного заниження питомих показників енергоефективності для штовхачів з великими й структурно складними караванами. Метод трансформації явно розрізняє транспортну відстань  $d_{total}$  та фактичний шлях судна, що забезпечує коректнішу оцінку енергетичної ефективності транспортної роботи.

На відміну від методів Белградського університету та *DST*, які визначають пару показників *Attained / Required* і тим самим одразу вбудовані в регуляторну рамку, метод трансформації на першому етапі забезпечує отримання достовірного експлуатаційного показника (*Operational*). Це принципово важливо: достовірність нормованого показника (*Required*) безпосередньо залежить від точності досяжного (*Attained*), а існуючі методи використовують для його розрахунку усереднені характеристики двигуна, що може призводити до систематичних похибок. Метод трансформації усуває це джерело похибки, забезпечуючи надійну основу для подальшого нормування.

Результати порівняльного аналізу трьох розглянутих методів зведено у таблиці 1. Аналіз виконано за такими критеріями: тип показника енергоефективності, застосовність до різних типів суден та умов навігації, спосіб визначення характеристик ДВЗ, врахування течії

й транспортної відстані, наявність і обсяг емпіричних коефіцієнтів, а також обмеження кожного методу [4–7].

Таблиця 1 – Порівняння методів розрахунку індексів енергоефективності для суден внутрішнього плавання

<i>Критерій</i>	<i>Метод Університету Белграда</i>	<i>Метод DST</i>	<i>Метод трансформації</i>
<i>Тип показника</i>	<i>Attained / Required</i>	<i>Attained / Required</i>	<i>Operational (Attained)</i>
<i>Застосовність</i>	Поодинокі самохідні судна; каравани дедвейтом 100...3000 т	Поодинокі самохідні судна; каравани довжиною до 135 м, шириною до 17 м	Поодинокі самохідні судна; каравани, в т. ч. великі; підтверджено для самохідного судна з караваном з 5 барж
<i>Навігаційні умови</i>	Глибока вода та мілководдя	Глибока вода та мілководдя	Глибока вода, мілководдя, переكاتи, проводка частини каравану
<i>Врахування течії</i>	Не враховується	Враховується	Враховується
<i>Характеристики ДВЗ</i>	Усереднені / паспортні значення <i>SFC</i>	Усереднені / паспортні значення <i>SFC</i>	Уточнені характеристики <i>SFC</i> , отримані за результатами параметричної діагностики в реальних умовах експлуатації
<i>Залежність «швидкість – потужність»</i>	Використовується	Не використовується (базове значення швидкості з перерахунком)	Використовується для кожного етапу рейсу
<i>Транспортна відстань</i>	Не розрізняється від фактичного шляху судна	Не розрізняється від фактичного шляху судна	Явно розрізняється: $d_{total}$ – відстань перевезення вантажу
<i>Врахування допоміжних механізмів</i>	Не передбачено	Не передбачено	Передбачено (зупинки, маневрування)
<i>Використання даних RIS</i>	Не передбачено	Не передбачено	Передбачено
<i>Емпіричні коефіцієнти</i>	Присутні; розраховані для одного значення глибини фарватеру (5 м)	Присутні у великій кількості (33); вузького застосування	Не потребує емпіричних коефіцієнтів вузького застосування
<i>Обмеження</i>	Не враховує течію; емпіричні коефіцієнти розраховані для обмежених умов	Одне базове значення осадки ( $d = 1,5D_p$ ); одне базове значення швидкості	Потребує верифікації на розширеній вибірці суден та типів каравану

Як видно з таблиці, методи Університету Белграда та *DST* мають спільну концептуальну основу – адаптацію морського індексу *EEDI* до умов річкового судноплавства – і обидва оперують парою показників *Attained / Required*. Проте вони суттєво різняться в підходах до визначення потужності двигуна та врахування навігаційних умов.

Метод Університету Белграда охоплює ширший діапазон швидкостей та не потребує великої кількості емпіричних коефіцієнтів для розрахунку потужності, проте не враховує швидкість течії. Метод *DST* враховує течію та охоплює ширший спектр типів суден, але обмежений одним базовим значенням осадки та швидкості, що звужує його практичну застосовність для реальних умов дунайського судноплавства.

Спільним і принциповим недоліком обох існуючих методів є використання усереднених або паспортних значень *SFC*, які не відображають фактичного технічного стану двигуна у конкретних умовах експлуатації. Оскільки *SFC* входить у чисельник розрахункової формули безпосередньо, будь-яке відхилення між паспортним і реальним значенням питомої витрати палива призводить до систематичної похибки у визначенні *Attained EEDI* – а отже, і у висновках щодо відповідності судна нормованому показнику.

Запропонований авторами метод трансформації усуває цей недолік шляхом інтеграції результатів параметричного діагностування ДВЗ у розрахунок показника енергоефективності. Додатковими перевагами методу є: поетапний аналіз рейсу, що дозволяє коректно врахувати всі характерні режими роботи двигуна; явне розрізнення транспортної відстані та фактичного шляху судна; врахування роботи допоміжних механізмів під час зупинок і маневрування; можливість використання даних Річкових інформаційних систем (*RIS*). Водночас метод потребує верифікації на розширеній вибірці суден і типів каравану, що визначає напрям подальших досліджень.

**Висновки.** Переважна більшість суден, що здійснюють перевезення на внутрішніх водних шляхах Європи – і зокрема на Дунаї, де основу флоту становлять самохідні вантажні судна та штовхачі з баржевими караванами – й надалі рухається за рахунок двигунів внутрішнього згоряння, що працюють на викопному паливі. За відсутності реальних перспектив масового переходу на альтернативні види тяги у найближчій перспективі достовірне оцінювання енергоефективності таких суден набуває першочергового практичного та регуляторного значення.

Порівняльний аналіз двох відомих методів розрахунку індексів енергоефективності – методу Белградського університету [5, 6] та методу *DST* [4, 7] – показав, що обидва ґрунтуються на адаптації морського індексу *EEDI* до умов річкового судноплавства й оперують парою показників *Attained / Required*. Водночас вони мають суттєві спільні обмеження: використання усереднених або паспортних значень питомої витрати палива, які не відображають фактичного технічного стану двигуна в експлуатації; відсутність поетапного аналізу рейсу з урахуванням характерних режимів роботи силової установки; а також відсутність явного розрізнення між транспортною відстанню та фактичним шляхом судна, що є особливо критичним для штовхачів з великими баржевими складами в умовах дунайського судноплавства. Додатково, метод Белградського університету не враховує швидкість течії, а метод *DST* обмежений вузьким діапазоном осадки та одним базовим значенням швидкості судна.

Запропонований авторами метод трансформації [8, 9] усуває зазначені недоліки шляхом інтеграції результатів параметричного діагностування ДВЗ – індикаторної діагностики та вібродіагностики [10, 20, 21] – у розрахунок показника енергоефективності. Метод передбачає поетапний аналіз рейсу з диференційованим застосуванням уточнених навантажувальних характеристик двигуна для кожного експлуатаційного етапу: руху на глибокій воді, проходження мілководних ділянок, маневрування на перекатах і проводки частини каравану. Транспортна відстань  $d_{total}$  визначається як відстань, на яку фактично перевозиться вантаж, що забезпечує коректне оцінювання питомої енергоефективності виконаної транспортної роботи.

Наукова новизна дослідження полягає в тому, що вперше запропоновано методологічний підхід, який поєднує параметричне діагностування судового ДВЗ із поетапним аналізом рейсу для отримання достовірного експлуатаційного показника енергоефективності суден внутрішнього плавання. На відміну від існуючих методів, які одразу вбудовані в регуляторну рамку *Attained / Required*, метод трансформації забезпечує

надійну діагностичну основу, без якої будь-яке нормування залишається методологічно вразливим.

**Перспективи подальших досліджень.** Результати дослідження верифіковано для самохідного судна з караваном із 5 барж в умовах дунайського судноплавства. Подальші дослідження мають бути спрямовані на верифікацію методу на розширеній вибірці суден різних типів і конфігурацій каравану, а також на розроблення на його основі нормованого показника (*Required*), придатного для застосування в регуляторній практиці дунайського судноплавства.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Guesnet G., Deußner R., Kirchmayr R., Novak R., Strasser C., Ваčkalov I., Hofman M., Simić A. Innovative Danube Vessel: Main project results. DST – Development Centre for Ship Technology and Transport Systems, 2013. URL: <https://www.dst-org.de> (дата звернення: 10.02.2026).
2. PROMINENT – Promoting innovation in the inland waterways transport sector : project information note / STC-Group. 2018. URL: <https://www.waterborne.eu/projects/inland-navigation/prominent> (дата звернення: 11.01.2026).
3. De Vlioger I., Panis L. I., Joul H., Cornelis E. Fuel consumption and CO<sub>2</sub>-rates for inland vessels. *WIT Transactions on the Built Environment*. 2004. Vol. 75. P. 637–646. <https://doi.org/https://doi.org/10.2495/UT040621>.
4. Evaluating the energy requirement of inland vessels using energy efficiency indices / CESNI/PT. 2021. URL: [https://www.cesni.eu/wp-content/uploads/2021/03/cesnipt\\_energyindex\\_en.pdf](https://www.cesni.eu/wp-content/uploads/2021/03/cesnipt_energyindex_en.pdf) (дата звернення: 09.10.2025).
5. Kalajdžić M., Vasilev M., Momčilović N. Evaluating an inland waterway cargo vessel's energy efficiency indices. *Polish Maritime Research*. 2022. Vol. 29, no. 2. P. 27–34. <https://doi.org/https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0014>.
6. Kalajdžić M., Vasilev M., Momčilović N. Inland waterway cargo vessel energy efficiency in operation. *Brodogradnja*. 2023. Vol. 74, no. 3. P. 71–89. <https://doi.org/https://doi.org/10.21278/brod74304>.
7. Guesnet T. *Energy efficiency of inland water ships in the European Union Strategy for the Danube Region* [Conference presentation] 4th Meeting of the Steering Group, EUSDR PA1a, Vienna, Austria., 21 November 2013. URL: [https://navigation.danube-region.eu/content/uploads/sites/10/2020/01/2013-11-21\\_EUSDR\\_PA1A\\_SG\\_CO2\\_emissions\\_DST.pdf](https://navigation.danube-region.eu/content/uploads/sites/10/2020/01/2013-11-21_EUSDR_PA1A_SG_CO2_emissions_DST.pdf).
8. Tarasenko T., Zalozh V., Maksymov S. The ways to improve energy efficiency and eco-friendliness of the specific Danube inland vessels: First stage. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1297, no. 1. Article 012019. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1742-6596/1297/1/012019>.
9. Tarasenko T., Zalozh V., Varbanets R., Minchev D. Considerations regarding reducing Danube navigation emissions. *Scientific Bulletin of Naval Academy*. 2021. Vol. 24, no. 1. P. 174–183. <https://doi.org/https://doi.org/10.21279/1454-864X-21-I1-021>.
10. Varbanets R., Minchev D., Kucherenko Y., Zalozh V., Kyrylash O., Tarasenko T. Methods of real-time parametric diagnostics for marine diesel engines. *Polish Maritime Research*. 2024. Vol. 31, no. 3. P. 71–84. <https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0037>.
11. Mannheim Declaration "150 years of the Mannheim Act for Rhine Navigation" / Central Commission for the Navigation of the Rhine. 2018. URL: <https://www.ccr-zkr.org> (дата звернення: 18.03.2025).
12. CCNR roadmap for reducing inland navigation emissions / Central Commission for the Navigation of the Rhine. 2018. URL: <https://www.ccr-zkr.org/12090000-en.html> (дата звернення: 10.01.2026).

13. NAIADES III: An inland waterway transport action plan for 2021–2027 / European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport. 2021. URL: <https://transport.ec.europa.eu> (дата звернення: 18.01.2026).
14. Manual on Danube navigation / viadonau. 2023. URL: [https://www.viadonau.org/fileadmin/user\\_upload/Manual\\_on\\_Danube\\_Navigation.pdf](https://www.viadonau.org/fileadmin/user_upload/Manual_on_Danube_Navigation.pdf) (дата звернення: 19.04.2026).
15. Market observation for Danube navigation: Results in 2024 / Danube Commission. 2025. URL: <https://www.danubecommission.org/dc/en/danube-navigation/market-observation-for-danube-navigation/market-observation-for-danube-navigation-results-in-2024/> (дата звернення: 20.01.2026).
16. Statistical yearbook 2022 / Danube Commission. 2025. URL: [https://www.Danubecommission.org/uploads/doc/2025/Stat\\_2022/en\\_stat\\_2022.pdf](https://www.Danubecommission.org/uploads/doc/2025/Stat_2022/en_stat_2022.pdf) (дата звернення: 17.01.2026).
17. Van der Linden E. Study on alternative propulsion on the Danube / Aristoi, viadonau. 2024. URL: [https://www.viadonau.org/fileadmin/content/20241128\\_Aristoi\\_Study\\_Viadonau\\_final.pdf](https://www.viadonau.org/fileadmin/content/20241128_Aristoi_Study_Viadonau_final.pdf) (дата звернення: 19.04.2026).
18. Zhang C. Energy performance and manoeuvring modelling of inland waterway vessels : doctoral thesis / Chalmers University of Technology. Gothenburg, 2023. URL: [https://research.chalmers.se/publication/539162/file/539162\\_Fulltext.pdf](https://research.chalmers.se/publication/539162/file/539162_Fulltext.pdf) (дата звернення: 11.02.2026).
19. Zhang C., Ringsberg J. W., Thies F. Development of a ship performance model for power estimation of inland waterway vessels. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 287. Article 115731. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115731>.
20. Варбанець Р. А., Мінчев Д. С., Кучеренко Ю. М., Залож В. І. Параметрична діагностика суднових дизельних двигунів в режимі реального часу. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2024. Вип. 1 (2024). С. 69–75. <https://doi.org/https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.09>.
21. Залож В. І., Варбанець Р. А., Мінчев Д. С. Аналіз циклової нерівномірності для суднових дизельних двигунів в режимі реального часу. *Водний транспорт : збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. 2025. Вип. 1 (42). С. 37–45. <https://doi.org/https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.06>.
22. Суворов П. С., Тарасенко Т. В., Залож В. І. Деякі питання оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу у внутрішньому судноплаванні. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2023. Вип. 2 (2023). С. 37–45. <https://doi.org/https://doi.org/10.20998/0419-8719.2023.2.05>.

## REFERENCES

1. Guesnet, G., Deußner, R., Kirchmayr, R., Novak, R., Strasser, C., Vačkalov, I., Hofman, M., & Simić, A. (2013). *Innovative Danube Vessel: Main project results*. DST – Development Centre for Ship Technology and Transport Systems. <https://www.dst-org.de>.
2. STC-Group. (2018). *PROMINENT – Promoting innovation in the inland waterways transport sector: Project information note*. <https://www.waterborne.eu/projects/inland-navigation/prominent>.
3. De Vlieger, I., Panis, L. I., Joul, H., & Cornelis, E. (2004). Fuel consumption and CO<sub>2</sub>-rates for inland vessels. *WIT Transactions on the Built Environment*, 75, 637–646. <https://doi.org/10.2495/UT040621>.
4. CESNI/PT. (2021). *Evaluating the energy requirement of inland vessels using energy efficiency indices*. CESNI. [https://www.cesni.eu/wp-content/uploads/2021/03/cesnipt\\_energyindex\\_en.pdf](https://www.cesni.eu/wp-content/uploads/2021/03/cesnipt_energyindex_en.pdf).
5. Kalajdžić, M., Vasilev, M., & Momčilović, N. (2022). Evaluating an inland waterway cargo vessel's energy efficiency indices. *Polish Maritime Research*, 29(2), 27–34. <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0014>.
6. Kalajdžić, M., Vasilev, M., & Momčilović, N. (2023). Inland waterway cargo vessel energy efficiency in operation. *Brodogradnja*, 74(3), 71–89. <https://doi.org/10.21278/brod74304>.

7. Guesnet, T. (2013, November 21). *Energy efficiency of inland water ships in the European Union Strategy for the Danube Region* [Conference presentation]. 4th Meeting of the Steering Group, EUSDR PA1a, Vienna, Austria. [https://navigation.danube-region.eu/content/uploads/sites/10/2020/01/2013-11-21\\_EUSDR\\_PA1A\\_SG\\_CO2\\_emissions\\_DST.pdf](https://navigation.danube-region.eu/content/uploads/sites/10/2020/01/2013-11-21_EUSDR_PA1A_SG_CO2_emissions_DST.pdf).
8. Tarasenko, T., Zalozh, V., & Maksymov, S. (2019). The ways to improve energy efficiency and eco-friendliness of the specific Danube inland vessels: First stage. *Journal of Physics: Conference Series*, 1297(1), Article 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1297/1/012019>.
9. Tarasenko, T., Zalozh, V., Varbanets, R., & Minchev, D. (2021). Considerations regarding reducing Danube navigation emissions. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, 24(1), 174–183. <https://doi.org/10.21279/1454-864X-21-I1-021>.
10. Varbanets, R., Minchev, D., Kucherenko, Y., Zalozh, V., Kyrylash, O., & Tarasenko, T. (2024). Methods of real-time parametric diagnostics for marine diesel engines. *Polish Maritime Research*, 31(3), 71–84. <https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0037>.
11. CCNR (2018). *Mannheim Declaration "150 years of the Mannheim Act for Rhine Navigation"*. Central Commission for the Navigation of the Rhine. <https://www.ccr-zkr.org>.
12. CCNR (2018). *CCNR roadmap for reducing inland navigation emissions*. Central Commission for the Navigation of the Rhine. <https://www.ccr-zkr.org/12090000-en.html>.
13. European Commission. (2021). *NAIADES III: An inland waterway transport action plan for 2021–2027*. Directorate-General for Mobility and Transport. <https://transport.ec.europa.eu>.
14. Viadonau (2023). *Manual on Danube navigation*. [https://www.viadonau.org/fileadmin/user\\_upload/Manual\\_on\\_Danube\\_Navigation.pdf](https://www.viadonau.org/fileadmin/user_upload/Manual_on_Danube_Navigation.pdf).
15. Danube Commission (2025). *Market observation for Danube navigation: Results in 2024*. <https://www.danubecommission.org/dc/en/danube-navigation/market-observation-for-danube-navigation/market-observation-for-danube-navigation-results-in-2024/>.
16. Danube Commission (2025). *Statistical yearbook 2022*. [https://www.danubecommission.org/uploads/doc/2025/Stat\\_2022/en\\_stat\\_2022.pdf](https://www.danubecommission.org/uploads/doc/2025/Stat_2022/en_stat_2022.pdf).
17. Van der Linden, E. (2024). *Study on alternative propulsion on the Danube*. Aristoi / viadonau. [https://www.viadonau.org/fileadmin/content/20241128\\_Aristoi\\_Study\\_Viadonau\\_final.pdf](https://www.viadonau.org/fileadmin/content/20241128_Aristoi_Study_Viadonau_final.pdf).
18. Zhang, C. (2023). *Energy performance and manoeuvring modelling of inland waterway vessels* [Doctoral thesis, Chalmers University of Technology]. [https://research.chalmers.se/publication/539162/file/539162\\_Fulltext.pdf](https://research.chalmers.se/publication/539162/file/539162_Fulltext.pdf).
19. Zhang, C., Ringsberg, J. W., & Thies, F. (2023). Development of a ship performance model for power estimation of inland waterway vessels. *Ocean Engineering*, 287, Article 115731. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115731>.
20. Varbanets, R. A., Minchev, D. S., Kucherenko, Yu. M., & Zalozh, V. I. (2024). Real-time parametric diagnostics of marine diesel engines. *Internal Combustion Engines*, 1(2024), 69–75. <https://doi.org/https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.09>.
21. Zalozh, V. I., Varbanets, R. A., & Minchev, D. S. (2025). Real-time analysis of cycle-to-cycle variations for marine diesel engines. *Water Transport: Proceedings of State University of Infrastructure and Technologies*, 1(42), 37–45. <https://doi.org/https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.06>.
22. Suvorov, P. S., Tarasenko, T. V., Zalozh, V. I. (2023). Some issues of vessels energy efficiency assessment in the inland shipping energy transition conditions. *Internal Combustion Engines*, 2(2023), 37–45. <https://doi.org/https://doi.org/https://doi.org/10.20998/0419-8719.2023.2.05>.

**Tarasenko T. V., Zalozh V. I. ENERGY EFFICIENCY ASSESSMENT OF INLAND VESSELS VIA OPERATIONAL PARAMETERS OF MARINE ENGINES**

*The study addresses the assessment of energy efficiency of inland vessels in service, with main engine operational parameters as the physical basis for the calculation. The research targets self-propelled cargo vessels and push-tow convoys of the Danube inland waterway system, where the operational regulatory framework remains incomplete. The objective is to substantiate a diagnostics-informed assessment method and compare it with two established approaches – the University of Belgrade method and the DST (Duisburg) method – both derived from the maritime EEDI. The methodology combines parametric diagnostics of the main internal combustion engine under real operating conditions with phase-by-phase voyage decomposition covering deep-water navigation, shallow-water passage, shoal manoeuvring, and split-convoy operations. For each phase, refined engine load characteristics – specific fuel consumption as a function of effective power and shaft speed – are obtained from in-cylinder indication and vibration diagnostics with statistical processing. The scientific novelty consists in the first-time integration of parametric diagnostics results into energy efficiency calculation for inland vessels, together with an explicit distinction between transport distance and actual vessel track – a distinction ignored by existing methods and particularly consequential for large Danube convoys. The approach yields a reliable operational (Attained) indicator that eliminates the systematic error introduced by averaged nameplate SFC values. Practical applications include in-service monitoring, CESNI-aligned regulatory reporting, and retrofit decision support. The method has been verified for a self-propelled vessel with a five-barge convoy under Danube conditions.*

**Key words:** inland waterway transport; energy efficiency; Danube navigation; marine diesel engine; parametric diagnostics; engine working process; specific fuel consumption; EEDI; operational indicator; push-tow convoy.

© Тарасенко Т. В., Залож В. І.

Статтю прийнято до редакції 20.04.2026