

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»
ДУНАЙСЬКИЙ ІНСТИТУТ НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ТАРАСЕНКО ТЕТЯНА ВЛАДИСЛАВІВНА

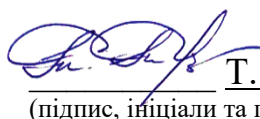
УДК 656.6-042.5/.8:502/504

ДИСЕРТАЦІЯ
РОЗРОБКА СПОСОБУ ОЦІНКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РУХУ
СУДЕН У ВНУТРІШНЬОМУ СУДНОПЛАВСТВІ

Спеціальність 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту
Галузь знань 27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

 Т. В. ТАРАСЕНКО
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Самостійно підготовлена наукова праця

Одеса – 2026

АНОТАЦІЯ

Тарасенко Т. В. Розробка способу оцінки енергоефективності руху суден у внутрішньому судноплавстві. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту. – Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», Ізмаїл, 2026.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу – розроблено науково обґрунтований спосіб оцінки енергоефективності руху суден внутрішнього судноплавства (самохідних суден та штовхачів з караванами несамохідних барж) у змінних навігаційних та експлуатаційних умовах, придатний для управління енергоефективністю флоту та гармонізований з регуляторними вимогами ЄС. Актуальність теми зумовлена визнанням внутрішнього водного транспорту одним із ключових елементів стратегії декарбонізації, посиленням екологічних і регуляторних вимог ЄС до суден внутрішнього плавання, переходом від конструктивно-технічної до експлуатаційної оптимізації та цифровізацією управління флотом, для яких традиційні показники на основі лише витрати дизельного палива виявляються недостатніми, а наявні індекси типу $EEDI$, $EEXI$, $EEOI$, $EEDI_{Binnen}$ – непридатними до специфіки дунайських караванів зі змінним складом і суттєвим впливом гідрологічних умов.

Мета дисертаційної роботи – розробити науково обґрунтований спосіб оцінки енергоефективності руху суден внутрішнього судноплавства (самохідних суден і штовхачів з караванами несамохідних барж) у змінних навігаційних та експлуатаційних умовах, придатний для використання в задачах управління енергоефективністю флоту та гармонізованого з регуляторними вимогами ЄС.

Об'єктом дослідження є процес руху та експлуатації суден внутрішнього судноплавства – самохідних суден (окремо та у складі караванів) і штовхачів з караванами несамохідних барж у системі дунайського судноплавства.

Предметом дослідження є параметри та взаємозв'язки, що визначають енергоефективність руху суден внутрішнього судноплавства – самохідних суден (як поодиноких, так і у складі караванів), а також штовхачів з караванами несамохідних барж на різних ділянках Дунаю (швидкість, завантаження, конфігурація каравану, глибина, течія, режими роботи суднової пропульсивної установки тощо) – та спосіб її оцінки для цілей експлуатаційної оптимізації та подальшого нормування.

Методологічну основу роботи становить комплекс загальнонаукових і спеціальних методів: аналіз, систематизація та класифікація – для огляду регуляторних документів і впорядкування показників; системний аналіз і декомпозиція рейсу за етапами – для дослідження факторів енергоефективності; математичне моделювання й дискретизація інтегральних показників, гідродинамічний аналіз опору та потрібної потужності, параметрична діагностика робочого процесу суднових двигунів (аналітична синхронізація), імовірнісне моделювання методом Монте-Карло з аналізом чутливості за коефіцієнтами рангової кореляції Спірмена, авторегресійне моделювання (AR(1)) рядів рівнів води, кореляційний та ієрархічний кластерний аналіз (UPGMA) і регресійний аналіз – для побудови способу та його перевірки. Обробку відкритих гідрологічних даних Дунайської Комісії (добові рівні води за 2005–2020 рр.) виконано власним програмним парсером мовою *Python*, програмну реалізацію способу – у середовищі *MS Excel*.

У **першому розділі** систематизовано наявні підходи до оцінки енергоефективності суден у три групи (нормативно-конструктивні індекси, операційні індекси фактичної енергоефективності, методи гідродинамічного моделювання), показано їх непридатність до нормованої та порівнянної оцінки дунайських караванів, сформульовано систему з шести вимог до нового способу оцінки, а також складено технологічну карту дослідження за методологією

професора І. І. Кринецького, визначені головні та допоміжні задачі, визначені критерії оцінки отриманих результатів. У **другому розділі** проаналізовано навігаційно-експлуатаційні умови судноплавного Дунаю від Кельхайму до Чорного моря, встановлено, що варіабельність рівнів води змінює операційний показник енергоефективності одного й того самого судна на 40–60 %, виконано декомпозицію рейсу за чотирма якісно різними етапами (рух у повному складі каравану, проводка, маневрування, шлюзування) та побудовано концептуальну модель, що відокремлює вплив завантаження, гідрології й режимів роботи головної енергетичної установки. У **третьому розділі** розроблено інтегральну математичну модель і спосіб оцінки на основі нормованого показника з гідрологічним нормуванням транспортної роботи через коефіцієнт мілководного опору k_H , її дискретне наближення за ділянками рейсу, імовірнісне та прогностичне розширення; за результатами аналізу 265 798 добових записів рівнів води по 71 водомірному посту встановлено зростання коефіцієнта авторегресії φ від 0,90 на верхньому до 0,99 на нижньому Дунаї, горизонт корисного прогнозу 6–8 діб (узгоджений з типовою тривалістю рейсу) та кластерну кореляційну структуру постів з природним статистичним бар'єром на гідровузлах «Залізні ворота». У **четвертому розділі** сформовано замкнену систему показників, формалізовано спосіб і алгоритми обґрунтування експлуатаційних рішень, реалізовано інструмент підтримки прийняття рішень на основі електронних таблиць та виконано детерміновану апробацію на масиві з 14 реальних рейсів ПрАТ «Українське Дунайське пароплавство» (116 сегментів). У **п'ятому розділі** виконано прогностичне розширення та комплексну перевірку способу: на узагальненому транзитному рейсі Ізмаїл–Регенсбург перехід від кліматологічного до прогнозного режиму звужує 95-відсотковий імовірнісний інтервал приблизно на 22 %; глибина фарватеру (0,52) і швидкість руху (0,32) разом пояснюють понад 83 % мінливості показника; спосіб поширено на пасажирський круїзний теплохід *m/v Lisabelle* через перевизначення транспортної роботи в пасажиро-кілометрах.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в такому.

Уперше: розроблено спосіб оцінки енергоефективності руху суден внутрішнього судноплавства, що ґрунтується на показнику типу $EEOI$ та адаптує його для врахування змінних мілководних умов руху караванів шляхом гідрологічного нормування транспортної роботи через коефіцієнт мілководного опору k_H і, на відміну від орієнтованих на морські судна та стаціонарні умови індексів $EEDI$, $EEXI$, $EEOI$, $EEDI_{Binnen}$, забезпечує нормовану й порівнянну оцінку рейсів за змінного складу каравану та змінних гідрологічних умов Дунаю; запропоновано посегментно-дискретну форму показника з урахуванням режиму проводок множителем $(2N - 1)$, що усуває математичну невизначеність показника $EEOI$ при нульовій транспортній роботі на окремих етапах рейсу; побудовано імовірнісно-прогностичне розширення, яке поєднує Монте-Карло симуляцію рейсу з авторегресійним прогнозом (AR(1)) рівнів води та перетворює показник на випадкову величину з визначеними розподілом, імовірнісним інтервалом і ймовірністю перевищення цільового рівня (звуження інтервалу прогнозу приблизно на 22 %); розроблено систему алгоритмів обґрунтування експлуатаційних рішень із чотирма класами типових рішень та явними кількісними критеріями активації, інтегровану з параметричною діагностикою головних двигунів.

Удосконалено: модель гідродинамічного опору й потрібної потужності руху штовхача з караваном – введенням модифікованого формфактора мілководдя $1 + k^*$ та виокремленням пропульсивного ККД як самостійної стохастичної компоненти (коефіцієнт варіації близько 5 %);

Набули подальшого розвитку: теоретичні уявлення про енергоефективність руху суден внутрішнього судноплавства – через урахування спільного впливу складу каравану, гідрологічних умов і профілю режимів роботи установки, а також статистичну характеристику гідрологічного режиму Дунаю; метод параметричної діагностики робочого процесу судових двигунів (аналітична синхронізація) – поширенням його на опосередковане визначення ефективної потужності та діагностику технічного стану за відносним показником δSFC за умов, коли пряме вимірювання опору й потужності на

штовхачах неможливе; спосіб оцінки в частині поширення за межі вантажного сегмента – адаптацією показника до пасажирських суден через перевизначення транспортної роботи в пасажиро-кілометрах (показник $EE_{рах}$) та застосуванням до кількісної оцінки ефекту модального зсуву.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що розроблений спосіб і його програмна реалізація доведені до рівня інструмента, придатного для безпосереднього використання в експлуатаційній і управлінській практиці підприємств внутрішнього водного транспорту. Спосіб дозволяє: здійснювати оперативну оцінку та порівняльний аналіз енергоефективності рейсів за змінного складу каравану й гідрологічних умов і виявляти резерви зниження витрати палива (14,5–16,3 %, або 32–36 т палива та 100–112 т CO₂ на проаналізованому масиві) без втручання в конструкцію енергетичної установки; обґрунтовувати пріоритетність проєктів модернізації установок і переведення суден на альтернативні палива; кількісно оцінювати кліматичний ефект модального зсуву – переведення вантажопотоків з автомобільного транспорту на внутрішні водні шляхи, зокрема на Дунай, із перевезенням вантажів великовантажними караванами: на умовну одиницю транспортної роботи 1 млн т·км таке переведення дає скорочення викидів приблизно на 127 т CO₂-екв і є приблизно у 14 разів «чистішим» за повним паливним циклом; формувати корпоративні стандарти та брати участь у системах нормування й звітності щодо вуглецевої інтенсивності флоту відповідно до регуляторного контексту ЄС. Результати впроваджено в діяльності Дунайської Комісії (при підготовці Додатка 5 до Дорожньої карти декарбонізації дунайського флоту), у практику ПрАТ «Українське Дунайське пароплавство» (зокрема на т/х «Механик Синилов»), при апробації на пасажирському теплоході *m/v Lisabelle*, а також у навчальний процес кафедри інженерних дисциплін Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія» (м. Ізмаїл).

Основні результати дисертації опубліковано у 71 праці, у тому числі 23 наукових статтях у фахових виданнях України та інших держав (з них 4 – у

виданнях наукометричної бази *Scopus*) і 48 тезах доповідей міжнародних конференцій.

Ключові слова: енергоефективність, внутрішнє судноплавство, штовхач, караван несамохідних барж, Дунай, гідрологічне нормування, коефіцієнт мілководного опору, питома витрата палива, параметрична діагностика, метод Монте-Карло, авторегресійне прогнозування, вуглецева інтенсивність, модальний зсув.

ABSTRACT

Tarasenko T. V. Development of a Method for Assessing the Energy Efficiency of Vessel Movement in Inland Navigation. – Qualifying scientific manuscript.

Dissertation for the Doctoral Degree in Technical Sciences, specialty 05.22.20 – Operation and Repair of Means of Transport. – Danube Institute of National University «Odessa Maritime Academy», Odesa, 2026.

The dissertation solves a relevant scientific and applied problem – it develops a scientifically grounded method for assessing the energy efficiency of the movement of inland navigation vessels (self-propelled vessels and pushers with convoys of non-self-propelled barges) under variable navigational and operational conditions, suitable for fleet energy-efficiency management and harmonized with the regulatory requirements of the EU. The relevance of the topic stems from the recognition of inland waterway transport as one of the key elements of the decarbonization strategy, from the tightening of the EU's environmental and regulatory requirements for inland navigation vessels, from the transition from design-and-technical to operational optimization, and from the digitalization of fleet management, for which conventional indicators based solely on diesel fuel consumption prove insufficient, while the existing indices of the *EEDI*, *EEXI*, *EEOI*, *EEDI_{Binnen}* type are unsuitable for the specifics of Danube convoys with variable composition and a substantial influence of hydrological conditions.

The aim of the dissertation is to develop a scientifically grounded method for assessing the energy efficiency of the movement of inland navigation vessels (self-propelled vessels and pushers with convoys of non-self-propelled barges) under variable navigational and operational conditions, suitable for use in fleet energy-efficiency management tasks and harmonized with the regulatory requirements of the EU.

The object of the research is the process of movement and operation of inland navigation vessels – self-propelled vessels (individually and as part of convoys) and pushers with convoys of non-self-propelled barges within the Danube navigation system. **The subject of the research** comprises the parameters and relationships that determine the energy efficiency of the movement of such vessels on various reaches of the Danube (speed, loading, convoy configuration, depth, current, operating modes of the ship's propulsion plant) and the method of its assessment for the purposes of operational optimization and subsequent normalization.

The methodological basis of the work is a set of general scientific and special methods: analysis, systematization and classification – for reviewing regulatory documents and ordering energy-efficiency indicators; systems analysis and decomposition of the voyage into stages – for studying energy-efficiency factors; mathematical modeling and discretization of integral indicators, hydrodynamic analysis of resistance and required power, parametric diagnostics of the working process of marine engines (analytical synchronization), probabilistic modeling by the Monte Carlo method with sensitivity analysis based on Spearman rank correlation coefficients, autoregressive (AR(1)) modeling of water-level series, correlation and hierarchical cluster analysis (UPGMA), and regression analysis – for constructing the method and verifying it. The processing of the Danube Commission's open hydrological data (daily water levels for 2005–2020) was carried out using a proprietary software parser written in Python, and the software implementation of the method – in the MS Excel environment.

In the **first chapter**, the existing approaches to assessing vessel energy efficiency are systematized into three groups (normative-design indices, operational

indices of actual energy efficiency, and hydrodynamic modeling methods), their unsuitability for a normalized and comparable assessment of Danube convoys is demonstrated, and a system of six requirements for a new assessment method is formulated. In the **second chapter**, the navigational and operational conditions of the navigable Danube from Kelheim to the Black Sea are analyzed; it is established that the variability of water levels changes the operational energy-efficiency indicator of one and the same vessel by 40–60 %; the voyage is decomposed into four qualitatively distinct stages (movement in the full convoy, lightering, maneuvering, and lock transit), and a conceptual model is built that separates the influence of loading, hydrology, and engine operating modes. In the **third chapter**, an integral mathematical model and a method of assessment are developed on the basis of a normalized indicator with hydrological normalization of transport work through the shallow-water resistance coefficient kH , together with its discrete approximation by voyage reaches and its probabilistic and prognostic extensions; based on the analysis of 265,798 daily water-level records from 71 gauging stations, an increase in the autoregression coefficient φ from 0.90 on the upper to 0.99 on the lower Danube is established, a useful forecast horizon of 6–8 days (consistent with the typical voyage duration), and a cluster correlation structure of the stations with a natural statistical barrier at the Iron Gates hydro-scheme. In the **fourth chapter**, a closed system of indicators is formed, the method and the algorithms for substantiating operational decisions are formalized, a decision-support tool based on spreadsheets is implemented, and a deterministic validation is carried out on an array of 14 real voyages of PJSC "Ukrainian Danube Shipping Company" (116 segments). In the **fifth chapter**, the prognostic extension and a comprehensive verification of the method are performed: for a generalized transit voyage Izmail–Regensburg, the transition from the climatological to the prognostic mode narrows the 95 % probability interval by approximately 22 %; fairway depth (0.52) and speed (0.32) together explain more than 83 % of the indicator's variability; and the method is extended to the passenger cruise vessel m/v Lisabelle by redefining transport work in passenger-kilometers.

The scientific novelty of the results obtained consists in the following.

For the first time: a method for assessing the energy efficiency of the movement of inland navigation vessels has been developed that is based on an *EEOI*-type indicator and adapts it to account for the variable shallow-water conditions of convoy movement through hydrological normalization of transport work via the shallow-water resistance coefficient k_H and that, in contrast to indices oriented toward seagoing vessels and steady-state conditions *EEDI*, *EEXI*, *EEOI*, *EEDI_{Binnen}*, provides a normalized and comparable assessment of voyages under variable convoy composition and variable hydrological conditions of the Danube; a segment-discrete form of the indicator is proposed, accounting for the lightering mode through the multiplier $(2N - 1)$, which eliminates the mathematical indeterminacy of the *EEOI* indicator at zero transport work on individual voyage stages; a probabilistic-prognostic extension is constructed that combines a Monte Carlo voyage simulation with an autoregressive (AR(1)) forecast of Danube water levels and transforms the indicator into a random variable with a defined distribution, probability interval, and probability of exceeding a target level (narrowing of the forecast interval by approximately 22 %); and a system of algorithms for substantiating operational decisions is developed, with four classes of typical decisions and explicit quantitative activation criteria, integrated with the parametric diagnostics of the main engines.

Improved: the model of hydrodynamic resistance and required power of a pusher with a convoy – by introducing a modified shallow-water form factor $1 + k^*$ and by isolating the propulsive efficiency as an independent stochastic component (coefficient of variation about 5 %).

Further developed: the theoretical understanding of the energy efficiency of inland navigation vessel movement – through accounting for the joint influence of convoy composition, hydrological conditions, and the engine operating-mode profile, as well as through a statistical characterization of the Danube's hydrological regime; the method of parametric diagnostics of the working process of marine engines (analytical synchronization) – by extending it to the indirect determination of effective power and to the diagnostics of the technical condition by the relative indicator δSFC under conditions where direct measurement of resistance and power on pushers is

impossible; and the assessment method as regards its extension beyond the freight segment – by adapting the indicator to passenger vessels through the redefinition of transport work in passenger-kilometers (the EE_{pax} indicator) and by applying it to the quantitative assessment of the modal-shift effect.

The practical significance of the results obtained lies in the fact that the developed method and its software implementation have been brought to the level of a tool suitable for direct use in the operational and managerial practice of inland waterway transport enterprises. The method makes it possible to: perform an operational assessment and comparative analysis of voyage energy efficiency under variable convoy composition and hydrological conditions and to identify reserves for reducing fuel consumption (14.5–16.3 %, or 32–36 t of fuel and 100–112 t of CO₂ on the analyzed array) without intervention in the design of the vessel's power plant; substantiate the prioritization of projects for modernizing power plants and converting vessels to alternative fuels; quantify the climate effect of modal shift – the transfer of freight flows from road transport to inland waterways, in particular to the Danube, with cargo carried by large-capacity convoys: for a reference unit of transport work of 1 million t·km, such a transfer yields an emission reduction of approximately 127 t CO₂-eq and is about 14 times "cleaner" over the full fuel cycle; and form corporate energy-efficiency standards and participate in systems for the normalization, monitoring, and reporting of the fleet's carbon intensity in accordance with the EU regulatory context. The results have been implemented in the activities of the Danube Commission (in the preparation of Annex 5 to the Roadmap for the decarbonization of the Danube fleet), in the operational practice of PJSC "Ukrainian Danube Shipping Company" (in particular on the m/v "Mekhanik Sinilov"), in the validation on the passenger vessel m/v Lisabelle, and in the educational process of the Department of Engineering Disciplines of the Danube Institute of the National University "Odessa Maritime Academy" (Izmail).

The main results of the dissertation have been published in 71 works, including 23 scholarly articles in professional journals of Ukraine and other countries (of which

4 are in journals indexed in the Scopus scientometric database) and 48 conference abstracts.

Keywords: energy efficiency, inland navigation, pusher, convoy of non-self-propelled barges, Danube, hydrological normalization, shallow-water resistance coefficient, specific fuel consumption, parametric diagnostics, Monte Carlo method, autoregressive forecasting, carbon intensity, modal shift.

Наукові праці, в яких опубліковані наукові результати дисертації:

1. 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>. (*Scopus Q2; автором взято участь в формуванні первинного тексту, візуалізації ілюстративного матеріалу, формулюванні висновків*).

2. **T. Tarasenko**, V. Zalozh, R. Varbanets and D. Minchev. Considerations regarding reducing Danube navigation emissions. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, Vol. XXIV 2021, pg.174-183. doi: <https://doi.org/10.21279/1454-864X-21-11-021>. (*Scopus Q4; автором сформульовано ідея дослідження, наукову проблему, здійснено критичний аналіз літературних джерел і узагальнення попередніх досліджень, взято участь у рецензуванні та редагуванні*).

3. **Tarasenko T.**, Zalozh V. and Maksymov S. The Ways to Improve Energy Efficiency and Eco-friendliness of the Specific Danube Inland Vessels. First Stage. *JPCS*. 2019. Vol. 1297, conference 1. P. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1297/1/012019> (*Scopus Q4; автору належить концептуалізація, адміністрування, написання – суттєве доопрацювання, критичне редагування*).

4. Bezlutska, O., Leshchenko, A., Zahorodnia, Y., **Tarasenko, T.**, Sherman, M., & Smyrnova, I. (2021). Management qualities of the marine cadets. *Journal of Management Information and Decision Sciences*, 24(1), 1-12. <https://www.abacademies.org/articles/Management-qualities-of-the-marine-cadets-1532-5806-24-1-235.pdf> (*Scopus Q4; автором підготовлено первинний текст, формулювання висновків і рекомендацій*).

5. **Tarasenko Tetyana**, Zalozh Vitalii. Comparative analysis of energy transition scenarios in maritime shipping. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, Vol. XXVIII 2025, pg. 78-86. doi: 10.21279/1454-864X-25-I1-008 (автором сформульовано наукову проблему, мету й завдання дослідження, розроблено його концепцію первинний текст рукопису, взято участь у рецензуванні та редагуванні).

6. **Tarasenko T.**, Zalozh V., Maksymov S. Approach of using a system of evaluation indicators in determining the efficiency of ships in the Danube shipping. *Scientific Bulletin of Naval Academy*. 2022. Vol. XXV. P. 66–74. DOI: <https://doi.org/10.21279/1454-864X-22-I1-008> (автору належить концепція дослідження, організація роботи та координація команди, надання критичних порад, наукового нагляду, редагування).

7. Zalozh V., **Tarasenko T.**, Varbanets R. Efficiency Control Improvement of Diesel Engines Conditions by Using the Method of Analytical Synchronization of Monitored Data. *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*. 2020. Vol. 2, no. 7. P. 151–159. DOI: <https://doi.org/10.47577/technium.v2i7.1829> (автором взято участь в формуванні первинного тексту, візуалізації ілюстративного матеріалу, формулюванні висновків).

8. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту. Колективна монографія /за редакцією В. Чимшир/. – Ізмаїл : ДІ НУ «ОМА» 2020 – Київ: Міленіум, 2020. 472 с. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2021/04/monografia2020.pdf> (автором здійснено написання початкового варіанту, рецензування та редагування тексту, що стосується шляхів підвищення енергоефективності).

9. Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології : монографія / Букарос А. Ю., Онищенко О. А., **Тарасенко Т. В.** та ін.; за наук. ред. В. А. Голікова та О. А. Онищенко. – Миколаїв : Іліон, 2022. – 408 с. ISBN 978-617-534-687-7. DOI: 10.6084/m9.figshare.20279652 (*автором здійснено написання початкового варіанту, рецензування та редагування тексту, що стосується шляхів підвищення енергоефективності*).

10. **Т. В. Тарасенко**, П. С. Суворов. Сценарний підхід до прогнозування переходу до еконавігації. *Автоматизація судових технічних засобів*: науково-технічний збірник. 2026. Вип. 31. Одеса: НУОМА. DOI: <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2026-1-31-153-166> (*автором сформульовано ідея дослідження, виконано розрахункову частину, візуалізацію, підготовлено первинний текст рукопису, взято участь у редагуванні та узгоджені висновків*).

11. **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Оцінювання енергоефективності суден внутрішнього плавання за експлуатаційними параметрами судових двигунів. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії* № 32 (2026). С. 20–32. DOI: <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2026.1.32.020-032> (*автору належить концепція застосування методу для окремих типів суден, взято участь в первинному формуванні та остаточному редагуванні тексту*).

12. Тарасенко Т. В. Аналіз моделей витрати палива, викидів та показників енергоефективності для штовхачів з караванами барж у дунайському судноплавстві. *Наука і техніка сьогодні*, 2026, Випуск 2(56). С. 2281-2293. doi: 10.52058/2786-6025-2026-2(56)-2281-2293.

13. **Тарасенко Т. В.**, Мазур Т. М. Основні методи моніторингу для управління енергоефективністю на судні згідно додатку VI МК МАРПОЛ 73/78. *Водний транспорт*, 2025, Випуск 2(43). С. 117-122. doi: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.10> (*автору належить концептуалізація, надання критичних порад, редагування, рецензування*).

14. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Аналіз трансформації оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу у внутрішньому водному транспорті. *Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. 2023. Вип. 1(37). С. 161–170. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.18> (автором сформульовано ідея дослідження, розроблено методика дослідження, підготовлено первинний текст рукопису, взято участь у рецензуванні та редагуванні).

15. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Деякі питання оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу у внутрішньому судноплаванні. *Двигуни внутрішнього згорання*. 2023. Вип. 2(2023). С. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2023.2.05> (автором сформульовано ідея дослідження, розроблено методика дослідження, підготовлено первинний текст рукопису, взято участь у рецензуванні та редагуванні).

16. Варбанець Р. А., Залож В. І., **Тарасенко Т. В.**, Кирнац В. І., Клименко В. Г., Александровська Н. І. Деякі аспекти застосування системи DERAS D4.0H для підвищення енергоефективності суден внутрішнього плавання. *Двигуни внутрішнього згорання*. 2021. Вип. 2(2021). С. 60–67. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2021.2.08> (автору належить концепція застосування методу для окремих типів суден, взято участь в первинному формуванні та остаточному редагуванні тексту).

17. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Обмежувальні фактори в оцінці енергоефективності суден-штовхачів великовантажних составів у внутрішньому плаванні. *Автоматизація судових технічних засобів*. 2020. № 26. С. 94–109. DOI: <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2020-1-26-94-109> (автору належить концепція статті, обробка експериментальних даних та розробка методів оцінки енергоефективності).

18. Варбанець Р. А., Залож В. І., **Тарасенко Т. В.**, Кучеренко Ю. М., Клименко В. Г. Особливості аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2020. Вип. 1(2020). С. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2020.1.02> (автором взято участь в формуванні первинного тексту, візуалізації ілюстративного матеріалу, формулюванні висновків).

19. Варбанець Р. А., Залож В. І., **Тарасенко Т. В.**, Белоусова Т. П., Єриганов О. В. Метод аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в експлуатації. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2020. Вип. 7. С. 118–128. DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2020.7.17> (автором взято участь у рецензуванні та редагуванні рукопису, узгодженні остаточної версії статті до публікації).

20. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Оцінка енергоефективності для умов навігаційних невизначеностей у внутрішньому судноплаванні. *Автоматизація судових технічних засобів*. 2019. № 25. С. 90–100. URL: <http://ast.onma.edu.ua/wp-content/uploads/2019/12/astf-2019-1-25-90-100.pdf> (автором здійснено збір та систематизація первинних даних, інтерпретація результатів, формування висновків, остаточне редагування).

21. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І., Максимов С. Б. Про співвідношення показників енергоефективності та екологічності для суден внутрішнього плавання. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2019. № 3 (251). С. 168–175. URL: [http://sazt-snu.in.ua/uploads/BA_3_\(251\).pdf](http://sazt-snu.in.ua/uploads/BA_3_(251).pdf) (автором виконано аналіз літературних джерел, узагальнення попередніх досліджень, взято участь у рецензуванні та редагуванні тексту).

22. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Принципи визначення індикаторів енергоефективності для суден внутрішнього плавання. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2018. № 2 (243). С. 203–207. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VSUNU_2018_2_38, [http://sazt-snu.in.ua/uploads/14_05_BA_2_\(243\).pdf](http://sazt-snu.in.ua/uploads/14_05_BA_2_(243).pdf) (автором виконано систематизацію первинних даних, підготовлено ілюстративний матеріал).

23. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Оцінка факторів, що визначають енергоефективність суден внутрішнього плавання. *Автоматизація суднових технічних засобів*. 2018. Вип. 24. С. 94-102. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/asts_2018_24_12 (автором сформульовано наукову проблему, мету й завдання дослідження, систематизація первинних даних, виконано первинний текст, формулювання висновків).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

24. **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Параметричне діагностування суднових дизелів у задачах оцінювання енергоефективності суден. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2026)*. Збірник матеріалів XVIII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Одеса, 26–28 травня 2026 року). Одеса: Херсонська державна морська академія, 2026. С. 412-415. URL: https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2026/05/MINTT_2026.pdf (автору належить концепція статті та аналіз тенденцій розвитку систем параметричного діагностування суднових дизелів).

25. **Тарасенко Т. В.** Моніторинг робочого процесу головних двигунів як джерело уточнених даних про ефективну потужність дунайських штовхачів. *Сучасні проблеми двигунобудування, енергетики та інтелектуальної механіки – 2026*. Відкрита науково-практична студентська конференція факультету авіаційних двигунів (ФАД) Національного аерокосмічного університету "ХАІ" (20-21 травня 2026 р. DOI: <https://doi.org/10.32620/FAE.26> (автором виконано аналіз застосовності систем параметричного діагностування суднових дизелів для визначення енергоефективності роботи суден).

26. **Tarasenko Tetyana**, Zalozh Vitalii. Comparative analysis of parametric diagnostics-based energy efficiency assessment methods for inland vessels. *The 12th International Scientific Conference SEA-CONF 2026 May 14-16, 2026 – Constantza, Romania.* URL: <https://www.anmb.ro/ro/conferinte/sea-conf2026/brosura20sea20conf202026.pdf> (автором прийнято участь у формуванні концепції, виконано аналіз існуючих методів оцінки енергоефективності у внутрішньому судноплаванні, сформульовано висновки).

27. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.** Енергоефективність дунайських штовхачів з караванами барж у науці й освіті. *Інноваційні підходи до розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення: матеріали X Міжн.наук.-практ. конф. Ізмаїл, 24-25 квітня 2026 р. - Запоріжжя: АА ТанDEM, 2026. С. 91-94.* URL: <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2020/02/80.pdf> (автором взято участь в формуванні первинного тексту, редагуванні, формулюванні висновків).

28. Tarasenko T. V. Analysis of the results of the assessment of energy efficiency indicators for inland navigation vessels by labeling levels. *The 5th International Maritime Scientific Conference “Maritime Research and Education in Global Context”* (BSMA, 11-12.12.2025, Batumi, Georgia) URL: <https://drive.google.com/file/d/17dbokNTcG61MiOozv1Q0OknoPAYisGVM/view>.

29. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.** Аналіз актуальної проблематики нормування енергоефективності та переходу до еконавігації у внутрішньому судноплаванні Європи. *ДНІПРОВСЬКІ ЧИТАННЯ-2025: Матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції.* м. Київ, 11 грудня 2025 р. – Київ: вид-во Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій. – С. 97-102. URL: <https://drive.google.com/drive/folders/usp=sharing> (автором прийнято участь у формуванні концепції збереження оцінки енергоефективності при роботі суден на альтернативних паливах в умовах енергетичного переходу).

30. **Тарасенко Т. В.** Оцінка енергоефективності у внутрішньому судноплавстві та окремі питання її нормування. *Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: матеріали XVI Міжн.наук.-практ.конф.* (м. Ізмаїл, 5-6 грудня 2025 р.). Пленарна доповідь. URL: <https://drive.google.com/file/d/1Mex/view>.

31. **Тарасенко Т. В.** Аналіз результатів оцінки індексів енергоефективності суден у внутрішньому судноплавстві. *Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: матеріали XVI Міжн.наук.-практ.конф.* (м. Ізмаїл, 5-6 грудня 2025 р.). Запоріжжя, 2025. с. 362-365. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17811741>.

32. **Тарасенко Т. В.** Деякі питання актуалізації освітньо-професійних програм для морських спеціальностей. *Інноваційні підходи до розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення: матеріали IX Міжн.наук.-практ. конф.* Ізмаїл, 25-26 квітня 2025 р. - Запоріжжя: АА Тандем, 2025. С. 74-78.

33. **Tarasenko Tetyana, Zalozh Vitalii.** Comparative analysis of energy transition scenarios in maritime shipping. *The 11th International Scientific Conference SEA-CONF 2025 May 15-17, 2025 – Constantza, Romania.* https://www.anmb.ro/ro/conferinte/sea-conf2025/Program_Sea-Conf_2025.pdf (автором сформульовано наукову проблему, мету й завдання дослідження, розроблено його концепцію первинний текст рукопису, взято участь у рецензуванні та редагуванні).

34. **T. V. Tarasenko, P. S. Suvorov.** Analytical Look at Possible Energy Transition and Econavigation Scenarios. *VI International Maritime Scientific Conference Marine Power Plants & Operation*, 4 березня 2025 р., м. Одеса, Одеський національний морський університет. <https://2025.depas.od.ua/en/main/>, https://drive.google.com/file/d/1_6FX2C0kytDKrPJ-epXaaCjfW2zjjmw_/view (автором взято участь в формуванні первинного тексту, підготовці рисунків, схем, таблиць, формулюванні висновків).

35. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.** Окремі питання забезпечення безпеки при використанні альтернативних палив на судах. *ДНІПРОВСЬКІ ЧИТАННЯ-2024: Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції* м. Київ, 5 грудня 2024 р. – Київ: вид-во Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій. – С. 104-108. URL: https://drive.google.com/drive/folders/1KE3SENA44TJ8UD0a7Y5c_gBq9HMCwb5I?usp=sharing (автором прийнято участь у формуванні концепції збереження оцінки енергоефективності при роботі суден на альтернативних паливах в умовах енергетичного переходу).

36. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.** Деякі питання застосування альтернативних палив на судах внутрішнього плавання. *Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: матеріали XV Міжн.наук.-практ.конф.* (м. Ізмаїл, 8-9 грудня 2024 р.). Запоріжжя, 2024. с. 319-322. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14560948> (автором прийнято участь у формуванні концепції збереження оцінки енергоефективності при роботі суден на альтернативних паливах в умовах енергетичного переходу).

37. **Тарасенко Т. В.** Деякі особливості енергетичного переходу у дунайському судноплаванні. *Прикладні науково-технічні дослідження : матеріали VI міжнар. наук.-практ. конф.*, 14-16 трав. 2024 р. – Академія технічних наук України. – Івано-Франківськ : Видавець Кушнір Г. М. – 2024. – с. 213-216. <https://doi.org/10.63048/978-617-7926-61-9.0>.

38. **Тарасенко Т. В.** Аналіз проблематики впровадження питань еконавігації та енергетичного переходу до освітнього процесу. *Інноваційні підходи до розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення: матеріали VIII Міжн.наук.-практ. конф.* Ізмаїл, 19-20 квітня 2024 р. - Запоріжжя: АА Тандем, 2024. С. 71-73.

39. В. І. Залож, **Т. В. Тарасенко**, Р. А. Варбанець. Огляд сучасних тенденцій розвитку систем моніторингу суднових дизельних двигунів. *V International Maritime Scientific Conference Marine Power Plants & Operation*, 5 березня 2024 р., м. Одеса, Одеський національний морський університет. https://drive.google.com/file/d/1tM51ZXS8PMIzhEbZL3_1YCQaKK5aVrPW/view (автором прийнято участь у формуванні концепції застосування систем моніторингу для оцінки енергоефективності суден).

40. Залож В. І., **Тарасенко Т. В.** Огляд існуючих систем моніторингу суднових дизельних двигунів. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2024* : матеріали 15-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 13-15 березня 2024 р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2024. С. 60-62. <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2024/03/9E-2024.pdf> (автором взято участь в формуванні первинного тексту, підготовці рисунків, схем, висновків).

41. **Тарасенко Т. В.** Окремі питання енергоефективності роботи суден-штовхачів з караванами на Дунаї. *Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: матеріали XIV Міжн.наук.-практ.конф.* (м. Ізмаїл, 8-9 грудня 2023 р.). Запоріжжя, 2023. с. 170-175. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33864.49928>.

42. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.** Оцінка основних критеріїв вибору альтернативного пального для суден внутрішнього плавання в експлуатації. *ДНІПРОВСЬКІ ЧИТАННЯ-2023: Матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції* м. Київ, 7 грудня 2023 р. – Київ: вид-во Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій. – С. 95-99 (автором прийнято участь у формуванні концепції збереження оцінки енергоефективності при роботі суден на альтернативних паливах в умовах енергетичного переходу).

43. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Особливості оцінки енергоефективності суден у внутрішньому судноплавстві. *XXVIII - міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей.* – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2023. С. 43-44.
http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/19154/1/2_5204362209303475801.pdf(автором сформульовано наукову проблему, мету й завдання дослідження, розроблено первинний текст рукопису, взято участь у редагуванні).

44. **Тарасенко Т. В.** Актуальні питання оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу на внутрішньому водному транспорті. *Інноваційні підходи до розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення: матеріали VII Міжн.наук.-практ. конф. Ізмаїл, 21-22 квітня 2023 р. - Запоріжжя: АА ТанDEM, 2023. С. 83-88.*
<https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2023/05/zbyrnyk210423.pdf>.

45. Варбанець Р. А., Мінчев Д. С., Залож В. І., **Тарасенко Т. В.**, Абросімов В. Г. Підхід до неруйнівної діагностики системи впорскування палива суднового двигуна з використанням вібродатчиків. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування SEUTTOO-2023* : матеріали 14-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 16-18 березня 2023 р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2023. С. 109-113. <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2023/05/9E-2023.pdf> (автором прийнято участь у формуванні концепції застосування систем моніторингу для оцінки енергоефективності суден).

46. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.** Деякі аспекти сценаріїв модернізації флоту в умовах енергетичного переходу у внутрішньому водному транспорті. *ДНІПРОВСЬКІ ЧИТАННЯ-2022: Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції м. Київ, 8 грудня 2022 р. – Київ: вид-во КІВТ ДУІТ. – С. 124-129.*
<https://files.duit.edu.ua/uploads/90/conferences/international-scientific-and-practical-conferences/third-dnipro-reading-materials.pdf> (автором прийнято участь у формуванні концепції модернізації флоту в умовах енергетичного переходу).

47. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.** Енергоефективність суден внутрішнього плавання та Концепція енергетичного переходу *EUROPEAN GREEN DEAL*. Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування *СЕУТТОО-2022*: матеріали 13-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 07-09 вересня 2022 р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2022. С. 120-122. <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2023/06/9E-2022.pdf> (автором прийнято участь у формуванні концепції збереження оцінки енергоефективності при роботі суден на альтернативних паливах в умовах енергетичного переходу).

48. **Tarasenko T.**, Zalozh V., Maksymov S. Approach of using a system of evaluation indicators in determining the efficiency of ships in the Danube shipping. *The 8th International Scientific Conference SEA-CONF 2022, May 19-20, 2022. Constantza, Romania*, 2022. P. 19-20 (автору належить концепція дослідження, організація роботи та координація команди, надання критичних порад, наукового нагляду, редагування).

49. **Тарасенко Т. В.** Оцінка потенціалу зменшення шкідливих викидів у дунайському судноплавстві. *Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: матеріали XIII Міжн.наук.-практ.конф.* (м. Ізмаїл, 8-9 грудня 2022 р.). Запоріжжя, 2022. с. 166-168. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16687.41120>.

50. Варбанець Р. А., Залож В. І., **Тарасенко Т. В.**, Россомаха О. А. Аналітичні способи визначення положення верхньої мертвої точки поршня. *MPP&O-2022 (Marine Power Plants and Operation): матеріали IV Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету, 18-21 квітня 2022.* – Х.: Видавництво Іванченка І. С., 2021. – с. 57-67 (автором сформовано концепцію застосування систем моніторингу для оцінки енергоефективності суден).

51. Варбанець Р. А., Залож В. І., **Тарасенко Т. В.** Застосування результатів діагностування головних дизелів для обґрунтування оптимальних режимів експлуатації. *Суднова енергетика: стан та проблеми. Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції, 4–5 листопада 2021 року* Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, 2021. С. 103-107 (автором сформовано концепцію застосування результатів параметричної діагностики для підвищення енергоефективності суден, прийнято участь у формуванні висновків).

52. **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Деякі тенденції розгляду перспектив розвитку внутрішнього водного транспорту у контексті його енергоефективності. *Прогресивні технології засобів транспорту*. Матеріали першої міжнародної науково-технічної конференції, 23-24 вересня 2021 р. Харків-Миргород: УкрДУЗТ, 2021. С. 166 – 167 (автор здійснював аналіз застосовності методів оцінки енергоефективності у внутрішньому судноплаванні).

53. Варбанець Р. А., Залож В. І., **Тарасенко Т. В.** Підвищення енергоефективності суден внутрішнього плавання із застосуванням системи DEPAS D4.0H. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування SEUTTOO-2021: матеріали 12-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 06-08 вересня 2021 р.* Херсон: Херсонська державна морська академія, 2021. С. 33-37 (автором сформовано концепцію застосування результатів параметричної діагностики для підвищення енергоефективності суден, прийнято участь у формуванні висновків).

54. **Тарасенко Т. В.** Навігаційні умови у внутрішньому судноплаванні та енергоефективність. *Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: матеріали XII Міжн.наук.-практ.конф.* (м.Ізмаїл, 9-10 грудня 2021 р.). Запоріжжя, 2021. с. 207-210. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14310.55368>.

55. Р. А. Варбанець, В. І. Залож, **Т. В. Тарасенко**, В. І. Кирнац, В. Г. Клименко, Н. І. Александровська. Застосування системи DEPAS D4.0H для підвищення енергоефективності суден. *XXVI - міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей.* – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2021. С. 40-41 (*автором сформовано концепцію застосування результатів параметричної діагностики для підвищення енергоефективності суден, прийнято участь у формуванні висновків*).

56. **Tarasenko T.**, Zalozh V., Varbanets R., Minchev D. The considerations regarding reducing Danube navigation emissions. *7th International Scientific Conference SEA-CONF 2021, May 21-22, 2021.* Constantza, Romania, 2021. P. 7–8 (*автором сформульовано ідея дослідження, наукову проблему, здійснено критичний аналіз літературних джерел і узагальнення попередніх досліджень, взято участь у рецензуванні та редагуванні*).

57. **Тарасенко Т. В.** Деякі аспекти покращення екологічності та підвищення енергоефективності у дунайському судноплаванні. *Матеріали III Міжнародної науково-практичної морської конференції CEU і TE Одеського національного морського університету, квітень 2021.* – Х.: Видавництво Іванченка І.С., 2021. – с.452-455.

58. **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Енергоефективність у дунайському судноплаванні: основні аспекти та проблематика. *Інноваційні підходи розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення: матеріали V Міжн.наук.-практ.конф.* (м.Ізмаїл, 28 червня 2021 р.). Запоріжжя, 2021. с. 234-236 (*автором здійснено постановка наукової проблеми, розроблено первинний текст, здійснено остаточне редагування*).

59. **Тарасенко Т. В.** Управління енергоефективністю та енергоефективний менеджмент у внутрішньому судноплаванні. *Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: матеріали XI Міжн.наук.-практ.конф.* (м.Ізмаїл, 3-4 грудня 2020 р.). Запоріжжя, 2020. С. 234-236. Режим доступу: <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2020/12/tezy041220.pdf>.

60. **Тарасенко Т. В.** Загальні тенденції у сучасній світовій вантажній базі та у світовому міжнародному судноплавстві. *Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: матеріали XI Міжн.наук.-практ.конф.* (м.Ізмаїл, 3-4 грудня 2020 р.). Запоріжжя, 2020. С. 150-155.

61. Zalozh, V., **Tarasenko, T.**, Varbanets, R. Efficiency control improvement of diesel engines conditions by using the method of analytical synchronization of monitored data. *Proceedings of the 7th Technium Conference 2020*, 12 October 2020, Constanta, Romania. Vol. 2 No. 7, 2020. P. 151-159. URL: <https://techniumscience.com/index.php/conference/article/view/1828/689> (автором взято участь в формуванні первинного тексту, візуалізації ілюстративного матеріалу, формулюванні висновків).

62. **Тарасенко Т. В.** Некоторые аспекты определения транспортной работы большегрузных составов во внутреннем судоходстве. *Сучасні виклики і актуальні проблеми науки, освіти та виробництва: міжгалузеві диспути* [зб. наук. пр.]: матеріали VII міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Київ, 21 серпня 2020 р.). Київ, 2020. 169 с. с. 131-138. <https://openscilab.org/?p=1183>.

63. Варбанець Р. А., Залож В. І., **Тарасенко Т. В.**, Абросімов В. Г., Клименко В. Г., Ваганов О. І. Аналітична синхронізація даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування*. Матеріали 11-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 08-10 вересня 2020 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія. С. 39-41. (автором взято участь в формуванні концепції, первинного тексту, візуалізації ілюстративного матеріалу, формулюванні висновків).

64. **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Деякі аспекти оцінки енергоефективності суден-штовхачів великовантажних складів у внутрішньому плаванні. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування*. Матеріали 11-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 08-10 вересня 2020 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія. С. 28-32. https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2021/02/seutto_2020.pdf (автору належить концепція, аналіз та обробка експериментальних даних).

65. Варбанец Р. А., Залож В. І., **Тарасенко Т. В.**, Белоусова Т. П., Єриганов О. В., Клименко В. Г. Метод аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в експлуатації. *XXV - міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей*. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2020. С. 40-41 (автором сформовано концепцію застосування результатів параметричної діагностики для підвищення енергоефективності суден, прийнято участь у формуванні висновків).

66. Варбанець Р. А., Залож В. І., **Тарасенко Т. В.**, Абросимов В. Г., Клименко В. Г. Рішення задачі аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації. *XXV - міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей*. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2020. С. 38-40 (автором сформовано первинний текст, прийнято участь у візуалізації ілюстративного матеріалу).

67. **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І., Максимов С. Б. Оцінка енергоефективності в умовах невизначеностей обмежувальних факторів у внутрішньому судноплаванні. *Інноваційні підходи розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення*. Матеріали IV Міжн. наук. - практ. конф., 24 квітня 2020 р.- 42-45 с. Режим доступу: <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2020/05/B4.pdf> (автором здійснено постановка наукової проблеми, розроблено первинний текст, здійснено остаточне редагування).

68. Дімоглова О. В., **Тарасенко Т. В.** Сучасний стан професійної підготовки та основні вимоги до майбутніх суднових механіків. *Стратегічний потенціал державного та територіального розвитку*: Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (м. Маріуполь, 9-10 жовтня 2019 р.). – Маріуполь; Кривий Ріг: Вид. Р. А. Козлов, 2019. – 371-374 с. Режим доступу: <https://dsum.edu.ua/storage/documents/konf/Konferentsiya-2019-1.pdf> (автором здійснено постановка наукової проблеми професійної підготовки, розроблено первинний текст, здійснено остаточне редагування).

69. **Тарасенко Т. В.**, Дімоглова О. В. Система професійної підготовки майбутніх суднових механіків в Україні / Т. В. Тарасенко, О. В. Дімоглова // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. 10-та Міжнародна науково-практична конференція, 12-13 вересня 2019 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія. – 311-314 С. Режим доступу: https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2021/02/seutto_2019_.pdf (автором здійснено постановка наукової проблеми професійної підготовки, розроблено первинний текст, здійснено остаточне редагування).

70. Varbanets R., Zalozh V., **Tarasenko T.** The Working Process Monitoring In Transport Diesel Engines Operating. *Achievements of modern society*: abstracts of the 4th International scientific and practical conference, 4-6 December 2019. Cognum Publishing House. Liverpool, United Kingdom. 2019. P.36-41. Режим доступу: https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2019/12/scientific-achievements-of-modern-society_4-6.12.19.pdf (автором сформовано первинний текст, прийнято участь у візуалізації ілюстративного матеріалу).

71. **Tarasenko T.**, Zalozh V. and Maksymov S. The Ways to Improve Energy Efficiency and Eco-friendliness of the Specific Danube Inland Vessels. First Stage. *5th International Scientific Conference SEA-CONF 2019, May 17-8, 2019*. Constantza, Romania, 2019. P. 7–8. https://www.anmb.ro/ro/conferinte/sea-conf/arhiva/program_sea-conf_2019.pdf (автору належить концептуалізація, адміністрування, написання – суттєве доопрацювання, критичне редагування).

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ABSTRACT	2
ЗМІСТ	29
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	37
ВСТУП.....	39
РОЗДІЛ 1	53
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУДЕН ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НАУКОВОЇ ПРОБЛЕМИ.....	53
1.1 Аналіз підходів до оцінки енергоефективності суден у міжнародній та внутрішній практиці.....	53
1.1.1 Нормативно-індексний підхід: проєктні та операційні показники енергоефективності	54
1.1.2 Системний процесний підхід до управління енергоефективністю	57
1.1.3 Оперативний моніторинг та інструменти оцінки енергоефективності суден	58
1.1.4 Специфіка оцінки енергоефективності у внутрішньому суднопластві.	59
1.2 Самохідні судна та штовхачі з караванами барж як специфічний об’єкт оцінки енергоефективності	64
1.2.1 Світовий досвід оцінки енергоефективності караванів у внутрішньому суднопластві.....	64
1.2.2 Типові схеми роботи самохідних суден з караванами несамохідних барж.....	69
1.2.3 Профілі рейсів на внутрішніх водних шляхах	71
1.2.4 Режим роботи головної енергетичної установки самохідного судна або штовхача.....	72
1.2.5 Невідповідність стандартних методів оцінки умовам роботи караванів ...	74

1.3	Вимоги до оцінки енергоефективності суден внутрішнього плавання в контексті декарбонізаційних стратегій ЄС та Дунайського регіону	76
1.3.1	Стратегічне підґрунтя: European Green Deal та транспортна політика ЄС щодо внутрішнього судноплавства	76
1.3.2	Проект <i>GRENDEL</i> як галузева відповідь Дунайського регіону на декарбонізаційні вимоги.....	77
1.3.3	<i>PLATINA3/D2.6</i> як методологічний виклик: п'ятирівнева концепція індексу енергоефективності	78
1.3.4	Вимоги до способу оцінки енергоефективності, що формуються регуляторним контекстом	80
1.4	Обґрунтування наукової проблеми та вимог до способу оцінки енергоефективності руху суден у внутрішньому судноплавстві	82
1.4.1	Узагальнення результатів аналізу та виявлення методологічного розриву	82
1.4.2	Критична оцінка застосовності існуючих підходів до умов дунайського судноплавства	86
1.4.3	Формулювання наукової проблеми.....	89
1.4.4	Вимоги до нового способу оцінки енергоефективності	90
1.5	Мета, гіпотеза та логіка дисертаційного дослідження.....	92
	Висновки до першого розділу.....	96
	РОЗДІЛ 2	97
	Навігаційно-експлуатаційні умови судноплавного Дунаю та фактори енергоефективності досліджуваних суден з караванами	97
2.1	Характеристика судноплавного Дунаю від Кельхайму до Чорного моря (ділянки, гідрологія, гідроспороди, обмеження).....	97
2.1.1	Загальна характеристика та нормативно-правовий статус судноплавного Дунаю	97
2.1.2	Поділ на ділянки та їх навігаційні характеристики.....	98

2.1.3	Гідрологічний режим водного шляху та характеристика рівнів води ..	103
2.1.4	Гідроспороди та їх вплив на умови судноплавства.....	106
2.1.5	Навігаційні обмеження, вузькі місця та їх значення для оцінки енергоефективності караванів.....	107
2.2	Типовий флот та конфігурації караванів на Дунаї	110
2.2.1	Склад дунайського транспортного флоту та його значення для оцінки енергоефективності	110
2.2.2	Технічні параметри барж типу Європа-II як основної одиниці каравану... ..	113
2.2.3	Конфігурації караванів та їх залежність від ділянки Дунаю.....	114
2.2.4	Зміна конфігурації каравану протягом рейсу як ключовий фактор оцінки енергоефективності	118
2.2.5	Перспективи розвитку флоту та їх вплив на вимоги до методів оцінки енергоефективності	120
2.3	Фактори енергоефективності руху караванів на Дунаї.....	121
2.3.1	Навігаційні фактори.....	121
2.3.2	Технічні фактори.....	123
2.3.3	Експлуатаційні фактори	124
2.3.4	Взаємодія факторів та їх вплив на показники витрати палива і транспортної роботи	126
2.4	Систематизація факторів і підсумкова концептуальна модель процесу руху досліджуваних суден з караванами на Дунаї	128
2.4.1	Систематизація факторів за ознаками керованості та вимірюваності ..	128
2.4.2	Декомпозиція рейсу за характерними етапами та операціоналізація ступінчастого профілю	132
2.4.3	Концептуальна модель процесу руху досліджуваних суден з караванами на Дунаї	134

2.4.4	Узгодження концептуальної моделі з вимогами до способу оцінки енергоефективності та перехід до математичного моделювання	137
	Висновки до другого розділу	140
	РОЗДІЛ 3	143
	Математичне моделювання енергоспоживання руху штовхачів з караванами на Дунаї	143
3.1	Рейс штовхача з караваном барж як неусталений багаторежимний процес	146
3.1.1	Часові залежності потужності, витрати палива та транспортної роботи....	147
3.1.2	Вектор стану рейсу та неусталені режими роботи ГЕУ	149
3.1.3	Інтегральна постановка задачі енергоефективності рейсу	151
3.2	Дискретне наближення інтегральних показників енергоефективності рейсу за ділянками	153
3.2.1	Поділ рейсу на ділянки та усереднення параметрів	153
3.2.2	Дискретні аналоги інтегральної витрати палива та транспортної роботи..	154
3.2.3	Базовий дискретний індекс енергоефективності рейсу	156
3.2.4	Врахування гідрологічних умов: дискретний гідрологічний множник	156
3.2.5	Облік ділянок із нульовим завантаженням і проводок	158
3.2.6	Зв'язок дискретного індексу з моделлю стану рейсу	159
3.2.7	Співвідношення запропонованого показника з існуючими індексами енергоефективності та економічними критеріями	159
3.3	Моделі сил опору й потрібної потужності з урахуванням особливостей дунайських умов.....	162
3.3.1	Особливості гідродинамічного опору штовхача з караваном на Дунаї	163
3.3.2	Модель потрібної потужності на валах гребних гвинтів.....	165

3.3.3	Параметрична діагностика робочого процесу як джерело уточнених даних про ефективну потужність	167
3.3.4	Замкнена модель «опір → потужність → витрата палива» для дунайських умов.....	170
3.4	Імовірнісне узагальнення моделі енергоефективності та аналіз чутливості до умов плавання	172
3.4.1	Джерела невизначеності в оцінці енергоефективності дунайських рейсів	173
3.4.2	Імовірнісна постановка задачі	175
3.4.3	Алгоритм Монте-Карло для оцінки розподілу показника енергоефективності	180
3.4.4	Аналіз чутливості індексу енергоефективності.....	181
3.4.5	Структура робочої книги Excel для реалізації методики.....	183
3.4.6	Інтерпретація результатів та практичне застосування	184
3.5	Імовірнісне прогнозування енергоефективності рейсу за гідрологічними даними Дунайської Комісії	185
3.5.1	Постановка задачі прогнозування на горизонті планування рейсу	186
3.5.2	Структура бази добових рівнів води щорічників Дунайської Комісії.....	187
3.5.3	Авторегресійна модель добових рівнів. Горизонт корисного прогнозу ..	190
3.5.4	Просторово-часова кореляційна структура постів уздовж Дунаю	200
3.5.5	Трансляція прогнозованих рівнів у глибини фарватеру	205
3.5.6	Інтеграція з імовірнісною оцінкою енергоефективності рейсу	206
3.5.7	Застосування методики на етапі планування рейсу	208
	Висновки до третього розділу.....	211
	РОЗДІЛ 4	216
	Спосіб оцінки енергоефективності та алгоритми оптимізації	216

4.1	Система показників енергоефективності для самохідних суден з караваном на судноплавному шляху Дунай.....	216
4.2	Формалізація способу оцінки енергоефективності	218
4.2.1	Вхідні дані та джерела інформації	218
4.2.2	Поділ рейсу на ділянки та формування вектора стану	222
4.2.3	Розрахункові схеми для основних і нормованих індексів	223
4.2.4	Правила врахування особливих випадків.....	226
4.2.5	Критерії та шкала оцінювання результатів	229
4.3	Алгоритми обґрунтування експлуатаційних рішень.....	231
4.3.1	Мета та місце алгоритмів у запропонованому способі.....	232
4.3.2	Вихідні дані та індикатори для прийняття рішень	234
4.3.3	Класифікація типових експлуатаційних рішень	236
4.3.4	Алгоритм ретроспективного аналізу та корекції політики експлуатації	238
4.3.5	Алгоритм підтримки рішень при плануванні рейсу.....	243
4.3.6	Алгоритм оперативної корекції в ході рейсу	246
4.4	Програмна реалізація способу як інструмент підтримки прийняття рішень	251
4.4.1	Призначення інструменту і користувацькі сценарії.....	251
4.4.2	Архітектура програмної реалізації.....	255
4.4.3	Інформаційна модель та структура аркушів	261
4.4.4	Обчислювальне ядро та зв'язок з методологією розділів 3 і 4.....	277
4.4.5	Робочий цикл користувача та апробація на 14 рейсах УДП	285
	Висновки до четвертого розділу.....	303
	РОЗДІЛ 5	307
	ПРОГНОЗНЕ РОЗШИРЕННЯ СПОСОБУ І ЙОГО ВПРОВАДЖЕННЯ В ПРАКТИКУ ДУНАЙСЬКОГО СУДНОПЛАВСТВА	307

5.1	Апробація прогнозного блоку методики	308
5.1.1	Призначення прогнозного блоку та його місце в методиці.....	309
5.1.2	Вхідні дані прикладу та налаштування симуляції.....	310
5.1.3	Результати Монте-Карло симуляції (безумовний режим).....	313
5.1.4	Аналіз чутливості та пріоритезація факторів.....	315
5.1.5	Прогнозний режим: звуження імовірнісного інтервалу енергоефективності	317
5.1.6	Імовірнісний зріз на масиві реальних рейсів	319
5.2	Порівняння з існуючими методиками оцінки енергоефективності.....	321
5.2.1	Вибір методики для зіставлення.....	321
5.2.2	Місце показників запропонованого способу серед існуючих методик.	322
5.2.3	Числове зіставлення на масиві апробованих рейсів.....	325
5.3	Оцінка ефекту від впровадження способу	327
5.3.1	Методика оцінки потенціалу економії.....	327
5.3.2	Поіндексний потенціал економії	329
5.3.3	Агрегований ефект по флоту	330
5.3.4	Чутливість економічного ефекту до ціни палива	331
5.4	Практичні рекомендації.....	333
5.4.1	Рекомендації операторам флоту	333
5.4.2	Рекомендації органам управління	335
5.5	Перспективи подальших досліджень	339
5.5.1	Адаптація показника енергоефективності до пасажирських суден.....	339
5.5.2	Пілотна апробація способу на пасажирському судні.....	340
5.5.3	Паливні характеристики і порівняння з видами транспорту.....	341
5.5.4	Інші напрями подальших досліджень	345
	Висновки до п'ятого розділу	348

ВИСНОВКИ.....	351
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	355
ДОДАТОК А.....	369
Документи про впровадження	369
ДОДАТОК Б	379
СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	379
ДОДАТОК В.....	392
Технічні характеристики типових штовхачів і барж дунайського флоту, а також схеми допустимих форм караванів.....	392
ДОДАТОК Г	397
Узагальнені гідрологічні характеристики дунаю	397
ДОДАТОК Г'.....	404
Технологічна карта дослідження.....	404
ДОДАТОК Д.....	405
Текст програмного парсера PDF-щорічників Дунайської Комісії.....	405
ДОДАТОК Е	414
Матриця кореляцій водомірних постів на Дунаї	414
ДОДАТОК Є	425
Довідкова таблиця рекомендованих значень гідрологічного множника <i>kH</i>	425
ДОДАТОК Ж	432
Алгоритми обґрунтування експлуатаційних рішень.....	432
ДОДАТОК З.....	436
Інтерфейс програмної реалізації способу оцінки енергоефективності	436
ДОДАТОК І	440
Вихідні дані та розрахунок для пасажирського судна	440

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Скорочення

<i>ІМО</i>	–	Міжнародна Морська Організація;
<i>ВВТ</i>	–	внутрішній водний транспорт;
<i>ВСП</i>	–	високий судноплавний рівень;
<i>ВВШ</i>	–	внутрішні водні шляхи;
<i>ВВС</i>	–	внутрішнє водне судноплавство
<i>ГД</i>	–	головний двигун;
<i>ДГ</i>	–	дизель-генератор;
<i>ДК</i>	–	Дунайська Комісія;
<i>ККД</i>	–	коефіцієнт корисної дії;
<i>НСР</i>	–	низький судноплавний рівень;
<i>НСРР</i>	–	низький судноплавний регуляційний рівень;
<i>ПКВ (СА)</i>	–	поворот колінчастого валу;

Умовні позначення

<i>CF</i>	–	конверсійний фактор;
<i>D_w</i>	–	дедвейт;
<i>EEDI</i>	–	конструктивний індекс енергоефективності <i>ІМО</i> ;
<i>EEI</i>	–	індекс енергоефективності;
<i>EEOI</i>	–	експлуатаційний індекс енергоефективності <i>ІМО</i> ;
<i>IWT</i>	–	внутрішній водний транспорт, індекс для характеристик, що відносяться до внутрішнього водного транспорту;
<i>P_e</i>	–	ефективна потужність;
<i>P_i</i>	–	індикаторна потужність;
<i>p_{max} (p_z)</i>	–	максимальний тиск згоряння;
<i>RPM</i>	–	оберти двигуна за хвилину;
<i>FC_h</i>	–	годинна витрата палива;
<i>SFC</i>	–	питома витрата палива;

η_{prop} , η_{shaft} , η_{mech} , η_D – коефіцієнт корисної дії (пропульсивний, валопроводу, механічний, гребного гвинта відповідно);

η , η_{seg} , $\eta_{\text{медіана}}$, $\eta_{\text{ціл}}$ – відносний індекс енергоефективності (на сегменті, медіана, цільовий відповідно), застосовуються у розділах 4, 5.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми та актуальність дослідження. Упродовж останнього десятиріччя внутрішній водний транспорт розглядається в Європі та світі як один з ключових елементів стратегії декарбонізації транспортної системи. Це пов'язано з відносно низькими питомими енерговитратами та викидами на одиницю транспортної роботи в порівнянні з автомобільним і, частково, залізничним транспортом, а також із наявністю значних резервів для оптимізації експлуатації суден та оновлення флоту. Водночас реалізація цього потенціалу потребує розробки сучасних підходів до оцінки енергоефективності, які б відповідали новим технологічним і регуляторним вимогам, зокрема в частині внутрішніх водних шляхів Європи, до яких належить і Дунай.

Одним з базових трендів є посилення міжнародної та національної політики щодо скорочення викидів парникових газів та забруднювачів від внутрішнього водного транспорту. Органи ООН та європейські структури ухвалюють стратегії «зеленого» внутрішнього транспорту, де внутрішні водні шляхи прямо визначені як пріоритетний сегмент для зниження вуглецевої інтенсивності перевезень. Для Дунайського басейну показовим є проведення спільних заходів Дунайської Комісії (ДК) та відповідальних структур Стратегії ЄС для Дунайського регіону, зокрема семінару «*Roadmap and actions towards zero-emission Danube fleet*», присвяченого виробленню спільної стратегії та дорожньої карти декарбонізації дунайського флоту. На таких майданчиках обговорюються регуляторні вимоги до скорочення викидів CO₂ у внутрішньому судноплавстві, включаючи імплементацію оновленої Директиви ЄС з відновлюваної енергетики (RED III) та інших інструментів «зеленого курсу». Це формує нормативний та організаційний контекст, у якому питання оцінки енергоефективності руху суден набуває не лише технічного, а й стратегічного значення.

Другим важливим напрямом є впровадження альтернативних видів палива та нових енергетичних технологій. У Європі та Китаї активно реалізуються проєкти, пов'язані з використанням зрідженого природного газу, метанолу, водню, а також електричних і гібридних енергетичних установок на внутрішніх водних шляхах. Окремим прикладом є європейський інвестиційний проєкт з енергетичного переходу у внутрішньому водному судноплавстві, спрямований на розгортання повністю електричного, нуль-викидного флоту: передбачається введення в експлуатацію 45 повністю електричних суден, 75 модульних енергетичних контейнерів та 14 пунктів заряджання у внутрішніх водних портах. Частина суден вже працює на регулярних лініях, що демонструє практичну реалізованість таких рішень у реальних умовах експлуатації. У низці регіонів уже експлуатуються флотилії *LNG* та електричних суден, а також тестуються модульні батарейні системи й інші рішення, що передбачають різке зниження або повну відмову від традиційних дизельних двигунів. Для таких суден традиційні показники, засновані лише на витраті дизельного палива, стають недостатніми, що актуалізує потребу в нових або адаптованих методиках оцінки енергоефективності.

Для Дунайського регіону характерним є поєднання необхідності модернізації переважно вікового флоту з економічними обмеженнями судноплавних компаній. У матеріалах Дунайської Комісії підкреслюється, що модернізація дунайського флоту має відбуватися з урахуванням реальних економічних можливостей судновласників та специфіки експлуатаційних профілів суден. Зокрема, в рамках обговорення дорожньої карти для Дунаю увага приділяється використанню гідрогенізованих рослинних олій (*HVO*) як економічно перспективного коротко- та середньострокового рішення для істотного скорочення викидів CO_2 , особливо для штовхачів та складів, що працюють на великих дистанціях. Пропонується комбінувати впровадження таких «*drop-in*» біопалив із поетапним переходом до більш радикальних технологій (*LNG*, водень, електрифікація), що відповідає реаліям дунайського флоту. У цьому контексті особливої уваги набувають судна, що відіграють

ключову роль у вантажних перевезеннях на Дунаї, зокрема штовхачі з караванами несамохідних барж.

Наступний суттєвий тренд – перехід від домінування конструктивно-технічних рішень до комплексної експлуатаційної оптимізації. Сучасні дослідження показують, що зміна профілів швидкості, графіків руху, організації роботи на шлюзах і вузьких ділянках, а також узгодженість дій судноводіїв та диспетчерів можуть забезпечити істотне зниження витрат палива без негайних великих капіталовкладень у модернізацію корпусу або головних енергетичних установок. Для внутрішнього водного транспорту активно розвиваються підходи, що спираються на аналіз експлуатаційних даних (рейси, завантаження, режими роботи двигунів) та використання цифрових інструментів підтримки прийняття рішень щодо вибору оптимальних режимів руху. Такі підходи безпосередньо пов'язані з потребою в адекватних показниках енергоефективності, чутливих до навігаційних та експлуатаційних умов рейсу.

Цифровізація внутрішнього водного транспорту, включаючи Дунай, веде до широкого використання навігаційних інформаційних систем, даних AIS, метео- та гідрологічних сервісів, а також інтегрованих систем планування й моніторингу перевезень. У завданнях, пов'язаних із дорожньою картою до нульових викидів дунайського флоту, акцент робиться на тому, що технічні рішення щодо суден повинні оцінюватися з урахуванням реальних експлуатаційних профілів, отриманих за допомогою сучасних інформаційних систем та даних про роботу флоту. Це створює запит практики для побудови більш точних і динамічних моделей енергоспоживання суден, які враховують реальні профілі руху, умови плавання, конфігурації караванів і режими роботи енергетичних установок. Відповідно, одним із ключових запитів галузі стає розробка методів оцінки енергоефективності, придатних до інтеграції з цифровими платформами управління флотом і здатних підтримувати експлуатаційну оптимізацію в реальному або близькому до реального часу.

З позицій ринкової кон'юнктури та перспектив, внутрішній водний транспорт Європи, включно з дунайським сегментом, розглядається як один з

основних «бенефіціарів» енергетичного переходу. Аналітичні огляди ринку підкреслюють, що енергетичний перехід формує нові вантажопотоки, зокрема пов'язані з перевезенням енергетичної сировини та компонентів відновлюваної енергетики, для яких внутрішні водні шляхи мають конкурентні переваги саме завдяки енергоефективності та можливості масштабування перевезень. Це додатково посилює вимоги до обґрунтованих, прозорих і порівнюваних показників енергоефективності, які можна застосовувати для оцінки та планування розвитку флоту, у тому числі дунайського.

Зазначені глобальні й регіональні тенденції відбиваються в спеціалізованих ініціативах, спрямованих на підвищення енергоефективності саме дунайського флоту. Проєкти на кшталт *GRENDEL*, а також розроблювані дорожні карти модернізації флоту Дунаю, фокусуються на поєднанні технічної модернізації суден (оновлення корпусів, енергетичних установок, впровадження альтернативних палив) із удосконаленням методів оцінки їх енергетичної ефективності в реальних умовах експлуатації. При цьому особливо підкреслюється необхідність адаптації підходів до оцінки енергоефективності до специфіки штовхачів з караванами барж, які формують основу вантажних перевезень на Дунаї, а також урахування складних навігаційних умов різних ділянок ріки.

Сучасні тренди розвитку енергоефективного внутрішнього водного транспорту та дунайського судноплавства характеризуються поєднанням жорсткіших екологічних вимог, технологічних інновацій (альтернативні палива, гібридні й електричні установки), експлуатаційної оптимізації й цифровізації процесів управління флотом. У цих умовах особливо **актуальним** є розробка науково обґрунтованого способу оцінки енергоефективності руху суден, якій враховує реальні навігаційні й експлуатаційні умови Дунаю, зокрема для штовхачів з караванами несамохідних барж, що й визначає науковий та прикладний інтерес теми дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконано відповідно до основних положень «Національної

транспортної стратегії України на період до 2030 року» (постанова Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2024 р. № 1550) та відповідає пріоритетним тематичним напрямам наукових досліджень в розділі «Енергетика та енергоефективність», затверджених постановою Кабінету Міністрів України № 463 від 9 травня 2023 р.

Дисертаційна робота пов'язана з тематиками досліджень кафедри інженерних дисциплін Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія» та спрямована на розробку способу оцінки енергоефективності руху суден у внутрішньому судноплавстві. Наведені в дисертації матеріали узагальнюють результати досліджень, виконаних автором у рамках науково-дослідних робіт «Підвищення енергоефективності у судноплавстві» (Державний реєстраційний номер: 0118U007606) та «Підвищення ефективності експлуатації морських суден та суден внутрішнього плавання» (Державний реєстраційний номер: 0123U101516) в якості керівника обох НДР та співвиконавця розділів, присвячених енергоефективності у морському та внутрішньому судноплавстві, методам параметричної діагностики транспортних двигунів.

Науково-прикладною проблемою, яка вирішується в дисертаційній роботі, є необхідність створення теоретичних та методологічних засад для науково обґрунтованого способу оцінки енергоефективності суден внутрішнього водного транспорту, зокрема самохідних вантажних суден і штовхачів з караванами несамохідних барж на Дунаї. Існуючі методи або запозичують підходи для морських суден, або враховують обмежену кількість експлуатаційних і навігаційних факторів (глибина, течія, завантаження, конфігурація каравану), що призводить до неточної або суперечливої оцінки реальної енергоефективності руху по різних ділянках від Кельхайму до Чорного моря.

Зазначена проблема є частиною глобальної науково-прикладної проблеми, яка полягає у забезпеченні безпечного судноплавства, підвищенні ефективності використання палива на судах та зменшенні шкідливого впливу на довкілля при

експлуатації флоту. Основним науковим протиріччям є суперечність між необхідністю ефективного використання палива, екологічністю, навігаційними обмеженнями на внутрішніх водних шляхах, енергоспоживанням та рівнем доступних параметрів.

Розроблені в дисертації методи дозволяють підвищити ефективність використання палива та в нормувати показники енергоефективності з метою виведення питань енергоефективності на внутрішніх водних шляхах на контрольований рівень.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає у розробленні науково обґрунтованого способу оцінки енергоефективності руху суден внутрішнього судноплавства (самохідних суден і штовхачів з караванами несамохідних барж) у змінних навігаційних та експлуатаційних умовах, придатного для використання в задачах управління енергоефективністю флоту та гармонізованого з регуляторними вимогами ЄС.

Досягнення мети пов'язане з комплексним розв'язанням наступних задач наукового дослідження.

- аналіз сучасних методів оцінки енергоефективності суден внутрішнього водного транспорту та придатність індексів на основі *IMO EEDI / EEOI* до умов дунайського судноплавства;

- дослідження навігаційних та експлуатаційних особливостей судноплавного Дунаю від Кельхайму до Чорного моря, що впливають на енергоефективність руху штовхачів із караванами барж (глибини, течії, гідротехнічні споруди, обмеження швидкості, конфігурації караванів);

- формування та обґрунтування системи показників і факторів, які мають бути враховані у способі оцінки енергоефективності (кількість палива/тонно-кілометр, викиди, швидкість, профіль рейсу, параметри каравану, режими роботи ГЕУ тощо);

- розробка математичної моделі (або комплексу моделей) енергоспоживання та енергоефективності руху штовхачів з караванами

несамохідних барж в умовах різних ділянок Дунаю, з урахуванням обмежень по глибині, течії, завантаженню та складу каравану;

- пропозиція способу оцінки енергоефективності руху штовхачів з караванами барж, придатного для використання в експлуатаційній практиці (алгоритм, критерії, індикатори, рекомендації з вибору режимів руху та конфігурації караванів);

- валідація запропонованого способу на реальних або типовим чином змодельованих експлуатаційних даних дунайських штовхачів з караванами барж, оцінити досягнутий ефект щодо зниження витрат палива та викидів при різних сценаріях експлуатаційної оптимізації;

- розробка науково обґрунтованих практичних рекомендацій для судноплавних компаній та органів управління флотом Дунаю щодо підвищення енергоефективності експлуатації штовхачів з караванами несамохідних барж.

Виходячи з цього сформовані 4 головні задачі та допоміжні задачі, вказані у технологічній карті дослідження (Додаток Г).

Об'єктом дослідження є процес руху та експлуатації суден внутрішнього судноплавства – самохідних суден (окремо та у складі караванів барж) і штовхачів з караванами несамохідних барж у системі дунайського судноплавства.

Предметом дослідження є параметри та взаємозв'язки, що визначають енергоефективність руху суден внутрішнього судноплавства – самохідних суден (як поодиноких, так і у складі караванів), а також штовхачів з караванами несамохідних барж на різних ділянках Дунаю (швидкість, завантаження, конфігурація каравану, глибина, течія, режими роботи суднової пропульсивної установки тощо) – та спосіб її оцінки для цілей експлуатаційної оптимізації та подальшого нормування.

Методи дослідження. У роботі використано комплекс загальнонаукових і спеціальних методів. Теоретичні узагальнення спираються на методи аналізу, систематизації, порівняння та класифікації – для критичного огляду регуляторних документів і наукової літератури та впорядкування показників

енергоефективності. Дослідження факторів енергоефективності виконано методами системного аналізу, декомпозиції рейсу за етапами та статистичної обробки експлуатаційних даних. Математичну модель і спосіб оцінки побудовано методами математичного моделювання й дискретизації інтегральних показників, гідродинамічного аналізу опору та потрібної потужності, параметричної діагностики робочого процесу суднових двигунів (аналітична синхронізація), імовірнісного моделювання методом Монте-Карло з аналізом чутливості за коефіцієнтами рангової кореляції Спірмена, авторегресійного моделювання (AR(1)) рядів рівнів води, кореляційного та ієрархічного кластерного аналізу (UPGMA) і регресійного аналізу. Перевірку способу здійснено шляхом апробації на масиві реальних рейсів, порівняння з існуючими методиками (EEOI) та даними Європейського агентства з довкілля (EEA), сценарного аналізу й оцінювання невизначеності за рекомендаціями GUM. Обробку відкритих гідрологічних даних Дунайської Комісії (вибірку добових рівнів води за 2005–2020 рр.) виконано власним програмним парсером мовою *Python* (Додаток Д); математичне моделювання та програмну реалізацію способу – у середовищі *MS Excel*; візуалізацію – засобами *MS Excel* та *Inkscape*.

Наукова новизна отриманих результатів, які захищає автор, полягає у наступному.

Вперше:

- розроблено спосіб оцінки енергоефективності руху суден внутрішнього судноплавства, що ґрунтується на показнику типу *EEOI* та адаптує його для врахування змінних мілководних умов руху караванів шляхом гідрологічного нормування транспортної роботи через коефіцієнт мілководного опору k_H і, на відміну від орієнтованих на морські судна та стаціонарні умови індексів *EEDI*, *EEXI*, *EEOI*, *EEDI_{Binnen}*, забезпечує нормовану й порівнянну оцінку рейсів за змінного складу каравану та змінних гідрологічних умов Дунаю;

- запропоновано посегментно-дискретну форму показника енергоефективності (формули (3.17)–(3.18)) з декомпозицією рейсу за якісно різними етапами (рух у повному складі каравану, проводка, маневрування,

шлюзування) та врахуванням режиму провідок множителем $(2N - 1)$, що усуває математичну невизначеність стандартного показника $EEOI$ при нульовій транспортній роботі на окремих етапах рейсу;

- побудовано імовірісно-прогностичне розширення оцінки енергоефективності, яке поєднує Монте-Карло симуляцію рейсу з авторегресійним прогнозом (AR(1)) рівнів води Дунаю й перетворює показник з детермінованої величини на випадкову з визначеними розподілом, імовірнісним інтервалом та ймовірністю перевищення цільового рівня; кількісно встановлено, що врахування оперативних гідрологічних даних звужує імовірнісний інтервал прогнозу приблизно на 22 %;

- розроблено систему алгоритмів обґрунтування експлуатаційних рішень із чотирма класами типових рішень (корекція швидкісного профілю, вибір конфігурації каравану, еко-швидкість на мілководді, технічне обслуговування ГЕУ) та явними кількісними критеріями активації, інтегровану з параметричною діагностикою робочого процесу головних двигунів (зв'язок « $\delta SFC > 1,10 \rightarrow$ активація класу 4 $\rightarrow$ діагностика $\rightarrow$ виявлення дефектів»).

Удосконалено:

- модель гідродинамічного опору й потрібної потужності руху штовхача з караваном у дунайських умовах – уведенням модифікованого формфактора мілководдя $1 + k^*$ та виокремленням пропульсивного ККД η_{prop} як самостійної стохастичної компоненти (коефіцієнт варіації близько 5 %), що раніше враховувався неявно у складі узагальненого коефіцієнта опору;

Отримало подальший розвиток:

- теоретичні уявлення про енергоефективність руху суден внутрішнього судноплавства – через урахування спільного впливу складу каравану, гідрологічних умов мілководних ділянок і профілю режимів роботи ГЕУ на енергоспоживання та вуглецеву інтенсивність, а також через статистичну характеристику гідрологічного режиму Дунаю (зростання коефіцієнта авторегресії ϕ від 0,90 до 0,99 вздовж течії, кластерна кореляційна структура постів) за масивом 265 798 добових записів 71 водомірного поста;

- метод параметричної діагностики робочого процесу суднових двигунів (аналітична синхронізація) – поширення його на опосередковане визначення ефективної потужності ГЕУ та діагностику технічного стану двигунів за відносним показником δSFC в умовах, коли пряме вимірювання опору й потужності на штовхачах неможливе;

- спосіб оцінки енергоефективності в частині поширення за межі вантажного сегмента – адаптацією показника до пасажирських суден через перевизначення транспортної роботи в пасажиро-кілометрах (показник $EE_{рах}$, формула (5.5)) та застосуванням способу до кількісної оцінки ефекту модального зсуву в зіставленні з даними EEA .

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблений спосіб та його програмна реалізація доведені до рівня інструмента, придатного для безпосереднього використання в експлуатаційній і управлінській практиці підприємств внутрішнього водного транспорту. Зокрема, одержані результати дають змогу:

- здійснювати оперативну оцінку та порівняльний аналіз енергоефективності рейсів самохідних суден з караванами барж за змінного складу каравану й змінних гідрологічних умов, виявляти резерви зниження витрати палива (до 14,5–16,3 % на проаналізованому масиві рейсів) та обґрунтовувати експлуатаційні рішення щодо швидкісного режиму й конфігурації каравану на основі чотирьох класів типових рішень із кількісними критеріями активації, причому оцінка виконується за штатними експлуатаційними даними, без втручання в конструкцію енергетичної установки судна;

- використовувати результати оцінки як основу для техніко-економічного обґрунтування й визначення пріоритетності проєктів модернізації енергетичних установок та переведення суден на альтернативні види палива, зокрема для раціонального розподілу обмежених капітальних ресурсів між класами флоту;

– застосовувати спосіб для кількісної оцінки кліматичного ефекту модального зсуву вантажопотоків на внутрішній водний транспорт та для аргументації відповідних рішень у зіставленні з міжнародними показниками;

– використовувати показники й алгоритм агрегування як підґрунтя для формування корпоративних стандартів енергоефективності та участі підприємств у системах нормування, моніторингу й звітності щодо вуглецевої інтенсивності флоту відповідно до регуляторного контексту ЄС.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в діяльності Дунайської Комісії (при підготовці Додатка 5 до Дорожньої карти декарбонізації дунайського флоту), у практику експлуатаційної діяльності ПрАТ «Українське Дунайське пароплавство», у тому числі на т/х «Механик Синилов» – при моніторингу паливовикористання та екологічних показників роботи судна, а також використано при апробації способу на пасажирському круїзному теплоході *m/v Lisabelle*, що підтверджено відповідними актами впровадження та довідками (Додаток А). Окремі результати роботи впроваджено в навчальний процес кафедри інженерних дисциплін Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія» (м. Ізмаїл).

Особистий внесок здобувача полягає в висуненні та доведенні гіпотези, що спосіб оцінки енергоефективності руху суден внутрішнього судноплавства, що одночасно враховує склад каравану (кількість, тип і завантаженість барж), гідрологічні умови плавання (глибину фарватеру, швидкість течії) та профіль режимів роботи головної енергетичної установки і реалізує нормування показника на стандартні умови експлуатації, забезпечує об’єктивну та порівнянну оцінку енергоефективності як самохідних суден, так і штовхачів з караванами на різних ділянках Дунаю і може бути використаний як інструмент для прийняття обґрунтованих експлуатаційних рішень у контексті європейських підходів до індексів енергоефективності для суден внутрішнього водного транспорту.

У Додатку Б наведено список наукових праць, серед яких у роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: формулювання ідеї, наукової

проблеми, мети й завдань дослідження, розроблення його концепції та методики [2, 5, 14–15, 23, 33, 43, 56]; постановка наукової проблеми, розроблення первинного тексту та остаточне редагування [58, 67–69]; розроблення методів оцінки енергоефективності та оброблення експериментальних даних [11, 16–17, 64]; розроблення концепції застосування систем параметричного діагностування і моніторингу суднових дизелів для оцінювання та підвищення енергоефективності суден [24, 39, 45, 50–51, 53, 55, 65]; розроблення концепції збереження оцінки енергоефективності за умов переходу суден на альтернативні палива та модернізації флоту в умовах енергетичного переходу [29, 35–36, 42, 46–47]; концептуалізація, наукове керівництво, координація роботи, надання критичних порад і критичне редагування [3, 6, 13, 48, 71]; аналіз застосовності та порівняння наявних методів оцінки енергоефективності, формулювання висновків [26, 52]; аналіз і систематизація первинних даних, опрацювання літературних джерел, узагальнення та інтерпретація результатів, підготовка ілюстративного матеріалу [4, 20–22]; написання початкового варіанту тексту, рецензування та редагування [8–9, 19]; формування первинного тексту, візуалізація ілюстративного матеріалу (рисунків, схем, таблиць) та формулювання висновків [1, 7, 10, 18, 27, 34, 40, 61, 63, 66, 70].

Використання інструментів штучного інтелекту. При підготовці дисертаційної роботи для виконання допоміжних технічних завдань – розробки програмного коду обробки відкритих даних, попереднього літературного впорядкування та мовної редактури – використовувалися інструменти на базі генеративного штучного інтелекту (зокрема, *Claude* розробки компанії *Anthropic*). Усі наукові положення, методологічні рішення, постановки задач, інтерпретація результатів та висновки сформульовані здобувачем особисто. Програмні розробки, виконані із залученням *AI*-асистента, перевірені здобувачем на коректність шляхом порівняння з первинними даними та ручної вибіркової верифікації; повний текст ключових програмних інструментів наведено у відповідних додатках до дисертації. Тексти, створені із застосуванням технологій штучного інтелекту, перевірені та відредаговані здобувачем особисто

згідно з вимогами Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197 (із змінами, внесеними постановою Кабінету Міністрів України від 30 липня 2025 р. № 928).

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідались на міжнародних конференціях, конгресах та семінарах, де отримали позитивну оцінку, серед яких: XXV, XXVI, XXVIII Міжнародний конгрес двигунобудівників (2020, 2021, 2023 рр.); III-VI Міжнародна морська науково-практична конференція кафедри СЕУ і ТЕ МРР&О (ОНМУ, Одеса, 2021-2025 рр.); 10-15 Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО» (ХДМА, Херсон, 2019-2024 рр.); X Міжнародна науково-технічна конференція «Суднова енергетика: стан та проблеми» (НУК ім. адмірала Макарова, Миколаїв, 2021 р.; 5, 7, 8, 11 Міжнародна наукова конференція *SEA-CONF* (Констанца, Румунія, 2019, 2021, 2022, 2025 рр.), XI-XVI Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту ДІНУОМА» (ДІНУОМА, Ізмаїл, 2020-2025 рр.); IV-VI, VIII, IX Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні підходи до розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення» (ДІНУОМА, Ізмаїл, 2020-2022, 2024, 2025, 2026 рр.); 7 Міжнародна наукова конференція *Technium Conference* (Констанца, Румунія, 2020); 5 Міжнародна морська наукова конференція «Maritime Research and Education in Global Context» (BSMA, 2025, Batumi, Georgia); I Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні технології засобів транспорту» (УкрДУЗТ, Харків-Миргород, 2021 р.); III-VI Міжнародна науково-практична конференція «ДНІПРОВСЬКІ ЧИТАННЯ» (ДУІТ, Київ, 2022-2025 р.); VI Міжнародна науково-практична конференція «Прикладні науково-технічні дослідження (Академія технічних наук України, 2024 р.).

Публікації. Результати дисертаційного дослідження опубліковані в 71 праці, в тому числі: 23 наукові статті у фахових журналах України та інших

держав, серед яких 4 статей в журналах, що входять до міжнародної наукометричної бази *Scopus* (Q2 – 1 стаття, Q4 – 3 статті); 48 тез доповідей міжнародних конференцій.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновку, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи – 443 сторінки друкованого тексту, обсяг основного тексту – 329 сторінок. Основний текст дисертації містить 34 рисунків та 33 таблиці, з яких 8 рисунків та 9 таблиць повністю займають площу 12 сторінок, список використаної літератури включає 102 джерела на 14 сторінках, додатки розміщені на 72 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУДЕН ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НАУКОВОЇ ПРОБЛЕМИ

Зміст розділу відповідає першій головній науковій задачі дослідження (ГЗ-1) – теоретико-аналітичне обґрунтування наукової проблеми та вимог до оцінки енергоефективності руху суден внутрішнього судноплавства (Додаток Г, технологічна карта дослідження).

1.1 Аналіз підходів до оцінки енергоефективності суден у міжнародній та внутрішній практиці

У цьому підрозділі виконано систематизацію наявного інструментарію оцінки енергоефективності суден за чотирма класифікаційними ознаками: тип інструменту, статус нормування, об’єкт оцінки та застосовність до досліджуваних суден з караванами барж. На відміну від наявних оглядів, виконаних у тематичному порядку (*Kalajdžić et al.* [38], *PLATINA3/D2.6* [55]), прийнятий підхід дозволяє виявити системні обмеження кожного інструменту щодо специфічних умов експлуатації штовхачів із караванами на Дунаї та обґрунтувати методологічний розрив, що є предметом цієї дисертації. Результати систематизації узагальнено у зведеній Табл. 1.1 наприкінці підрозділу.

Зростання обсягів міжнародної торгівлі та інтенсифікація вантажних перевезень у другій половині XX – на початку XXI століття зумовили значне збільшення споживання паливно-енергетичних ресурсів у судноплавній галузі. За оцінками Міжнародної морської організації (*IMO*), морський транспорт відповідає приблизно за 2,5–3,0 % глобальних антропогенних викидів парникових газів, що ставить галузь під дедалі жорсткіший регуляторний та суспільний тиск [40]. Відповідно, питання оцінки, контролю та підвищення енергоефективності суден набувають першочергового значення як у контексті міжнародного судноплавства, так і у сфері внутрішнього водного транспорту.

Формування системного підходу до управління енергоефективністю суден відбувалося поступово і базувалось на розвитку нормативної бази ІМО, передусім на вимогах Додатку VI Міжнародної конвенції про запобігання забрудненню з суден (МАРПОЛ 73/78). Відповідно до правил глави 4 зазначеного Додатку, вимоги енергоефективності поширюються на всі судна валовою місткістю 400 та більше реєстрових тонн. Метою цих правил є скорочення викидів забруднюючих речовин, що утворюються внаслідок спалювання рідкого палива, шляхом виконання комплексу технічних та експлуатаційних заходів [40].

Аналіз наявних наукових праць та нормативних документів свідчить про те, що у практиці управління енергоефективністю суден сформувалось кілька взаємопов'язаних підходів: нормативно-індексний, системний процесний, а також підхід на основі оперативного моніторингу. Кожен із зазначених підходів передбачає використання специфічного інструментарію оцінки, що розглядається далі.

1.1.1 Нормативно-індексний підхід: проєктні та операційні показники енергоефективності

Фундаментальну роль у системі міжнародного регулювання енергоефективності відіграє конструктивний індекс енергоефективності нового судна (*Energy Efficiency Design Index – EEDI*), запроваджений ІМО як обов'язковий для суден, побудованих після 2013 року. *EEDI* є розрахунковим показником проєктного рівня, що характеризує питому кількість викидів CO₂ у грамах на тонно-милю перевезеного вантажу і визначається за формулою [32]:

$$EEDI = \frac{\sum P_i \cdot CF_i \cdot SFC_i}{f_u \cdot Capacity \cdot v_{ref}}, \quad (1.1)$$

де P_i – встановлена потужність двигунів i -го типу, кВт;

CF_i – коефіцієнт перетворення палива на CO₂;

SFC_i – питома витрата палива, г/(кВт·год);

f_u – коефіцієнт використання потужності;

$Capacity$ – вантажопідйомність судна (або дедвейт Dw);

v_{ref} – розрахункова швидкість судна при максимальному завантаженні, вузли.

Відповідно до Резолюції *IMO MEPC.203(62)*, для кожного класу суден встановлено базову лінію *EEDI* та поетапні вимоги щодо її зниження: на 10 % – для Фази 1 (2015–2019 рр.), на 20 % – для Фази 2 (2020–2024 рр.) та на 30 % – для Фази 3 (від 2025 р.) [32]. Ці вимоги слугують стимулом для розробки більш енергоефективних суднових конструкцій та застосування альтернативних видів палива.

Поряд із *EEDI*, що поширюється виключно на нові судна, Резолюцією *IMO MEPC.328(76)* з 1 січня 2023 року введено обов’язковий Індекс енергоефективності існуючих суден (*Energy Efficiency Existing Ship Index – EEXI*) для всіх суден валовою місткістю 400 *GT* та вище, що здійснюють міжнародні рейси. *EEXI* розраховується за методологією, аналогічною *EEDI*, однак застосовується до суден, які вже перебувають в експлуатації, і дозволяє оцінити їх технічну (конструктивну) енергоефективність незалежно від дати побудови. Якщо розрахунковий показник перевищує встановлену граничну величину, судновласник зобов’язаний вжити технічних заходів для його зниження – зокрема, обмеження потужності головного двигуна (*Engine Power Limitation, EPL*) або встановлення більш ефективного гребного гвинта [33]. Таким чином, *EEXI* виконує функцію ретроспективного технічного аудиту флоту.

Крім того, для суден, що вже перебувають в експлуатації, *IMO* запровадила Індекс операційної енергоефективності (*Energy Efficiency Operational Indicator – EEOI*), рекомендований Циркуляром *MEPC.1/Circ.684* як добровільний інструмент моніторингу. Цей показник відображає фактичну питому емісію CO_2 на одиницю транспортної роботи і розраховується для окремого рейсу за формулою [30]:

$$EEOI = \frac{\sum_j (FC_j \cdot CF_j)}{m_{cargo} \cdot D}, \quad (1.2)$$

де FC_j – маса спожитого палива j -го типу за рейс, т;

CF_j – конверсійний коефіцієнт (маса CO_2 на одиницю маси палива);

m_{cargo} – маса перевезеного вантажу (або кількість пасажирів, контейнерів TEU), т;

D – відстань переходу, морські милі.

Середнє значення $EEOI$ за декілька рейсів обчислюється як відношення сумарних зважених викидів до сумарної транспортної роботи, що дозволяє об'єктивно оцінювати динаміку енергоефективності судна у часі. Практика застосування $EEOI$ свідчить про його ефективність як інструменту виявлення резервів енергозбереження та порівняльного аналізу суден у флоті судноплавної компанії [30, 53, 70].

Важливим нормативним нововведенням, що набуло чинності з 2023 року відповідно до Резолюції $MEPC.328(76)$, є запровадження Індикатора інтенсивності вуглецю (*Carbon Intensity Indicator* – CII) та відповідного рейтингу суден (від A до E). CII є річним операційним показником і розраховується як кількість викидів CO_2 на одиницю транспортної роботи ($\Gamma_{CO_2}/(Dw \cdot \text{мор.м})$) або аналогічних одиницях залежно від типу судна).

$$CII = \frac{\sum_j FC_j \cdot CF_j}{Capacity \cdot D_{total}}, \quad (1.3)$$

де FC_j – річна маса спожитого палива j -го типу, т;

CF_j – конверсійний коефіцієнт для перетворення маси палива у масу CO_2 ;

$Capacity$ – вантажопідйомність судна (Dw), т;

D_{total} – сумарна відстань, пройдена судном за рік, морські милі.

Отримане значення CII ($\Gamma_{CO_2}/(t \cdot \text{мор.м})$) порівнюється з нормативною «необхідною» величиною (*Required CII*), що щорічно знижується на 2 % протягом 2023–2026 рр. відповідно до затвердженого графіку [33]. За результатами порівняння судну присвоюється рейтинг від A (найкращий) до E (найгірший). Судна з рейтингом D упродовж трьох послідовних років або E упродовж одного року зобов'язані включати до $SEEMP$ конкретний коригувальний план.

У сфері морського судноплавства ключовим драйвером зменшення викидів стало включення сектора до системи торгівлі квотами на викиди ЄС ($EU ETS$), що фактично запровадило ціновий сигнал за одиницю викидів. У

політико-аналітичних документах щодо внутрішнього судноплавства (*policy roadmap*, *TCO*/сценарії *PLATINA4Action*) розглядаються сценарії поширення аналогічних економічних механізмів і на судна ВВШ – через диференційовані портові збори, доступ до «зеленого» фінансування або потенційні санкції за перевищення цільових показників вуглецевої інтенсивності. Це додатково підсилює вимогу до наявності прозорих і порівнюваних індикаторів енергоефективності саме для внутрішнього флоту [49, 64].

Таким чином, *EEXI* разом із *EEDI* та *CII* формує триланкову систему нормативного регулювання енергоефективності суден на міжнародному рівні.

1.1.2 Системний процесний підхід до управління енергоефективністю

Детальний опис процедури *PDCA* для управління енергоефективністю є загальновідомим і стандартизованим у рекомендаціях *IMO* [31]. Нижче подано його стислий виклад для повноти аналітичної картини; власне наукове значення для цілей дисертації має не сам процесний цикл, а питання *кількісного інструменту* оцінки, який має бути інтегрований у контур *PDCA* для досліджуваних суден – саме цей інструмент на сьогодні відсутній.

Поряд із кількісними індексами, у практиці провідних судноплавних компаній та відповідно до рекомендацій *IMO* сформувався системний підхід до управління енергоефективністю, що будується на циклічній моделі безперервного вдосконалення (*Plan–Do–Check–Act*). Цей підхід охоплює чотири послідовні етапи: планування, впровадження, моніторинг, оцінку та вдосконалення [31].

На етапі планування визначається поточний енергетичний статус судна, формулюються цілі енергоефективності та розробляється перелік конкретних заходів щодо їх досягнення. Об'єктами аналізу на цьому етапі є: навігаційні умови переходів, параметри завантаження судна, технічний стан корпусу, гребного гвинта та рульового пристрою, режими роботи головних та допоміжних двигунів, споживання допоміжних систем (вентиляція, освітлення, рефрижерація) [31].

Етап впровадження передбачає практичну реалізацію затверджених заходів, що включає: призначення відповідальних осіб на борту та в береговому офісі; інформування персоналу про енергетичну політику компанії; визначення необхідного рівня компетентності та проведення відповідного навчання; забезпечення доступу до кращих практик і технологій енергозбереження, прийнятих у галузі [31].

Моніторинг енергоефективності є ключовим елементом усього процесу та передбачає систематичний збір оперативних даних, їх кількісний аналіз та порівняння з установленими цільовими показниками. Джерелами даних слугують добові донесення та рейсові звіти, записи в судових журналах, звіти технічної служби щодо роботи механізмів і систем, результати внутрішніх аудитів та технічних інспекцій [30, 53]. Виявлені відхилення є підставою для формування коригувальних заходів у режимі реального часу.

Завершальний етап – оцінка та вдосконалення – передбачає аналіз ефективності впроваджених заходів, визначення причин недостатньої результативності, формування рекомендацій щодо оптимізації. Результати цього етапу є вхідними даними для наступного циклу планування, що забезпечує безперервне вдосконалення системи управління енергоефективністю [31].

1.1.3 Оперативний моніторинг та інструменти оцінки енергоефективності суден

Ефективне управління споживанням паливно-енергетичних ресурсів неможливе без надійних інструментів оперативного моніторингу. У практиці міжнародного судноплавства виокремлюють кілька видів моніторингу: рейсовий, вахтовий, обліковий та технічний. Кожен із них орієнтований на різні часові горизонти та аспекти функціонування судна.

Для кількісного вимірювання енергоефективності в режимі експлуатації провідну роль відіграє вже згаданий показник *EEOI*, що використовується як основний індикатор у системі звітності більшості великих судноплавних компаній. Дані для розрахунку *EEOI* збираються за стандартизованою формою звітності, яка включає: метод вимірювання витрати палива; витрату палива

кожного типу (*HFO, LFO, MDO, LNG*, метанол тощо); час ходу та відстань переходу; потужність головного двигуна та допоміжних двигунів; характеристики вантажу та розміри судна (*DWT, GT, NT*) [30].

Поряд із *EEOI*, для цілей порівняльного аналізу та бенчмаркінгу активно застосовуються питомі показники витрати палива (*Specific Fuel Oil Consumption – SFOC*) та питомої витрати енергії (*Specific Energy Consumption – SEC*), що дозволяють порівнювати судна різних типів і розмірів. У академічних дослідженнях також використовуються індекси транспортної ефективності (*Transport Efficiency Index – TEI*), що враховують не лише витрату палива, але й провізну здатність та швидкість руху судна [84, 92, 101].

Технічна перевірка судна (енергетичний аудит) є важливим елементом системи оцінки, що передбачає безпосередню інспекцію машинного відділення, суднових механізмів і трубопроводних систем з метою виявлення нераціонального споживання та джерел енергетичних втрат. За результатами аудиту формуються рекомендації щодо оптимізації загального енергоспоживання на борту, що слугують підставою для коригування плану заходів з підвищення енергоефективності [31].

1.1.4 Специфіка оцінки енергоефективності у внутрішньому судноплаванні

Попри значний прогрес у регулюванні енергоефективності морського судноплавства, сфера внутрішніх водних шляхів (ВВШ) залишається суттєво менш урегульованою в аспекті стандартизованих методів оцінки. Правові рамки для внутрішнього судноплавства у Європі визначаються передусім Директивою ЄС 2016/1629 та технічними стандартами Центральної комісії з судноплавства по Рейну (ЦКСР), проте вони не містять вимог, аналогічних *EEDI* чи *CII* для морських суден [7, 12].

Сучасні політичні документи (*PLATINA3, PLATINA4Action*) розглядають внутрішнє судноплавство не ізольовано, а як елемент єдиного транспортного простору, в якому застосовуються схожі принципи декарбонізаційної політики для морського та внутрішнього флоту. Таким чином формуються «містки» між

регуляторною рамкою для морського судноплавства (*EEDI/EEXI/CII*, включення морських перевезень до *EU ETS*) та вектором скорочення викидів і підвищення енергоефективності для суден внутрішніх водних шляхів [3, 5].

Водночас низка особливостей внутрішнього судноплавства суттєво ускладнює пряме перенесення морських методологій оцінки. По-перше, умови руху суден на внутрішніх водних шляхах значно більш змінні порівняно з відкритим морем: рівень води, течія, ширина та глибина фарватеру безпосередньо впливають на опір руху та, відповідно, на витрату палива. По-друге, довжина рейсів є суттєво меншою, а навантаження суден може змінюватись значно частіше. По-третє, більшість річкових суден має значно менші розміри та потужність порівняно з морськими, що зумовлює інші діапазони значень показників і потребує адаптованих критеріїв оцінки [11, 90].

В академічних дослідженнях, присвячених енергоефективності внутрішнього судноплавства, застосовуються як адаптовані версії морських індексів (зокрема, модифікований *EEOI* для річкових суден), так і оригінальні показники, що враховують специфіку річкових умов: коефіцієнти гідравлічного опору, показники використання потужності двигуна у функції від осадки судна та завантаження, індекси паливної ефективності з урахуванням швидкості течії [11, 38, 39, 83]. Проте єдиного загальновизнаного методу оцінки для внутрішнього судноплавства на сьогодні не існує, що підкреслює актуальність та наукову значущість завдань, що вирішуються у цій дисертаційній роботі.

Таким чином, аналіз існуючих підходів до оцінки енергоефективності суден свідчить про наявність розвиненого методологічного апарату для морського судноплавства (*EEDI*, *EEOI*, *CII*), що ґрунтується на міжнародній нормативній базі *IMO*, та водночас про суттєву недостатність стандартизованих методів оцінки для внутрішнього водного транспорту. Розробка науково обґрунтованого способу оцінки енергоефективності руху суден у внутрішньому судноплавстві, що враховує специфіку умов експлуатації на внутрішніх водних шляхах в цілому та зокрема, на ВВШ України, є актуальним науковим завданням, вирішенню якого присвячена дана дисертаційна робота.

Таблиця 1.1 – Систематизація наявного інструментарію оцінки енергоефективності суден: типологія, юрисдикційний статус та застосовність до досліджуваних суден з караванами на Дунаї

№	Інструмент, документ	Тип	Об'єкт оцінки, одиниці	Регулювання	Статус	Чинний	Застосовність до досліджуваних суден
А. Нормативно-конструктивні індекси ІМО							
1	<i>EEDI</i> (Energy Efficiency Design Index)	Проектний, конструктивний	Нове судно; $\text{гСО}_2/(\text{т} \cdot \text{мор.м})$	ІМО, MARPOL Annex VI, Ch. 4	О	з 2013; фази 1–3 до 2025 +	✗ (для судна фіксованої геометрії корпусу та проектним дедвейтом)
2	<i>EEXI</i> (Energy Efficiency Existing Ship Index)	Конструктивний, технічний (ретроспективний)	Існуюче судно; $\text{гСО}_2/(\text{т} \cdot \text{мор.м})$	ІМО, МЕРС.328(76)	О	з 01.01 2023	✗ (для судна фіксованої геометрії та проектним дедвейтом)
3	<i>CII</i> (Carbon Intensity Indicator) + рейтинг А–Е	Операційно-річний	Судно/рік; $\text{гСО}_2/(\text{т} \cdot \text{мор.м})$	ІМО, МЕРС.328(76)	О	з 2023; щорічне зниження 2 %	✗ (річне усереднення за рейтингом відносно базового рівня по типах морських суден)
4	<i>SEEMP</i> (Ship Energy Efficiency Management Plan)	Управлінсько-процесний (PDCA)	Судно, компанія; набір заходів	ІМО, МЕРС.213(63) МЕРС.346(78)	О	з 2013 (ч. I), з 2023 (ч. III)	✗ (спирається на <i>EEDI/EEXI/CII</i> , які є непридатними до суден з караванами змінної конфігурації)
Б. Операційні індекси фактичної енергоефективності							
5	<i>EEOI</i> (Energy Efficiency Operational Indicator)	Операційний (рейсовий)	Судно/рейс; $\text{гСО}_2/(\text{т} \cdot \text{мор.м})$	ІМО, МЕРС.1/Circ. 684	Р	з 2009	✗ (математична невизначеність при $m_{\text{cargo}} = 0$; не нормує на гідрологічні умови)
6	<i>EEO</i> (Energy Efficiency in Operation) – Kalajdžić, Vasilev, Momčilović [39]	Операційний, адаптований для ВВС	Судно/рейс або ділянка; $\text{гСО}_2/(\text{т} \cdot \text{км})$	Академічна розробка (Белградський університет)	Д	2022 – 2023	● (часткове рішення; є недоліки: 1 – варіація 40–60 % при коливаннях ВСП/НСР без механізму корекції; 2 – не

№	Інструмент, документ	Тип	Об'єкт оцінки, одиниці	Регулювання	Статус	Чинний	Застосовність до досліджуваних суден
							охоплює змінний склад каравану
7	Базові питомі показники (<i>SFOC</i> , <i>SEC</i> , <i>TEI</i>)	Допоміжні операційно-технічні	Двигун / судно; г/(кВт·год); МДж/(т·км); комбіновані	Загальноінженерні / академічні розробки	Р / Д	–	● (придатні як вхідні параметри, але не є інтегральними показниками енергоефективності)
В. Адаптації / методологічні пропозиції для ВВС							
8	<i>EEDI_{Binnen}</i> (CESNI) [11]	Проектно-конструктивний, адаптований	Судно ВВС; $ГСО_2/(т·км)$	CESNI (експертна група з технічних питань)	М	пропозиція 2021 р.	× (зберігає обмеження <i>EEDI</i> щодо фіксованої геометрії; потребує масштабної верифікації; не охоплює караван змінної форми)
9	Гідродинамічні дослідження караванів (Zentari et al., Ringsberg et al., Koh & Yasukawa, Tabaczek et al.) [41, 62, 79, 80]	Гідродинамічний (модельний / числовий)	Конфігурація каравану; опір, потужність	–	Д	2007 – 2023	● (встановлено зміни опору руху залежно від <i>H/d</i> та конфігурацій караванів; не пропонується інтегрального показника енергоефективності)
10	Модель <i>ShipCLEAN-IWV</i> (Chalmers; Ringsberg, Zhang, Thies) [80]	Гібридний (енергетично-гідродинамічний)	Судно або штовхач+баржі; витрата, викиди	Академічна (Chalmers University of Technology)	Д	2023	● (комплексна модель для ВВС (похибка 5,2–8 %), однак не враховує експлуатаційний профіль рейсу і змінний протягом рейсу склад каравану)
11	Дослідження флоту України (Rogozin, Marunych, Riabchenko) [59]	Емпіричний порівняльний	Штовхачі, самохідні судна, залізниця; питоме енергоспоживання	Національне академічне дослідження	Д	2021	● (зазначено фактор фактичного завантаження ВВТ України, без методики врахування гідрологічних

№	Інструмент, документ	Тип	Об'єкт оцінки, одиниці	Регулювання	Статус	Чинний	Застосовність до досліджуваних суден
							умов та змінного складу каравану)
12	Китайський <i>IW-EEDI</i> (адаптація <i>EEDI</i> для ВВТ КНР): (огляд – Mao & Meng, ICCT, 2022)	Проектно-конструктивний, адаптований	Нове судно ВВТ КНР; $\text{гСО}_2/(\text{т} \cdot \text{км})$	Standard JT/T 827-2012 (Ministry of Transport PRC); CCS «Rules for Green Inland Waterway Ships» 2020 (China Classification Society)	О (локальний, КНР)	з 2012 (JT/T 827); з 2020 (CCS)	Х (обмежено новими суднами; відсутній операційний показник; не передбачає нормування на гідрологічні умови та змінні конфігурації караванів)
Г. Регуляторно-програмні документи ЄС і Дунайського регіону							
13	European Green Deal (COM(2019) 640)	Рамковий стратегічний	Транспорт у цілому	Єврокомісія	С	2019 – 2050	Х (не містить методології оцінки; формує цільовий вектор)
14	NAIADES III (COM(2021) 324)	Галузевий план дій ЄК для ВВС	35 заходів 2021–2027; анонсує «індекс енергоефективності для ВВС»	Єврокомісія	С	2021 – 2027	Х (не надає методології; підтверджує запит на розробку, яку виконує ця дисертація)
15	Проект GRENDL (Green and Efficient Danube Fleet)	Галузевий дослідницький (Дунайський регіон)	Флот Дунаю; концептуальні «зелені» судна	Danube Transnational Programme / Pro Danube International	Д	2018 – 2020	● (джерело даних, надає фактичну характеристику флоту; не пропонує інструмент)
16	Звіт PLATINA3 / D2.6 – п'ятирівнева концепція (рівні А–Е)	Методологічна концепція	Рівень В ($\text{Вт} \cdot \text{год}$, $\text{гСО}_2/(\text{кВт} \cdot \text{год})$), рівень С (гідродинаміка, $\text{гСО}_2/(\text{т} \cdot \text{км})$), рівень D (сервісна ефективність)	Horizon 2020, консорціум PLATINA3	М	2022	● (містить релевантні рівні С і D, але методологія не завершена, що створює нішу для цієї дисертації)
Умовні позначення статусів: О – обов'язковий; Р – рекомендований/добровільний; М – методологічна пропозиція (не затверджена); Д – дослідницька/академічна розробка; С – стратегічно-програмний документ; застосовності: Х – непридатний, ● – частково придатний, ✓ – придатний							

Систематизація існуючого інструментарію та документів, наведена у Табл. 1.1, показує, що:

- з 16 розглянутих інструментів жоден не є придатним до оцінки енергоефективності досліджуваних суден з караванами;
- 9 інструментів не є готовими для оцінки енергоефективності досліджуваних суден (X) через принципову непридатність їхньої методологічної рамки – розглядаються виключно для об’єктів фіксованої геометрії без можливості змін конфігурації протягом рейсу, відсутні гідрологічні корекції для врахування руху в змінних навігаційних умовах або взагалі не містять інструменту вимірювання;
- решта 7 інструментів є частково придатними (●) з різних часткових підстав, охоплюють лише окремий аспект (базові питомі показники, гідродинамічні моделі), містять незавершену методологію (*EEDI_{Binnen}*, *PLATINA3/D2.6* рівні C і D) або є джерелами емпіричних даних без власного інструменту вимірювання (*GRENDEL*, дослідження Рогозіна та ін.).

Відсутність позитивної оцінки (✓) у колонці застосовності є кількісним обґрунтуванням методологічного розриву, детальна характеристика якого надається у [підрозділі 1.4](#).

1.2 Самохідні судна та штовхачі з караванами барж як специфічний об’єкт оцінки енергоефективності

1.2.1 Світовий досвід оцінки енергоефективності караванів у внутрішньому суднопластві

На відміну від морських суден з автономною експлуатацією, у внутрішньому суднопластві значну частку становлять каравани. Питання оцінки енергоефективності суден, що працюють у складі караванів, є значно менш опрацьованим у міжнародній науковій літературі порівняно з морськими суднами. Відсутність відповідної обов’язкової нормативної бази щодо внутрішнього судноплавства, а також суттєва різноманітність умов експлуатації на внутрішніх водних шляхах різних країн світу зумовили фрагментарність і несистемність накопиченого досвіду. Тим не менш, ряд значущих наукових

розробок і нормативних ініціатив останнього десятиліття окреслює загальні контури формування методологічних підходів до оцінки енергоефективності цього класу суден.

У подальшому викладі під *досліджуваними суднами внутрішнього судноплавства* розумітимуться самохідні судна (як поодинокі, так і у складі караванів барж) та штовхачі з караванами несамохідних барж, що працюють на ділянках Дунаю. Для скорочення викладу ці конфігурації флоту надалі узагальнено позначаються термінами «досліджувані судна» або «судна, що працюють у складі караванів», якщо інше не обумовлено спеціально.

Перший і найбільш системний нормативний крок у цьому напрямку здійснений Європейським комітетом зі стандартів у галузі внутрішнього судноплавства (*CESNI*). У 2021 році у рамках дослідницького проєкту, виконаного за замовленням Федерального міністерства транспорту Німеччини, розроблено концепцію індексу $EEDI_{Binnen}$ (нім. *Binnen* – «внутрішній») – адаптованого аналога морського *EEDI* для суден внутрішнього судноплавства [11]. Концепція охоплює всі основні класи суден внутрішніх водних шляхів, включаючи каравани барж з штовхачами (*Schubverbände*), і пропонує трендові лінії $EEDI_{Binnen}$ для кожного типу суден окремо. Принциповою відмінністю від морського *EEDI* є те, що $EEDI_{Binnen}$ враховує залежність потужності двигуна від швидкості течії та глибини фарватеру – параметрів, відсутніх у морській методології. Разом з тим, документ *CESNI* прямо визнає, що концепція потребує масштабної верифікації на натурних даних і не є готовою до обов’язкового застосування.

На рівні академічних досліджень суттєвий внесок у розробку методів оцінки енергоефективності для суден дунайського та рейнського басейнів зробили сербські вчені. *Kalajdžić M.*, *Vasilev M.* та *Momčilović N.* у своїй роботі [38] виконали порівняльний огляд наявних методів оцінки енергоефективності для суден внутрішнього судноплавства та апробували два підходи на основі адаптованого *EEDI* на даних типового вантажного судна дунайського класу. Автори встановили, що обидва методи дають суттєво різні результати, що

ускладнює їх безпосереднє порівняння та підкреслює незрілість методологічного базису в цій сфері. У подальшій роботі [39] тими ж авторами введено поняття енергоефективності в експлуатації (*Energy Efficiency in Operation, EEO*) для суден внутрішнього плавання, що ґрунтується на реальних оперативних даних відстеження рейсів та обліку витрати палива по ділянках маршруту. Принципово важливо, що дослідники встановили значну залежність показника *EEO* від рівня води (*HIGH/LOW Navigation Water Level* – відповідно високий судноплавний та рівень, ВСП, та низький судноплавний рівень, НСП), що є прямим підтвердженням неможливості застосування сталих нормативних критеріїв без урахування гідрологічних умов.

У контексті окремого розгляду штовхачів з баржевими караванами для аналізу гідродинаміки й ефектів обмеженої глибини важливою є праця [77], у якій приведено опис та результати систематичних модельних і числових досліджень гідродинамічного опору та характеристик рушійного комплексу для трьох типових конфігурацій караванів (1:1, 2:1, 2:2) в умовах глибокої та мілкої води [19, 80]. Результати показали, що компоновання барж суттєво впливає на опір і пропульсивні характеристики: для конфігурації 2:2 вони виявились найнижчими серед досліджених варіантів. Крім того, встановлено, що при зменшенні відношення глибини до приведеної осадки каравану $H/d \leq 2,0$ спостерігається суттєве зростання коефіцієнту опору тертя. Відповідно, опір руху зростає нелінійно, що безпосередньо свідчить про відхилення від *ITTC* (стандартний метод *ITTC-1957* для розрахунку коефіцієнта тертя корпусу судна) при малих відношеннях H/d (зокрема $H/d \leq 2,0$).

У контексті моделювання енергоспоживання суден внутрішнього плавання також важливою є праця [80], у якій представлено модель *ShipCLEAN-IWV* як один із перших комплексних інструментів енергетичного аналізу, спеціально розроблених для суден внутрішнього плавання. Модель має модульну структуру та поєднує розрахунок опору й пропульсивних характеристик (як поодинокого судна, так й у каравані з несамохідними баржами) в обмежених по глибині й ширині умовах з моделюванням роботи

рушійного комплексу. Верифікація показала, що похибка прогнозу опору становить близько 5,2 % для поодиноких суден і 8 % для штовхачів з баржами відносно модельних даних, що автори розглядають як прийнятну точність для задач попереднього енергетичного аналізу. Водночас підкреслюється, що подальший розвиток моделі необхідний для більш повного врахування змінного складу каравану, варіативних швидкостей та умов руху на внутрішніх водних шляхах.

Показовим є приклад Великобританії: попри розвинену цільову політику декарбонізації (*Clean Maritime Plan*, *UK SHORE*, дорожня карта *PLA*), нормована методика оцінювання енергоефективності для внутрішнього судноплавства відсутня. Внутрішні судна регулюються двигунними нормами викидів забруднювачів (*Stage V/NRMM* для двигунів від 19 кВт; *MARPOL Annex VI* для суден від 130 кВт у припливних водах), тоді як власне індекси енергоефективності (*EEDI*, *EEXI*, *CII*) поширюються лише на судна від 400 рег. т у міжнародному плаванні, а схема торгівлі викидами (з 2026 р.) – від 5000 рег. т. Унаслідок дерогації від технічних вимог Директиви ЄС про внутрішнє судноплавство європейський каркас також не застосовується. Це підтверджує універсальний, а не суто регіональний характер виявленого методологічного пробілу: операційне нормоване оцінювання енергоефективності внутрішніх суден, тим паче з урахуванням мілководних умов (H/d), не реалізоване навіть у розвинених юрисдикціях.

Поза європейським басейном підходи до оцінювання енергоефективності суден внутрішнього плавання залишаються ще менш стандартизованими. У Китаї запроваджено адаптований до внутрішніх водних шляхів стандарт на основі морського *EEDI* [45], однак його застосування фактично обмежується новими суднами і не супроводжується розробкою детальних експлуатаційних індикаторів на кшталт *EEOI* чи *EEO*. У США, В'єтнамі та Великобританії питання енергоефективності ВВТ переважно інтегровані в широкі рамки кліматичної та транспортної політики (інвентаризації викидів, програми модернізації флоту, національні *ETS*), тоді як спеціалізовані методики

розрахунку показників енергоефективності для суден у мілководних умовах практично не розроблені. При цьому каравани внутрішнього плавання також є предметом численних гідродинамічних досліджень. Зокрема, у низці робіт [5, 40, 62] виконано експериментальні та числові дослідження систем штовхач-баржи у мілководді, де аналізується вплив конфігурації каравану та відношення глибини до осадки на опір руху й маневрові характеристики, а також показано суттєве зростання опору при малих значеннях H/d . Разом з тим ці дослідження зосереджені переважно на визначенні гідродинамічних сил і моментів та удосконаленні методів прогнозування опору, не пропонуючи окремих експлуатаційних індексів енергоефективності для караванів, що ще раз підкреслює наявний методологічний розрив між детальними моделями опору та інтегральними показниками енергетичної ефективності.

Для внутрішніх водних шляхів України певний внесок в аналіз енергоефективності транспортних засобів ВВШ зробили Рогозін А. та співавтори [59], які порівняли теоретичне та фактичне питоме енергоспоживання штовхачів з баржами, самохідних суден і залізничного транспорту при перевезеннях сільськогосподарських вантажів внутрішніми водними шляхами України. Встановлено, що штовхачі з баржами мають найкращі технічні показники енергоефективності серед розглянутих видів транспорту, проте фактично низький практичний рівень завантаженості флоту в Україні (за даними галузевих експертних оцінок у 2017 році фактичне завантаження не перевищувало 65 % від проектного) суттєво знижує реальну енергоефективність.

Узагальнення наведеного досвіду дозволяє констатувати: незважаючи на певний прогрес у формуванні методологічного підґрунтя, не сформовано жодного загальновизнаного стандартизованого методу оцінки енергетичної ефективності специфічно для суден, що працюють у складі караванів, у міжнародній практиці. Наявні підходи або є адаптаціями морських індексів без урахування змінності складу каравану, або зосереджені на гідродинамічній складовій без зв'язку з оперативними показниками енергоефективності. Це підтверджує наукову актуальність розробки комплексного способу оцінки

енергоефективності, адаптованого до умов руху караванів на внутрішніх водних шляхах.

1.2.2 Типові схеми роботи самохідних суден з караванами несамохідних барж

У цьому підрозділі подано стислу характеристику типових конфігурацій караванів, що є необхідною для обґрунтування специфіки об'єкта оцінки енергоефективності. Детальний аналіз навігаційно-експлуатаційних умов дунайського судноплавства, включаючи характеристики ділянок водного шляху, гідрологічний режим та допустимі форми караванів по ділянках, виконано у [розділі 2](#).

Каравани несамохідних барж, що приводяться до руху штовхачем або самохідним вантажним судном є базовою одиницею вантажних перевезень на внутрішніх водних шляхах України, Дунаю та низки інших річкових систем Центральної і Східної Європи. На відміну від самохідних суден, штовхачі конструктивно не призначені для самостійного перевезення вантажу і реалізують свою транспортну функцію виключно у зчепленні з однією або декількома баржами. Така принципова ознака визначає радикальну відмінність умов їх роботи від будь-якого іншого класу суден і ставить їх в окрему категорію з точки зору оцінки енергоефективності.

За конфігурацією каравану в практиці внутрішнього судноплавства виокремлюють кілька типових схем. Одинарна схема (1:1) – одна самохідна одиниця (штовхач або самохідне вантажне судно) і одна баржа – застосовується переважно на ділянках з обмеженими габаритами фарватеру, у шлюзованих каналах або під час портових маневрів. Якщо самохідна одиниця – це вантажне судно, то приєднання баржі може бути як поздовжнім, так і поперечним; у разі штовхача використовується поздовжня схема. Подвійна поздовжня схема (2:1) – дві баржі, з'єднані послідовно перед самохідною одиницею, – є поширеною для типових річкових маршрутів. Поперечна схема (1:2) – дві баржі в одному поперечному ряду перед штовхачем – застосовується на ділянках із достатньою шириною фарватеру. Схема «флот» (2:2) передбачає два ряди по дві баржі

паралельно, що застосовується при перевезеннях насипних вантажів великими водними артеріями з достатніми глибинами. На ділянках, де дозволяють навігаційні умови, використовуються також схеми (3:2), (2:3) [59, 94, 99], (3:3) й навіть (3:4) барж при перевезеннях великих партій вантажів на Нижньому Дунаї, рис. 1.1 [94, 99].

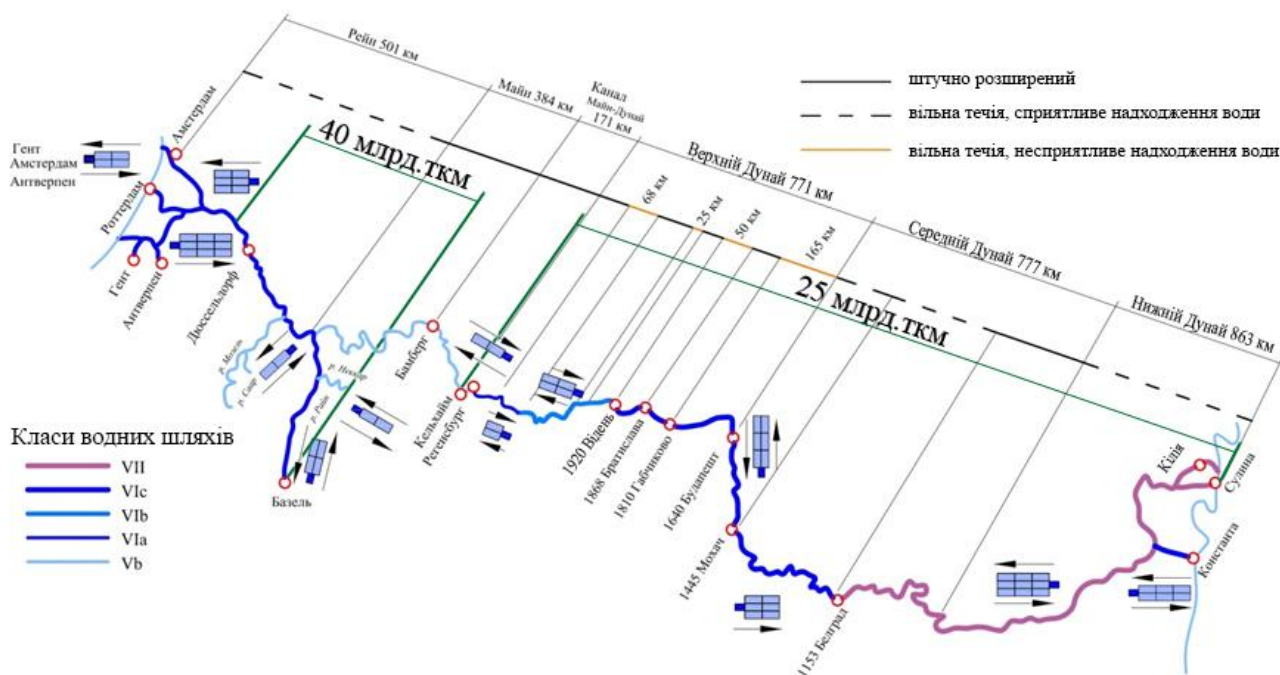


Рисунок 1.1 – Схема водних шляхів Європи та допустимі форми караванів по ділянках [94]

Зі збільшенням кількості барж у поперечному та поздовжньому напрямках змінюються як гідродинамічні характеристики каравану, так і фактичні показники енергоефективності, що потребує окремого врахування при розрахунках. Слід підкреслити, що склад та форма побудови каравану може змінюватись у ході одного рейсу: відчеплення або причеплення барж у проміжних портах та при проходженні вузькостей утворює ступінчастий профіль навантаження за рейсом, що є принципово важливим для коректної оцінки енергоефективності в експлуатаційних умовах.

Дунайський транспортний флот, що є основним об'єктом дослідження цієї роботи, налічує близько 5 основних типів суден: самохідні пасажирські судна (≈ 200 од.), самохідні суховантажні (≈ 400 од.), самохідні наливні (≈ 35 од.), несамохідні баржі (≈ 2300 од.) та буксири і штовхачі (≈ 680 од.) [99]. Таким

чином, несамохідні баржі та штовхачі разом становлять близько 88 % одиниць вантажного флоту, що підкреслює визначальну роль штовхано-баржових систем у дунайському судноплаванні. За даними операторів, зокрема ПрАТ «Українське Дунайське пароплавство», коефіцієнт використання потужності штовхачів у середньому становить 0,60–0,75 (у глибоководних умовах – 0,70–0,75) [99]. Характерні швидкості руху штовхачів з навантаженими караванами на Дунаї складають від 9 км/год до 13 км/год проти течії та від 16 км/год до 20 км/год за течією, причому для мілководних ділянок та великих караванів розрахунковий діапазон зміщується до нижніх меж зазначених інтервалів [99]. Питома витрата палива штовхачами з караванами становить у середньому від 0,25 л/(кВт·год) до 0,35 л/(кВт·год), а за експертними оцінками для умов Дунаю реальне середнє значення є нижчим і складає орієнтовно 0,15 л/(кВт·год) [99]. Розподіл часу типового дунайського рейсу штовхача протяжністю від 1800 км до 2000 км за характерними етапами є таким: рух у повному складі каравану – 65–75 %; зупинки – 2,5–3,5 %; проводка частини каравану через критичні ділянки – 10–15 %; маневрування поодинокого штовхача під час проводок і паузок – 2,5–3,5 % [99]. Наведений розподіл принципово відрізняється від аналогічного показника для поодиноких самохідних суден, для яких характерне співвідношення 87 % часу руху з вантажем і 17 % – порожнього переходу без зміни складу об'єкта оцінки. Детальні технічні характеристики типових штовхачів і барж дунайського флоту, схеми допустимих форм караванів по ділянках та прогнозні дані розподілу кількісного складу флоту наведено у [Додатку В](#).

1.2.3 Профілі рейсів на внутрішніх водних шляхах

Характерною особливістю рейсового профілю досліджуваних суден є його дискретний та нерівномірний характер. Типовий рейс включає щонайменше чотири принципово різні фази, кожна з яких характеризується власним режимом роботи головної енергетичної установки (ГЕУ): ходовий режим (транзитний перехід між портами), маневровий режим (швартування, відхід від причалу, прохід шлюзів, проводки), режим очікування (рейдове стояння, очікування

шлюзування або вікна в порту), а також режим стоянки під вантажними операціями.

На внутрішніх водних шляхах України – насамперед на Дніпрі та Дунайському коридорі – тривалість ходового режиму у загальному балансі часу рейсу залежить від маршруту. Для транзитних рейсів Дніпром (наприклад, Кременчук – Миколаїв) ходовий час може сягати 60–70 % загального часу рейсу, тоді як для рейсів із заходом у кілька малих портів – знижуватись до 35–45 %. Суттєвим чинником є шлюзування: проходження одного шлюзового ступеня (з урахуванням очікування в голові шлюзу) займає від 40 хвилин до 3–4 годин залежно від завантаженості. На Нижньому Дніпрі (нижче Каховки) до 2023 року шлюзів не було, що принципово змінювало структуру рейсу і режими роботи ГЕУ. Після підриву у 2023 році Каховської ГЕС судноплавства на Нижньому Дніпрі немає. Водний шлях Дунаю характеризується відсутністю шлюзів на вітчизняній частині, хоча шлюзування присутнє в Румунії та інших країнах Нижнього і Середнього Дунаю. При цьому Дунай характеризується значним впливом сезонних коливань рівня води і течії [93].

Важливим фактором, що формує профіль рейсу, є напрямок руху: рух вгору проти течії і вниз за течією принципово відрізняються за режимом роботи двигуна. Для штовхача з навантаженим караваном при русі проти течії потужність двигуна може зростати (орієнтовно на 25–45 %) порівняно з рухом за течією при однаковій швидкості відносно берега [39]. Це означає, що *EEOI*, розрахований окремо для рейсу за течією і рейсу проти течії, може відрізнятись у рази навіть для однакового складу каравану та маршруту, що фактично унеможливорює коректне порівняння рейсів без нормування на гідрологічні умови.

1.2.4 Режим роботи головної енергетичної установки самохідного судна або штовхача

Головна енергетична установка (ГЕУ) досліджуваних суден функціонує у значно ширшому діапазоні режимів порівняно з морськими суднами подібного класу потужності. Це пов'язано з мінливістю опору руху каравану, яка

визначається трьома основними групами факторів: параметрами каравану (кількість і завантаженість барж), гідрологічними умовами (рівень води, швидкість течії, ефекти мілководдя) та навігаційними вимогами маршруту (маневрування, шлюзування).

У ходовому режимі при сталому русі штовхач або самохідне вантажне судно, що веде караван, зазвичай працює в діапазоні від 60 % до 85 % від максимальної тривалої потужності (МТП). Суттєво, що при зниженні рівня води та збільшенні ефекту мілководдя двигун змушений розвивати вищу потужність для підтримання тієї самої швидкості. За даними систематичних модельних і числових досліджень (*Zentari et al.*, 2022; досліджені відношення $H/d = \infty; 2,0; 1,5; 1,2$) ефект мілководдя стає значущим уже при $H/d \leq 2,0$ (коефіцієнт тертя зростає, метод *ITTC* занижує опір), а за найменшого дослідженого відношення $H/d \approx 1,2$ повний опір руху каравану зростає різко нелінійно – за оцінками різних авторів, до 1,5–2,5 раза порівняно з глибокою водою [79]. Це означає, що при низьких рівнях води ГЕУ досліджуваного судна може тривалий час працювати на форсованому режимі (від 95 % до 100 % МТП), що веде до підвищеної питомої витрати палива та прискореного зносу механізмів.

У маневровому режимі – під час швартування, проходження шлюзів, відходу від причалу – ГЕУ характеризується частими змінами частоти обертання, можливою роботою на заднє і переднє переміщення, а також використанням підрулюючих пристроїв. У цих режимах двигун часто навантажений у діапазоні 20–50 % МТП і працює з низьким ККД. Тривалість маневрового режиму відносно невелика, але його питома витрата палива SFC (г/кВт·год) може перевищувати витрату ходового режиму на 15–30 % через роботу двигуна поза оптимальним навантаженням.

Режим очікування (холостий хід або мінімальне навантаження на допоміжні системи) характеризується роботою ГЕУ на мінімальних оборотах або повною зупинкою головних двигунів із переходом на допоміжні дизель-генератори. Частка режиму очікування у загальному часі рейсу суттєво залежить від організації перевізного процесу: за даними *Kalajdžić et al.* (2023), для

типового дунайського вантажного судна частка часу стоянки в портах може перевищувати 57 % від загального календарного часу, що радикально знижує реальний коефіцієнт енергоефективності порівняно з проєктними показниками [39].

Таким чином, розподіл часу між режимами (ходовим, маневровим, очікування, стоянка) і форсовані стани ГЕУ у мілководді істотно впливають на експлуатаційні показники енергоефективності (*EEOI*, *EEO*) і мають враховуватися при їх розрахунку для досліджуваних суден.

Щодо технічних характеристик, штовхачі, що експлуатуються на внутрішніх водних шляхах України, як правило, обладнані чотиритактними середньообертовими дизельними двигунами потужністю від 440 до 2×1200 кВт. Пропульсивний комплекс зазвичай включає два гребних гвинти у насадках (типу *Ka-470* або аналогічних) та керма-насадки. Наявність насадки підвищує ефективність пропульсивного комплексу при частковому завантаженні приблизно на 10–15 %, що є суттєвою перевагою для режимів із неповним складом каравану або при навігації в умовах мілководдя [48].

1.2.5 Невідповідність стандартних методів оцінки умовам роботи караванів

Аналіз особливостей експлуатації досліджуваних суден, що ведуть караван барж, виявляє комплекс системних причин, з яких жоден із розглянутих у підрозділі 1.1 стандартних методів оцінки енергоефективності не може бути безпосередньо застосований до цього класу суден без принципових модифікацій.

По-перше, змінність об'єкта оцінки. *EEDI* і *EEXI* розраховуються для конкретного судна з фіксованими геометричними характеристиками. Для системи «штовхач + караван барж» або «самохідне вантажне судно + караван барж» об'єкт оцінки є нестаціонарним: кількість, тип і завантаженість барж у каравані можуть змінюватись від рейсу до рейсу і навіть у межах одного рейсу. Відповідно, поняття «проєктного дедвейту» або «розрахункової швидкості» для такої системи не має однозначного фізичного сенсу.

По-друге, залежність від умов навігації. *EEOI* нормує викиди CO_2 на одиницю транспортної роботи (тонно-миля), але не враховує гідрологічні умови рейсу – рівень води та швидкість течії. Як показано вище, та сама транспортна робота може бути виконана штовхачем з принципово різними витратами палива залежно від рівня води. *Kalajdžić et al* (2023) прямо підтверджують: значення *EEO* для одного судна при коливаннях НСР/ВСР можуть відрізнятись на 40–60 % [39], що унеможлиблює побудову єдиного критерію без гідрологічної корекції.

По-третє, відсутність транспортної роботи в частині рейсів. Баластові переходи (порожні баржі або рух без каравану) є невід’ємною частиною транспортного процесу досліджуваного судна, однак у формулі *EEOI* вони не генерують транспортну роботу ($m_{\text{cargo}} = 0$), що робить показник математично невизначеним або нескінченним (ділення на нуль у знаменнику). Формальне вирішення цієї проблеми, запропоноване *ІМО* (включення баластових рейсів до загальної суми), спотворює порівнянність показників для суден з різними частками баластових переходів.

По-четверте, масштабний ефект каравану. Питома енергоефективність системи «досліджуване судно + N барж» зростає зі збільшенням N не лінійно: через зменшення питомого гідродинамічного опору на одиницю вантажу та незмінну (або незначно більшу) потужність ГЕУ. Однак цей ефект «масштабу каравану» не відображено в жодному зі стандартних показників енергоефективності, що ускладнює бенчмаркінг караванів різних розмірів. *Zentari et al* (2022) встановили, що конфігурація 2:2 демонструє найнижчу питому потужність на одиницю корисного навантаження, проте застосовна лише за достатньої глибини фарватеру [79].

Сукупність наведених чинників обґрунтовує необхідність розробки спеціального науково обґрунтованого способу оцінки енергоефективності руху суден у внутрішньому судноплавстві, що враховує змінність складу каравану, гідрологічні умови рейсу та реальний профіль роботи ГЕУ. Вирішення цього завдання є предметом дослідження даної дисертаційної роботи.

1.3 Вимоги до оцінки енергоефективності суден внутрішнього плавання в контексті декарбонізаційних стратегій ЄС та Дунайського регіону

1.3.1 Стратегічне підґрунтя: European Green Deal та транспортна політика ЄС щодо внутрішнього судноплавства

Прийняття Європейського зеленого курсу (*European Green Deal*, COM(2019)640) у грудні 2019 року визначило принципово нову регуляторну парадигму для транспортного сектору ЄС, у межах якої внутрішнє водне судноплавство (BBC) вперше отримало статус пріоритетного інструменту декарбонізації вантажних перевезень. Зелений курс зобов'язав здійснити кардинальне скорочення викидів парникових газів від транспорту, а стратегія сталої та розумної мобільності (COM(2020)789) конкретизувала кількісні цілі: збільшення обсягів вантажних перевезень внутрішніми водними шляхами та морем на 25 % до 2030 року і на 50 % до 2050 року порівняно з базовим рівнем 2020 року [20]. Паралельно Програма дій «Нульове забруднення» (COM(2021)400) встановила вимоги щодо повної ліквідації шкідливих викидів від суден у горизонті до 2050 року.

Ключовим галузевим документом, що операціоналізує ці цілі для BBC, є план дій *NAIADES III* (COM(2021)324), прийнятий Єврокомісією у червні 2021 року і що охоплює 35 конкретних заходів на 2021–2027 роки [20]. Серед пріоритетів плану – стимулювання переходу до нульових викидів суден до 2050 року, підтримка суднобудівних та ретрофітних технологій на альтернативних видах палива, розвиток мультимодальної інфраструктури, а також – що принципово важливо для цієї дисертаційної роботи – розроблення інструменту моніторингу та звітності щодо вуглецевої інтенсивності суден BBC, прямо анонсованого в документі як аналог морського EEDI для внутрішнього судноплавства [20, виноска 37]. Сам факт включення цього завдання до плану дій ЄК на рівні офіційного повідомлення є прямим нормативним підтвердженням актуальності і своєчасності науково-методологічних досліджень, що виконуються у цій дисертації.

Слід підкреслити, що *NAIADES III* є рамковим стратегічним документом, а не регламентом із безпосередніми юридично обов'язковими вимогами до суден. Він формує пріоритети для наступних законодавчих ініціатив, наукових програм (*Horizon Europe*) та фінансових механізмів (*Connecting Europe Facility, ESIF*). Для України, яка є асоційованим учасником транспортного простору ЄС та Дунайської транспортної системи, вимоги *NAIADES III* визначають вектор гармонізації вітчизняного законодавства у сфері ВВС у середньостроковій перспективі, що надає цим вимогам практичного значення для розробки інструментарію оцінки енергоефективності національного флоту.

1.3.2 Проєкт *GRENDEL* як галузева відповідь Дунайського регіону на декарбонізаційні вимоги

У контексті специфічних проблем дунайського флоту ключовим практичним втіленням стратегічних цілей ЄС став проєкт *GRENDEL (Green and EfficieNt DanubE fLeet)*, реалізований у 2018–2020 роках у межах програми *Danube Transnational Programme* за координації *Pro Danube International* [53]. Проєкт об'єднав судових операторів, судноверфі, логістичних компаній та державні органи з країн Дунайського регіону і безпосередньо зосередився на трьох напрямках: застосування низьковуглецевих та альтернативних видів палива, скорочення викидів CO₂, NO_x та РМ, а також зниження загального споживання енергії.

Для цілей дисертаційного дослідження особливу значимість мають фактичні дані про стан дунайського флоту, задокументовані у матеріалах *GRENDEL*. Флот внутрішнього судноплавства Дунаю характеризується вкрай високим середнім віком: понад 60 % суден побудовані до 1990 року і обладнані двигунами класу *CCNR Stage I* або нижче, що відповідають значно нижчим екологічним стандартам порівняно з сучасними вимогами *Stage V* [53]. Довгий термін служби суден у поєднанні з низькою інвестиційною спроможністю операторів регіону та відсутністю обов'язкових вимог щодо енергоефективності для ВВС призвели до того, що технологічна модернізація флоту відбувається вкрай повільно. Водночас проєкт оцінює незадіяний потенціал зниження

споживання енергії в галузі на рівні від 10 % до 20 %, а скорочення викидів забруднювачів – до 80 % при переході на сучасні технології та альтернативні види палива [53]. Ці цифри підкреслюють масштаб завдання і водночас обумовлюють необхідність надійного інструментарію для вимірювання досягнутого прогресу – тобто саме того, що є предметом цього дисертаційного дослідження.

Концептуальні проекти «зелених» суден, розроблені в рамках *GRENDEL* для різних типів дунайського флоту – включаючи штовхачі та самохідні вантажні судна – акцентують увагу на необхідності врахування операційного профілю судна, конфігурації рушійного комплексу та типового рейсового маршруту при проектуванні ефективних ГЕУ. Ця вимога прямо корелює з висновками підрозділу 1.2 щодо специфіки режимів роботи досліджуваних суден з караванами і підтверджує, що будь-який метод оцінки енергоефективності для дунайського флоту повинен враховувати не лише технічні параметри судна, а й умови його реальної експлуатації.

1.3.3 *PLATINA3/D2.6* як методологічний виклик: п'ятирівнева концепція індексу енергоефективності

Найбільш методологічно релевантним для цього дослідження є звіт *D2.6*, підготовлений у рамках проекту *PLATINA3* (*Horizon 2020*, угода № 101006364) та опублікований у лютому 2022 року [55]. Документ є прямою відповіддю на завдання, сформульоване в *NAIADES III*, і являє собою найповніше на сьогодні узагальнення міжнародного досвіду щодо систем маркування та індексування ЕЕ для суден внутрішнього судноплавства.

Авторський колектив *PLATINA3/D2.6* провів систематичний огляд наявних схем і запропонував п'ятирівневу концепцію інструменту енергоефективності з поетапним впровадженням системи маркування суден внутрішнього судноплавства (*label system*) з віднесенням судна до певного «енергоефективного» або «декарбонізаційного» класу. У документах *PLATINA3* та *PLATINA4Action* пропонується пов'язувати рівень маркування з досягнутими показниками енергоефективності та практикою еконавігації, що фактично

формує для операторів ринку «видимий» сигнал про екологічну якість послуг [24, 55]. Рівень *A* (лише силова установка) та Рівень *E* (мультимодальний ланцюг «від дверей до дверей») визнані нерелевантними на поточному етапі. Для практичного впровадження рекомендовано три рівні: Рівень *B* (всі первинні перетворювачі енергії на борту, метрика – $\text{г CO}_2\text{-екв/кВт}\cdot\text{год}$ у методології *Well-to-Wake*), Рівень *C* (ефективність рушійного комплексу з урахуванням гідродинаміки, метрика – $\text{г CO}_2/\text{т}\cdot\text{км}$ або $\text{г CO}_2/\text{пас}\cdot\text{км}$), Рівень *D* (сервісна ефективність з урахуванням швидкості, коефіцієнта використання вантажності та баластових переходів) [55]. Саме Рівні *C* і *D* є найбільш близькими до задач оцінки енергоефективності руху досліджуваних суден з караванами: Рівень *C* відповідає гідродинамічному аспекту роботи каравану в умовах мілководдя та течії, тоді як рівень *D* відображає операційну ефективність з урахуванням змінного складу конвою та структури рейсу.

Принципово важливим є висновок документа щодо готовності методологій до практичного застосування. Рівень *B* визнано придатним до впровадження у короткостроковій перспективі на всій території ЄС, оскільки необхідні дані переважно вже доступні або можуть бути отримані з незначними витратами. Натомість рівень *C* (який включає гідродинамічну складову – критично важливу для штовхачів з конвоями) потребує суттєвої додаткової наукової роботи: документ прямо зазначає, що «перед практичним застосуванням цього модуля необхідно завершити дослідницьку роботу, заплановану на 2023 рік» [55, с. 8]. Для Рівня *D* рекомендовано створення нейтральної довіреної організації для збору даних і розробки *KPI* для матриці різних сегментів (типи суден, типи вантажів, типи водних шляхів), що підкреслює нерозв'язаність методологічної проблеми та відкритість питання для наукових розробок.

Ще одним ключовим висновком *PLATINA3/D2.6* є визнання принципової відмінності між суднами ВВС і морськими суднами з точки зору вимог до методики. Документ констатує відсутність одностайної методології та критеріїв, нестачу достатніх даних про емісійні характеристики суден ВВС і брак механізмів порівняння суден з різними операційними профілями [55, с. 7]. Для

досліджуваних суден ця проблема є особливо гострою через вже охарактеризовані вище чинники: змінний склад конвою, залежність від гідрологічних умов і дискретний характер режимів ГЕУ.

При цьому окремі документи (*STEERER*, *PLATINA3*, *PLATINA4Action*) вже пропонують дорожні карти переходу *IWT* до *zero-emission* флоту, де внутрішнє судноплавство розглядається як «бенефіціар» декарбонізаційної політики за умови прискореного оновлення флоту й впровадження комбінованих технічних та операційних заходів [3, 26].

1.3.4 Вимоги до способу оцінки енергоефективності, що формуються регуляторним контекстом

Узагальнення проаналізованих стратегічних і методологічних документів дозволяє сформулювати систему вимог до способу оцінки енергоефективності руху суден у внутрішньому судноплавстві, що впливають із регуляторного контексту ЄС та Дунайського регіону.

Перша вимога – вимірюваність і відтворюваність. Метод повинен базуватися на параметрах, доступних для вимірювання в умовах реальної експлуатації без застосування коштовного лабораторного обладнання. *PLATINA3/D2.6* прямо наголошує на необхідності прив'язки методики до даних, що вже збираються або можуть збиратися операторами з мінімальними витратами [55]. Для досліджуваних суден це означає базування на показниках витрати палива, відстані переходу, маси вантажу та параметрах рушійного комплексу.

Друга вимога – облік умов навігації. *NAIADES III* у своєму завданні щодо індексу енергоефективності підкреслює необхідність врахування специфіки різних водних шляхів та умов плавання [20, виноска 37]. *PLATINA3/D2.6* конкретизує цю вимогу через Рівень *D*, що передбачає нормування показника на операційні умови [55]. Для внутрішніх водних шляхів України та Дунаю це означає необхідність включення до методу поправок на рівень води та швидкість течії.

Третя вимога – адаптованість до змінного об'єкта оцінки. Стандарти *CESNI* (*EEDIBinnen*) та концепція *PLATINA3* розроблені переважно для суден з фіксованими технічними характеристиками – самохідних вантажних суден і танкерів [11; 55]. Для досліджуваних суден, де «об'єкт оцінки» змінюється від рейсу до рейсу залежно від складу каравану, жоден із наявних підходів не пропонує готового рішення. Це є головною науковою прогалиною, яку має заповнити цей дисертаційний твір.

Четверта вимога – порівнянність і можливість нормування. Регуляторна ціль *NAIADES* III – забезпечити моніторинг і звітність щодо вуглецевої інтенсивності флоту на рівні ЄС [20]. Це передбачає, що показник енергоефективності повинен бути придатним для порівняння між різними суднами, маршрутами та часовими проміжками. Для внутрішнього судноплавства це суттєво складніше, ніж для морського, через вже охарактеризовану варіативність умов. Розробка підходу до нормованої оцінки енергоефективності руху суден у внутрішньому судноплавстві, що задовольняє цій вимозі, є одним із ключових наукових завдань дисертації.

Окремі аналітичні звіти щодо вимог, бар'єрів та можливостей підтримки галузі додатково фіксують, що одним із ключових стримувальних чинників декарбонізації внутрішнього судноплавства є відсутність прозорих і порівнюваних індикаторів енергоефективності, придатних як для регуляторних цілей, так і для інвестиційних рішень судновласників [65].

Таким чином, аналіз стратегічних і методологічних документів ЄС – *NAIADES* III, *GRENDEL* та *PLATINA3/D2.6* – переконливо свідчить про те, що: по-перше, регуляторне середовище формує чіткий запит на інструментарій оцінки енергоефективності для суден ВВС; по-друге, цей інструментарій на сьогодні перебуває у стані розробки і не містить готових рішень для досліджуваних суден з караванами барж; по-третє, саме методологічна незавершеність та відкритість питання визначають наукову нішу і актуальність завдань цього дисертаційного дослідження.

1.4 Обґрунтування наукової проблеми та вимог до способу оцінки енергоефективності руху суден у внутрішньому судноплавстві

1.4.1 Узагальнення результатів аналізу та виявлення методологічного розриву

Проведений у підрозділах 1.1–1.3 аналіз дозволяє сформулювати цілісну картину стану методологічного забезпечення оцінки енергоефективності суден у внутрішньому судноплавстві та виявити ключовий методологічний розрив, що є науковою підставою для цього дисертаційного дослідження. На підставі проведеного аналізу виокремлено три самостійні групи підходів до оцінки енергоефективності суден, які різняться між собою за предметом оцінки, метричним апаратом та умовами застосовності.

Першу групу утворюють нормативно-конструктивні індекси, розроблені для морського судноплавства, у якому на сьогодні сформовано розвинену триланкову систему нормативних показників енергоефективності: *EEDI* як проєктний індекс для нових суден, *EEXI* як технічний індекс для суден, що вже перебувають в експлуатації, та *CII* як операційний індикатор щорічної вуглецевої інтенсивності [1; 2; 11; 32; 33]. Ці показники базуються на розрахункових характеристиках судна у нормованому стані навантаження й оцінюють потенційну (проєктну) ефективність, а не фактичну, при цьому підкріплені обов'язковою нормативною базою *IMO*, детальними методиками розрахунку, верифікованими на масиві даних глобального флоту, та системою моніторингу і звітності (*SEEMP*, *DCS*). Системний процесний підхід (*PDCA*), закріплений у рекомендаціях *IMO*, забезпечує управлінський контур для реалізації енергозберігаючих заходів на рівні судна та компанії.

Водночас для суден внутрішнього судноплавства ситуація є принципово іншою. Як показано в підрозділі 1.1, Директива ЄС 2016/1629 та стандарти ЦКСР не містять вимог, аналогічних *EEDI* чи *CII* для морських суден. Концепція *EEDI_{Binnen}*, розроблена *CESNI* у 2021 році, залишається на рівні незатвердженої методологічної пропозиції, що потребує масштабної верифікації. Для досліджуваних суден з караванами барж застосування *EEDI_{Binnen}* є принципово

обмеженим, оскільки індекс розраховується для фіксованого судна з фіксованою вантажністю, тоді як об'єкт оцінки у разі «досліджуване судно + караван змінного складу» – не є незмінним навіть в межах одного рейсу, тим більше між різними рейсами [11; 51; 55]. *NALADES III* (2021) прямо анонсує розробку індексу енергоефективності для суден внутрішнього водного транспорту як пріоритетне завдання, але не надає готового інструментарію. Звіт *PLATINA3/D2.6* (2022) констатує відсутність узгодженої методології та критеріїв, а розроблена п'ятирівнева концепція оцінки енергоефективності для рівнів *C* і *D* – найбільш релевантних для штовхачів з баржами – визнана такою, що потребує подальшої наукової роботи для практичного впровадження [52; 55].

Другу групу становлять операційні індекси фактичної енергоефективності, серед яких найбільш значимим є *Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI, IMO)* та його адаптації для ВВС – зокрема, *Energy Efficiency in Operation (EEO)*, запропонований у дослідженнях *Kalajdžić, Vasilev* та *Momčilović* [30, 38, 39, 70]. Операційні індекси розраховуються за даними фактичних рейсів і враховують реальні умови роботи. Проте їхнє пряме застосування до штовхачів стикається з двома принциповими труднощами: по-перше, при баластних переходах штовхача (без барж) $m_{cargo} = 0$ та, відповідно, показник транспортної роботи у знаменнику дорівнює 0, що унеможлиблює обчислення питомого показника енергоефективності; по-друге, жоден із наявних варіантів операційних індексів не містить механізму нормування на гідрологічні умови – рівень води та швидкість течії – які суттєво впливають на опір руху суден на внутрішніх водних шляхах [30, 38, 39].

Третю групу формують методи, засновані на гідродинамічному моделюванні та модельних випробуваннях. Дослідження *Zentari et al.* і *Ringsberg et al.* переконливо демонструють, що опір руху каравану на мілководді може перевищувати глибоководний опір у 1,5–2,5 рази і що ефективна потужність рушійного комплексу суттєво залежить від прохідного перерізу каналу та відношення H/d [41; 62; 79]. Ці підходи забезпечують фізично обґрунтовану оцінку, однак потребують значного обсягу вхідних гідродинамічних даних і є

складними для впровадження в умовах реальної операційної звітності [19; 62; 77].

На рис. 1.2 усі наявні методи оцінки енергоефективності суден позиціоновані у двовірному методологічному просторі за критеріями складності об'єкта оцінювання та глибини врахування експлуатаційних умов.

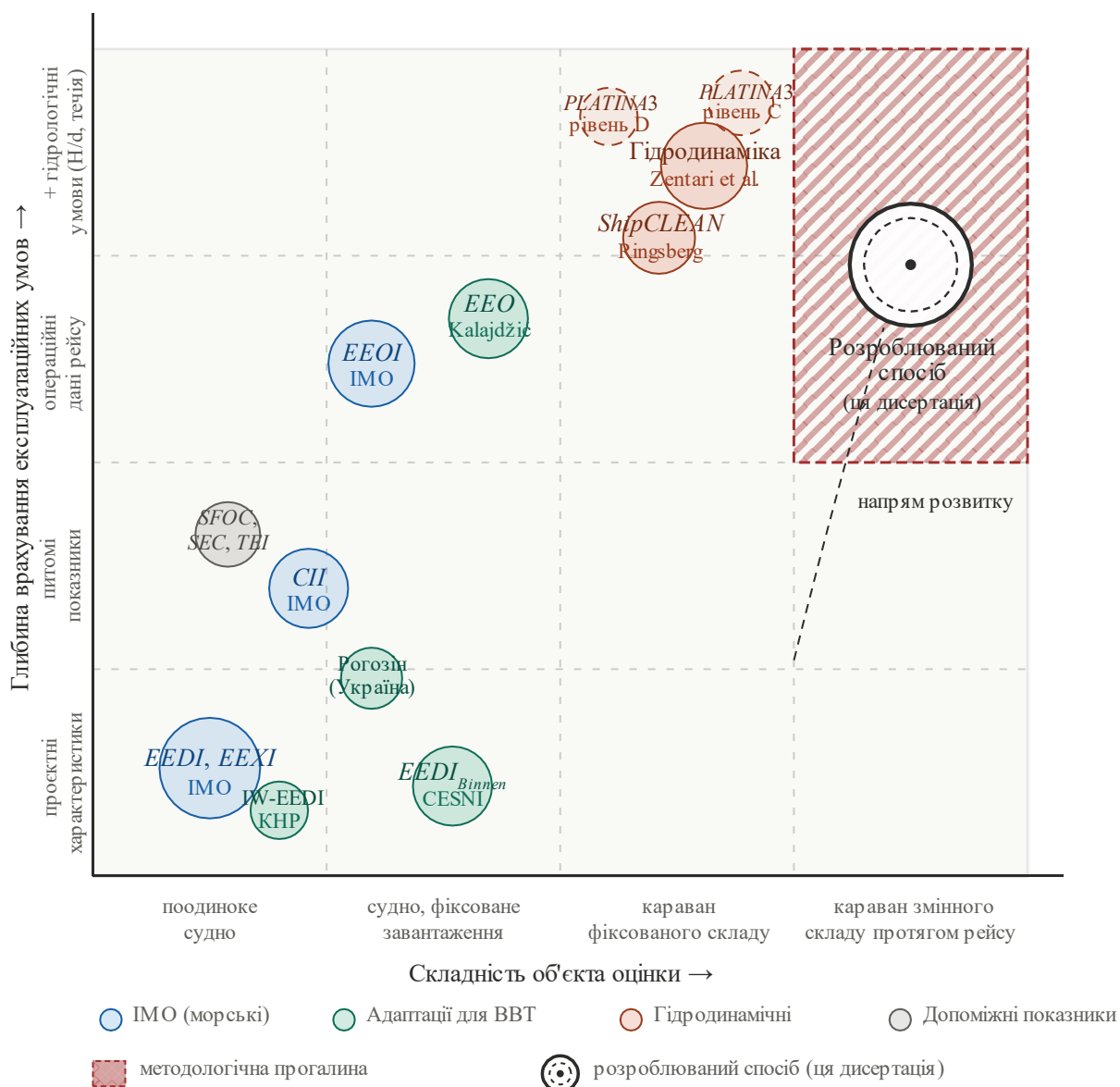


Рисунок 1.2 – Позиціонування наявних методів оцінки енергоефективності суден у двовірному методологічному просторі

На рис. 1.2 заштрихована зона позначає методологічну прогалину, що знаходиться в області найскладнішого об'єкту оцінювання – каравану змінного складу та конфігурації протягом рейсу, при цьому оцінка енергоефективності

очікується на підставі операційних даних рейсу без додаткових складних пристроїв та обладнання з урахуванням поточних гідрологічних умов. Ці два поля у правому верхньому куту діаграми не містять позначок жодного з існуючих інструментів або документів. Області методологічної прогалини є прямою вказівкою на пряму подальшого розвитку та розробки способу оцінювання енергоефективності досліджуваних суден з караванами барж змінної протягом рейсу конфігурації та з урахуванням гідрологічних умов плавання.

Таким чином, жодна з трьох виявлених груп методів не забезпечує можливості системної, вимірюваної та нормованої оцінки енергоефективності досліджуваних суден з караванами барж в умовах мінливих гідрологічних умов внутрішніх водних шляхів [11, 39, 55, 77]. Методологічний розрив існує на двох рівнях. На нормативному рівні: відсутність обов'язкових або навіть загальновизнаних добровільних стандартів оцінки енергоефективності для суден внутрішнього судноплавства у будь-якій країні або регіоні, включаючи Дунайський басейн. На науковому рівні: відсутність методу, який одночасно враховував би специфіку штовхано-баржових систем зі змінним складом каравану, гідрологічну мінливість умов плавання на внутрішніх водних шляхах та реальний профіль роботи головної енергетичної установки досліджуваних суден протягом рейсу.

Наведена у табл. 1.1 систематизація та її візуалізація у формі карти методологічного ландшафту (рис. 1.2) є авторським внеском, що відрізняється від аналогічних оглядів наступним:

- охоплено повний спектр інструментів – від обов'язкових нормативів *IMO* до незавершених методологічних пропозицій *PLATINA3* та *CESNI*;
- кожен інструмент оцінено за єдиним набором критеріїв щодо придатності до штовхачів із караванами змінного складу в умовах мілководного дунайського судноплавства;
- показано, що жоден із 16 інструментів не забезпечує повної відповідності вимогам, сформульованим у [підрозділі 1.3](#).

1.4.2 Критична оцінка застосовності існуючих підходів до умов дунайського судноплавства

Аналіз, проведений у [підрозділі 1.3](#), виявив, що регуляторне середовище ЄС і Дунайського регіону формує чітку систему вимог до інструменту оцінки енергоефективності для суден ВВТ [20, 53, 55]. Разом із тим наявні методики не відповідають цим вимогам у частині, що стосується караванів [11, 39, 55]. Проведений у межах європейських проєктів огляд наявних «*good practices*» свідчить, що окремі судноплавні компанії та водні шляхи вже використовують локальні індикатори енергоефективності та еконавігаційні підходи, проте їхня методична неоднорідність і відсутність єдиної рамки нормування не дозволяють застосовувати ці рішення як базу для порівнянної оцінки флоту на рівні всього Дунайського регіону [63]. У Табл. 1.2 представлено зіставлення вимог регуляторного середовища до інструменту енергоефективності та можливостей наявних методик для досліджуваних суден з караванами.

Таблиця 1.2 – Зіставлення вимог регуляторного середовища до інструменту енергоефективності та можливостей наявних методик для досліджуваних суден з караванами

Вимога (джерело)	Наявні методики: стан виконання
Вимірюваність і відтворюваність на основі даних реальної експлуатації (<i>PLATINA3/D2.6</i> , рівень <i>B–D</i>) [55]	Частково: операційні індекси (<i>EEOI</i> , <i>EEO</i>) базуються на вимірюваних даних, але мають обмеження при $m_{cargo} = 0$ [30; 39]
Облік умов навігації (рівень води, швидкість течії) (<i>NAIADES III</i> , <i>PLATINA3/D2.6</i> , рівень <i>C–D</i>) [20; 55]	Не виконується: жодна стандартизована методика не містить нормування на гідрологічні умови ВВШ [39; 55; 77]
Адаптованість до змінного об'єкта оцінки (каравану змінного складу) [11; 55]	Не виконується: <i>EEDI_{Binnen}</i> і <i>EEOI</i> не передбачають механізму приведення до стандартного каравану [11; 30; 39]
Порівнянність між суднами, маршрутами й часовими проміжками (<i>NAIADES III</i>) [20]	Не виконується у повній мірі через відсутність нормування на умови навігації та склад каравану [39; 55; 77]
Придатність для практичного впровадження у горизонті 2025–2030 рр. (<i>PLATINA3/D2.6</i> , рівень <i>C</i>) [55]	Не виконується: <i>PLATINA3/D2.6</i> прямо зазначає необхідність додаткових наукових розробок перед впровадженням рівня <i>C</i> [55]

Таблиця 1.2 унаочнює, що наявні методики мають принципові системні обмеження саме у тих аспектах, де регуляторне середовище висуває найбільш конкретні вимоги [20; 55]. Це підтверджує не лише наявність наукової прогалини, а й її практичну значимість: без вирішення цієї проблеми система моніторингу та звітності щодо енергоефективності, анонсована в *NAIADES III*, не зможе бути коректно застосована до досліджуваних суден з караванами, які є типовими для дунайського внутрішнього судноплавства [20; 53; 55].

Перше обмеження – нестаціонарність об’єкта оцінки. *EEDI* та *EEXI* розраховуються для конкретного судна з фіксованими геометричними та технічними параметрами. Для системи «штовхач + N барж» поняття «розрахункової швидкості» та «проектного дедвейту» не має однозначного фізичного сенсу, оскільки N , маса вантажу та конфігурація каравану змінюються не лише між рейсами, а й у межах одного рейсу. Як показано в підрозділі 1.2, для типового дунайського рейсу протяжністю від 1800 км до 2000 км рух у повному складі каравану займає від 65 % до 75 % часу, а решта рейсу проходить у режимі неповного каравану, проводок або маневрування поодиноким штовхачем [99]. Жоден із стандартних показників – ні *EEDI*, ні *EEXI*, ні *EEOI* – не передбачає механізму нормування для такого ступінчастого профілю об’єкта оцінки.

Друге обмеження – гідрологічна залежність. *EEOI* нормує викиди CO_2 на одиницю транспортної роботи (т·морс.м), але не враховує гідрологічні умови рейсу. Між тим, для дунайського судноплавства коливання рівня води між НСР та ВСР призводять до зміни показника *EEO* одного і того ж судна на 40–60 % [39]. Швидкість течії на Нижньому Дунаї у повіль сягає 2,5–3,0 м/с, що безпосередньо визначає потужність ГЕУ штовхача при підтриманні заданої швидкості відносно берега. Ефект мілководдя вже при $H/d \leq 2,0$, що є характерним для перекатів та критичних ділянок Середнього і Верхнього Дунаю, стає значущим та при подальшому зменшенні причиняє нелінійне зростання опору руху каравану [79]. Жоден із стандартних індексів *ІМО* не містить поправкових коефіцієнтів на течію або мілководдя, оскільки ці фактори не є характерними для морського судноплавства.

Третє обмеження – некоректність при баластових переходах та проводках. Під час проводки частини каравану через критичну ділянку (10–15 % часу типового рейсу [99]) штовхач виконує реальну транспортну роботу, однак перевезена маса вантажу в ці моменти у рази менша від номінальної. Під час маневрування поодинокого штовхача між баржами, залишеними на рейді, $m_{cargo} = 0$, що робить *EEOI* математично невизначеним. Включення таких етапів до загальної суми рейсу, як рекомендує *IMO* для баластових переходів, спотворює показник і унеможливорює коректне порівняння між рейсами з різною часткою таких етапів.

Четверте обмеження – масштабний ефект каравану. Питома енергоефективність системи «досліджуване судно + N барж» зростає зі збільшенням N нелінійно через зменшення питомого гідродинамічного опору на одиницю вантажу за майже незмінної потужності ГЕУ. *Zentari et al.* (2022) встановили, що конфігурація каравану 2:2 демонструє найнижчу питому потужність на одиницю корисного навантаження, однак лише за достатньої глибини фарватеру [79]. Жоден стандартний показник енергоефективності не відображає цього ефекту, що унеможливорює коректний бенчмаркінг між рейсами з різним складом каравану.

П'яте обмеження – невідповідність часових горизонтів. *CII* є річним показником, орієнтованим на великий морський флот з відносно стабільними операційними профілями. Для досліджуваних суден з караваном барж, рейс якого є структурованою послідовністю якісно різних етапів (підрозділ 1.2), річне усереднення маскує найбільш інформативні характеристики енергоефективності – питому витрату на кожному етапі та її залежність від гідрологічних умов.

На рис. 1.3 показано розподіл часу типового рейсу досліджуваних суден з караванами у дунайському внутрішньому судноплавстві та наочно позначені зони застосовності наявних методів оцінки енергоефективності по етапах типового рейсу (М – маневрування; Ш – шлюзування; С – стоянка, очікування).

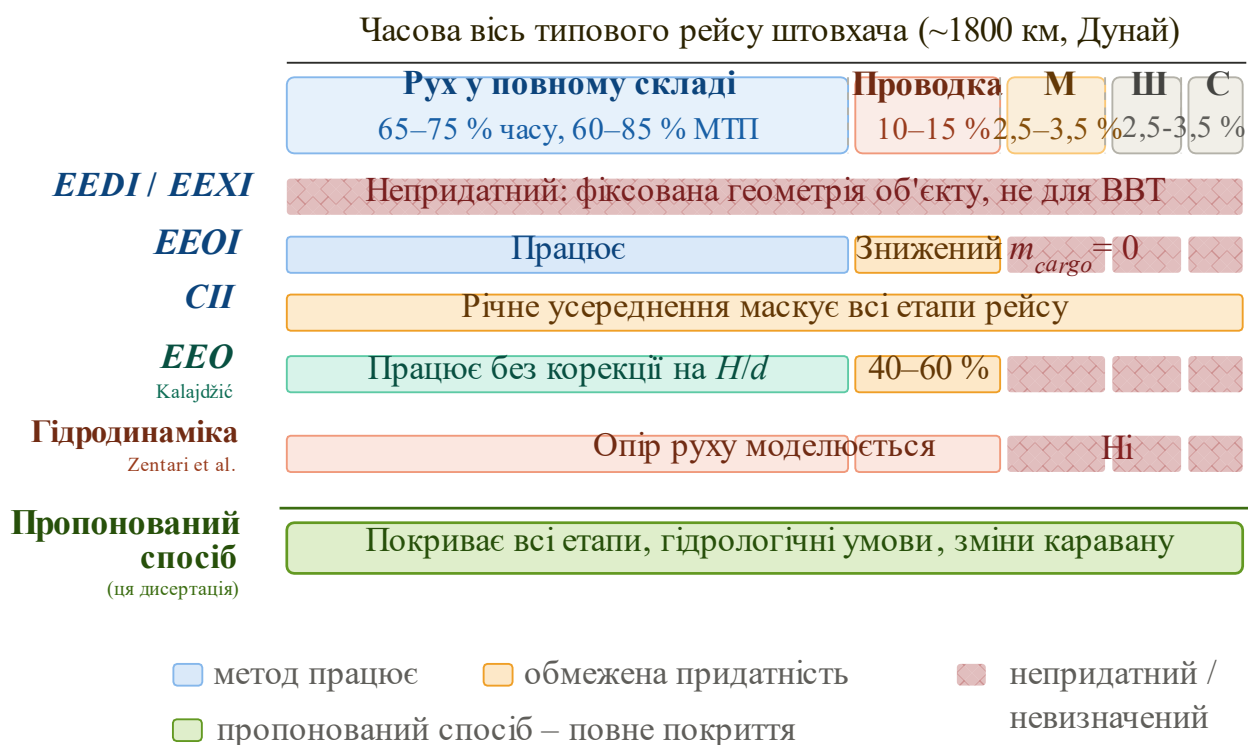


Рисунок 1.3 – Зони застосовності наявних методів оцінки енергоефективності на етапах типового рейсу штовхача з караванами барж на Дунаї та покриття розробленим способом

Методи, адаптовані для суден внутрішнього судноплавства – $EEDI_{Binnen}$ (CESNI, 2021), підходи Белградського університету та DST , розглянуті в підрозділі 1.2, – усувають частину зазначених обмежень, однак мають власні суттєві недоліки. Метод $CESNI$ охоплює каравани з баржами, але не передбачає операційної складової та потребує верифікації на натурних даних. Методи Белградського університету та DST обмежені за діапазоном дедвейту, швидкості та конфігурацій каравану і не в повній мірі враховують ступінчастий профіль рейсу [99]. Таким чином, жоден із наявних підходів не забезпечує комплексного розв’язання проблеми оцінки енергоефективності досліджуваних суден з караванами барж в умовах дунайського судноплавства.

1.4.3 Формулювання наукової проблеми

Результати проведеного критичного аналізу дозволяють сформулювати наукову проблему дисертаційного дослідження таким чином.

Існуючі методи оцінки енергоефективності суден – як морські, так і адаптовані для внутрішнього судноплавства – не забезпечують коректної кількісної оцінки енергоефективності руху досліджуваних суден з караванами барж в умовах внутрішніх водних шляхів, оскільки не враховують одночасно: змінність складу та конфігурації каравану протягом рейсу; гідрологічну мінливість умов плавання (рівень води, швидкість течії, ефект мілководдя); ступінчастий профіль рейсу з якісно різними етапами та їх вплив на витрату палива і фактичну транспортну роботу. Це унеможлиблює об’єктивне порівняння енергоефективності між рейсами, суднами та часовими періодами, а отже – і науково обґрунтоване управління енергоефективністю флоту внутрішнього судноплавства.

Розв’язання цієї проблеми потребує розробки нового способу оцінки енергоефективності, що враховує зазначену специфіку і забезпечує методологічно коректні, відтворювані та порівнянні результати в умовах дунайського судноплавства, а за принципом «від складного до простого» є застосовним і для інших внутрішніх водних шляхів з менш складними навігаційними умовами.

1.4.4 Вимоги до нового способу оцінки енергоефективності

На підставі проведеного аналізу нормативних документів (*NAIADES III*, *PLATINA3/D2.6*), результатів огляду наукової літератури та критичної оцінки існуючих методів сформульовано систему вимог до нового способу оцінки енергоефективності руху суден у внутрішньому судноплавстві.

Вимога 1 – адаптованість до змінного об’єкта оцінки. Спосіб повинен коректно описувати енергоефективність системи «досліджуване судно + N барж» при змінному N та змінному завантаженні барж протягом рейсу, забезпечуючи можливість порівняння показників між рейсами з різним складом каравану [11; 39; 55]. Це принципово відрізняє завдання від оцінки енергоефективності поодинокого судна з фіксованими характеристиками.

Вимога 2 – урахування гідрологічних умов. Спосіб повинен включати механізм нормування показника енергоефективності на гідрологічні умови рейсу

– рівень води та швидкість течії – що є необхідною умовою коректного порівняння рейсів, виконаних в різні сезони або на різних ділянках водного шляху [20; 55; 79]. Ця вимога безпосередньо впливає з встановленого факту 40–60 % варіації показника *EEO* залежно від рівня води [39] та нормативного завдання *NAIADES* III щодо врахування специфіки різних водних шляхів [20].

Вимога 3 – структурованість за етапами рейсу, облік профілю навантажень ГЕУ. Спосіб повинен враховувати ступінчастий профіль рейсу штовхача, коректно описуючи енергоефективність на кожному якісно різному етапі – рух у повному складі каравану, проводка, маневрування поодиноким штовхачем, стоянка – та забезпечуючи інтегральну оцінку енергоефективності за рейс у цілому. Це знімає проблему некоректності стандартного *EEOI* при нульовій транспортній роботі на окремих етапах. Спосіб оцінки повинен коректно відображати вплив часткових режимів роботи головної енергетичної установки на питому витрату палива [39; 55; 72]. Для цього необхідне або пряме вимірювання витрати палива при фактичному режимі роботи ГЕУ, або застосування навантажувальних характеристик двигуна для перерахунку фактичного споживання [39; 72].

Вимога 4 – вимірюваність і практична реалізованість [30; 39; 55]. Всі вхідні параметри для розрахунку показника енергоефективності мають бути доступними для вимірювання в умовах реальної експлуатації без застосування спеціалізованого лабораторного обладнання. Відповідно до рекомендацій *PLATINA3/D2.6* [55], базовими вимірюваними параметрами є: витрата палива, відстань переходу, маса перевезеного вантажу, потужність ГЕУ та тривалість кожного етапу рейсу. Можливість інтеграції з річковими інформаційними системами (*RIS*) є бажаною, але не обов’язковою умовою.

Вимога 5 – порівнянність, масштабованість, можливість агрегування і нормування. Показник енергоефективності має бути придатним для коректного порівняння між: різними рейсами одного штовхача; штовхачами різної потужності в одному флоті; рейсами, виконаними за різних гідрологічних умов. Це передбачає або безпосереднє нормування показника на умови рейсу, або

наявність чітко визначеного алгоритму приведення до стандартних умов. Показник, розрахований для окремого рейсу, повинен допускати агрегування на рівні судна, флоту й операційного маршруту для забезпечення можливості звітності у відповідності до вимог NAIADES III [20; 55]. Крім того, метод повинен бути застосовним до суден з різними характеристиками ГЕУ та конфігураціями рушійного комплексу без суттєвої зміни процедури розрахунку [51; 55].

Вимога 6 – відповідність регуляторному контексту ЄС. Спосіб повинен бути методологічно сумісним з концептуальними рівнями *C* та *D*, визначеними у *PLATINA3/D2.6*, та придатним для подальшої інтеграції у систему звітності щодо вуглецевої інтенсивності флоту внутрішнього судноплавства, анонсовану в *NAIADES III* [20; 51; 55]. Ця вимога є важливою з огляду на перспективи гармонізації вітчизняного законодавства у сфері внутрішнього водного транспорту з нормами ЄС.

1.5 Мета, гіпотеза та логіка дисертаційного дослідження

Аналіз сучасного стану оцінки енергоефективності суден, проведений у підрозділах 1.1–1.4, показав системну невідповідність між наявними інструментами та реальними потребами операторів внутрішнього судноплавства Дунаю. Зростаючі вимоги ЄС до декарбонізації транспорту поєднуються з обмеженими інвестиційними можливостями дунайських судновласників і відсутністю коректних інструментів кількісної оцінки енергоефективності руху, придатних для прийняття експлуатаційних рішень щодо складу караванів, швидкості та завантаження суден. Наявні методики *EEDI*, *EEXI*, *EEOI*, *CII* та їх адаптації для внутрішніх водних шляхів не забезпечують порівнянної оцінки енергоефективності руху самохідних суден і штовхачів з караванами барж в умовах мілководдя та змінного складу каравану, що створює «розрив» між регуляторними цілями і практикою експлуатації дунайського флоту.

Відповідно до цього запиту практики **метою дисертаційного дослідження** є розроблення науково обґрунтованого способу оцінки енергоефективності руху суден внутрішнього судноплавства (самохідних суден і штовхачів з караванами

несамохідних барж) у змінних навігаційних та експлуатаційних умовах, придатного для використання в задачах управління енергоефективністю флоту та гармонізованого з регуляторними вимогами ЄС.

Логіка дослідження спирається на таку **гіпотезу дослідження**. Якщо спосіб оцінки енергоефективності руху суден внутрішнього судноплавства одночасно враховує склад каравану (кількість, тип і завантаженість барж), гідрологічні умови плавання (глибину фарватеру, швидкість течії) та профіль режимів роботи головної енергетичної установки і реалізує нормування показника на стандартні умови експлуатації, то він забезпечує об'єктивну та порівнянну оцінку енергоефективності як самохідних суден, так і штовхачів з караванами на різних ділянках Дунаю і може бути використаний як інструмент для прийняття обґрунтованих експлуатаційних рішень у контексті європейських підходів до індексів енергоефективності для суден внутрішнього водного транспорту.

Для поетапної перевірки цієї гіпотези та досягнення поставленої мети дослідження структуровано у вигляді чотирьох **головних наукових задач**, кожна з яких розкривається системою допоміжних задач. Такий підхід відповідає технологічній карті дослідження за методом Кринецького й забезпечує логічний перехід від теоретико-аналітичного обґрунтування до розроблення способу та його експериментальної перевірки.

Перша головна задача (ГЗ-1) спрямована на теоретико-аналітичне обґрунтування наукової проблеми та вимог до оцінки енергоефективності руху суден внутрішнього судноплавства. У її межах виконуються допоміжні задачі, пов'язані з аналізом міжнародних і європейських регуляторних документів та наукових досліджень (*EEDI*, *EEXI*, *EEOI*, *EEDI_{Binnen}*, *NAIADES III*, *PLATINA3*, *GRENDEL* тощо), систематизацією існуючих підходів за типами індексів (нормативно-конструктивні, операційні, гідродинамічні) та формулюванням наукової проблеми й системи вимог до способу оцінки енергоефективності, узгодженої з регуляторним контекстом ЄС і Дунайського регіону.

Друга головна задача (ГЗ-2) стосується дослідження впливу експлуатаційних та гідрологічних факторів на енергоефективність руху суден з караванами барж на Дунаї. Вона конкретизується у вивченні впливу параметрів каравану (кількість, тип і завантаженість барж, конфігурація побудови), аналізі впливу глибини, прохідного перерізу та швидкості течії на опір руху й необхідну потужність пропульсивної установки, а також у дослідженні характерних профілів режимів роботи головних енергетичних установок та їхнього впливу на питому витрату палива й вуглецеву інтенсивність.

Третя головна задача (ГЗ-3) пов'язана з розробленням математичної моделі та способу оцінки енергоефективності руху суден внутрішнього судноплавства з урахуванням специфіки караванів барж і мілководних умов. У рамках цієї задачі формується структура показника енергоефективності, що базується на транспортній роботі, витраті палива та викидах, будується система залежностей, які відображають вплив складу каравану й гідрологічних параметрів на енергетичні витрати, розробляється спосіб урахування профілю режимів роботи головної енергетичної установки, а також формулюється алгоритм практичного застосування розробленого способу за даними реальної експлуатації суден на Дунаї.

Четверта головна задача (ГЗ-4) передбачає експериментально-аналітичну перевірку розробленого способу та оцінку його наукової і практичної ефективності. Для її реалізації здійснюється збирання та опрацювання експлуатаційних даних щодо руху самохідних суден і штовхачів з караванами барж на ділянках Дунаю різних класів внутрішніх водних шляхів, застосовується розроблений спосіб оцінки енергоефективності до відібраних рейсів, результати порівнюються з оцінками, одержаними за існуючими методиками (*ЕЕОІ*, *ЕЕО* тощо), та оцінюється потенціал використання показника для експлуатаційної оптимізації і включення до систем нормування й моніторингу енергоефективності флоту.

Комплексна головна наукова задача вирішується шляхом побудови способу оцінки енергоефективності руху суден внутрішнього судноплавства,

який базується на введенні нормованого показника енергоефективності руху судна/каравану, урахуванні складу каравану, гідрологічних умов і профілю навантажень ГЕУ та використанні експлуатаційних даних для розрахунку й агрегування цього показника.

Технологічна карта дослідження наведена у [Додатку Г](#).

Висновки до першого розділу

1. Існуючі підходи до оцінки енергоефективності суден можна систематизувати у три групи: нормативно-конструктивні індекси, операційні індекси фактичної енергоефективності та методи гідродинамічного моделювання.

2. Наявні методики не забезпечують можливості нормованої та порівнянної оцінки енергоефективності руху досліджуваних суден з караванами через змінний склад каравану барж, суттєвий вплив гідрологічних умов на опір руху та специфічний профіль режимів роботи ГЕУ.

3. Регуляторне середовище ЄС формує виражений запит на інструмент оцінки енергоефективності для суден ВВС і прямо визнає незавершеність відповідних наукових і методологічних розробок.

4. Зіставлення вимог регуляторного середовища та можливостей наявних методик виявляє системну невідповідність у частині нормування на умови навігації, адаптованості до змінного об'єкта оцінки та порівнянності між рейсами й суднами.

5. Сформульована система з шести взаємопов'язаних вимог до нового способу оцінки енергоефективності – адаптованість до змінного об'єкта оцінки, урахування гідрологічних умов, структурованість за етапами рейсу, вимірюваність, порівнянність та відповідність регуляторному контексту ЄС – визначає повний перелік властивостей, якими має володіти науково обґрунтований спосіб оцінки енергоефективності руху суден у внутрішньому судноплавстві, та є вихідною методологічною основою для його розробки у наступних розділах дисертаційної роботи.

Таким чином, у розділі 1 повністю вирішено першу головну наукову задачу дослідження (ГЗ-1) та всі три її допоміжні задачі (ДЗ 1.1–1.3 відповідно до технологічної карти дослідження, [Додаток Г](#)).

Основні наукові результати по розділу наведені в працях здобувача [66–69; 72; 76; 85–87; 90–100].

РОЗДІЛ 2

НАВИГАЦІЙНО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ УМОВИ СУДНОПЛАВНОГО ДУНАЮ ТА ФАКТОРИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ДОСЛІДЖУВАНИХ СУДЕН З КАРАВАНАМИ

Зміст розділу відповідає другій головній науковій задачі дослідження (ГЗ-2) – дослідження впливу експлуатаційних та гідрологічних факторів на енергоефективність руху караванів суден на Дунаї ([Додаток Г](#)). Допоміжна задача 2.1 (вплив параметрів каравану) вирішується у підрозділах [2.2](#) та [2.3.3](#); допоміжна задача 2.2 (вплив гідрологічних умов) – у підрозділах [2.1](#) та [2.3.1](#); допоміжна задача 2.3 (профілі режимів ГЕУ) – у підрозділах [2.3.2–2.3.3](#) та [2.4.2](#).

2.1 Характеристика судноплавного Дунаю від Кельхайму до Чорного моря (ділянки, гідрологія, гідроспороди, обмеження)

2.1.1 Загальна характеристика та нормативно-правовий статус судноплавного Дунаю

Дунай є другою за довжиною рікою Європи після Волги; загальна довжина ріки становить 2845 км. Конвенційна судноплавна ділянка розпочинається від міста Кельхайм (Баварія, ФРН) на 2414,72 р. км і закінчується у Сулині (Румунія) при впадінні в Чорне море (0 р. км); її загальна протяжність складає 2415 км і охоплює територію десяти прибережних держав [14; 44]. Поряд із основним судноплавним маршрутом через рукав Сулина, судноплавними є також Кілійське гирло та рукав Бистре, що розташовані на території України. Кілійський рукав є найповноводнішим з трьох основних рукавів дельти і має важливе значення для суден, які прямують до українських дунайських портів. Рукав Бистре, відновлений як судноплавний у 2004 році, забезпечує Україні самостійний вихід до Чорного моря, скорочуючи шлях від Ізмаїла до моря порівняно з маршрутом через румунські канали [14; 44].

Міжнародний правовий статус судноплавного Дунаю визначається [Белградською конвенцією про режим судноплавства на Дунаї](#) від 18 серпня 1948

року, яка гарантує свободу торговельного судноплавства для суден під прапорами прибережних держав. Стягування плати за прохід водним шляхом не передбачено, за винятком Каналу Дунай–Чорне море (Румунія), який є національним водним шляхом і не підпадає під дію Белградської конвенції [44].

З введенням у дію каналу Майн–Дунай у 1992 році (довжина 171 км, з'єднує р. Майн у Бамберзі з Дунаєм у Кельхаймі) Дунай став частиною безперервного трансєвропейського водного шляху від Роттердама на Північному морі до Констанци на Чорному морі загальною протяжністю близько 3500 км. Цей маршрут є однією з головних магістралей трансєвропейської транспортної мережі (*TEN-T*) та основною віссю коридору Рейн–Майн–Дунай, що забезпечує безперервне внутрішнє водне сполучення між Північним та Чорноморським басейнами [14; 20; 44].

Відповідно до *Угоди UNECE про найважливіші внутрішні водні шляхи міжнародного значення (AGN)*, Дунай позначено як водний шлях Е 80. Угода встановлює класифікаційні вимоги до параметрів фарватеру залежно від класу (*Vb–VII*): мінімальну глибину, ширину судового ходу, радіуси заокруглень і габарити під мостами. Стандартний модуль класу *Vb/VIa* має довжину до 110 м і ширину до 11,45 м, тоді як клас *VII* допускає рух значно більших караванів [14; 44].

З погляду енергоефективності руху караванів особливе значення мають гідрологічні характеристики русла, система гідроспоруд та навігаційні обмеження, які змінюються вздовж ріки і визначають допустиму осадку, склад караванів і режими роботи пропульсивних установок суден [14; 15; 93].

2.1.2 Поділ на ділянки та їх навігаційні характеристики

Для опису умов судноплавства Дунай зазвичай поділяють на три основні ділянки (Табл. 2.1): Верхній Дунай (від Кельхайма до району Гьонью), Середній Дунай (від Гьонью до гідровузлів «Залізні ворота») та Нижній Дунай (від «Залізних воріт» до дельти і Чорного моря) [15; 44]. Такий поділ відповідає істотним відмінностям у ступені зарегульованості стоку, ухилі, глибині

суднового ходу, структурі гідроспоруд і рівневному режиму, що безпосередньо впливає на умови енергоефективного руху суден і караванів [14; 44; 95].

Поздовжній профіль Дунаю [16], розроблений та опублікований Дунайською Комісією, наочно демонструє зміну відміток водної поверхні, ухилу та конфігурації русла від верхів'їв до Чорного моря й дозволяє виділити ділянки зі збільшеним ухилом, зонами регулювання стоку водосховищами та дельтовими відрізками з малим ухилом і значними глибинами. Цей профіль є базою для проектування габаритів суднового ходу, розміщення гідроспоруд і оцінки впливу гідрологічних умов на енерговитрати суден.

Таблиця 2.1 – Навігаційні характеристики ділянок судноплавного Дунаю [14; 44; 73; 99]

Ділянка / Параметр	Верхній Дунай (від 2414 р.км до 1791 р.км)	Середній Дунай (від 1791 р.км до 942 р.км)	Нижній Дунай (від 942 р.км до 0 р.км)
Клас водного шляху (AGN/UNECE)	IV–Va–Vb–VIa	VIb–VII	VII
ГЕС зі шлюзами, од.	17 (16 на австро-нім.ділянці, 1 Габчіково)	0	2 (Залізні ворота I та II, 942–863 р.км)
Цільова глибина фарватеру при ЕНР	2,0 м (нім. ділянка – 1,55 м)	2,5 м	2,5 м
Максимально допустима осадка судна (при сприятливих умовах), м	від 2,5 до 2,7, але в меженний період значно нижчі	від 2,5 до 2,8	від 2,5 до 3,5 (нижче Браїли)
Режим течії	Підпірний	Вільна течія	Підпір у зоні шлюзів; вільна течія нижче 863 р.км
Сезон максимальних рівнів	Травень–серпень	Квітень–травень	Квітень–травень
Типові конфігурації каравану	1:1, 1:2	2:1, 2:2	2:2, 3:2, 3:3, 3:4 (до 9–12 барж)

Верхній Дунай (Кельхайм–Гьоньо, від 2414 р. км до 1791 р. км). Верхній Дунай охоплює гірську та передгірську частину ріки в межах Німеччини та Австрії, а також словацьку ділянку з гідровузлом Габчіково. Характеризується високим ступенем зарегульованості за рахунок 17 гідроелектростанцій (ГЕС) і

водосховищами, які забезпечують стабільні глибини, але формують систему послідовних шлюзів (16 на австро-німецькій ділянці та Габчіково на 1820 р. км). При цьому розміри камер шлюзів визначають максимальні габарити суден і караванів за довжиною та шириною [20; 44; 73; 74]. Перепад висот між Кельхаймом і Гьоньо долається у підпірному режимі. За класифікацією Європейської угоди про основні внутрішні водні шляхи міжнародного значення (AGN) переважаючі класи водного шляху тут становлять IV–Va–Vb–VIa, що формально допускає експлуатацію крупних караванів, але фактично обмежує максимальні розміри умовами дотримання габаритів суднового ходу й камер шлюзів [14; 18; 44; 73; 74].

Попри загальну зарегульованість, на верхньому Дунаї існують окремі «вузькі місця» з гідрологічної точки зору. Ділянка *Straubing–Vilshofen* у Німеччині відома тим, що в періоди маловоддя гарантована глибина часто знижується до 2,0–2,5 м, а кількість днів з глибиною, меншою за цільове значення для відповідного класу водного шляху, є значною [14; 44; 74]. Це обмежує допустиму осадку суден і змушує операторів або скорочувати завантаження барж, або зменшувати склад караванів, що безпосередньо впливає на енергоефективність перевезень у розрахунку на тонно-кілометр [14; 93].

З точки зору енергоефективності штовханих караванів верхній Дунай характеризується двома групами факторів. По-перше, часті шлюзування призводять до підвищеної частки часу на маневрові режими, роботи головних енергетичних установок на малих навантаженнях і простоїв, що знижує середню енергоефективність рейсу [44; 74; 93]. По-друге, локальні обмеження по глибині в маловодні періоди скорочують можливу осадку караванів, зменшуючи доступний дедвейт і збільшуючи питому витрату палива та викиди на одиницю перевезеної маси вантажу [14; 93; 94].

Середній Дунай (Гьоньо – гідровузли «Залізні ворота», від 1791 р. км до 942 р. км). Середній Дунай від угорсько-словацької ділянки до гідровузлів «Залізні ворота» має протяжність близько 849 км і поєднує ділянки з відносно рівнінними умовами та павною течією в районах Угорщини, Сербії та суміжних

країн та зони з підвищеними ухилами й швидкостями течії, зокрема в ущелинах [15; 44]. Режим течії – вільний по всій ділянці; гідроспоруд зі шлюзами тут немає. На значній частині середнього Дунаю судновий хід відповідає класам VIa–VIb–VII за *AGN*, цільова глибина фарватеру при ЕНР – 2,5 м (ЕНР – еталонний навігаційний референсний рівень). Водночас на угорській ділянці (від 1708 р. км до 1433 р. км) фарватер не відповідає вимогам класів VIb–VIc приблизно протягом половини року внаслідок природної мінливості рівнів: у окремі маловодні періоди формуються ділянки з глибинами, нижчими за цільові параметри, що призводить до тимчасових обмежень по осадці суден [14; 15; 18; 44]. Додатковим фактором є підвищена швидкість течії на окремих відрізках, зокрема в районі ущелин та звужень, де течія суттєво збільшує необхідну ефективну потужність пропульсивної установки при русі проти течії, а отже, впливає на вибір потужності штовхача та складу каравану [19; 44; 93]. Значний гідрологічний вплив справляють великі праві притоки – Драва, Тиса та Сава (рис. 2.1) [25; 44].

Наведений на рис. 2.1 поздовжній профіль середніх витрат містить найбільш повні систематизовані зведені дані, доступні у відкритому доступі; новіші дослідження Нижнього Дуная (період 1976–2019 рр.) підтверджують збереження зазначених порядків витрат [17; 60].

Для енергоефективності караванів на середньому Дунаї визначальними є асиметрія витрат палива при русі «угору» та «донизу» за рахунок впливу течії, локальні обмеження по глибині в маловодні періоди [44; 93; 95].

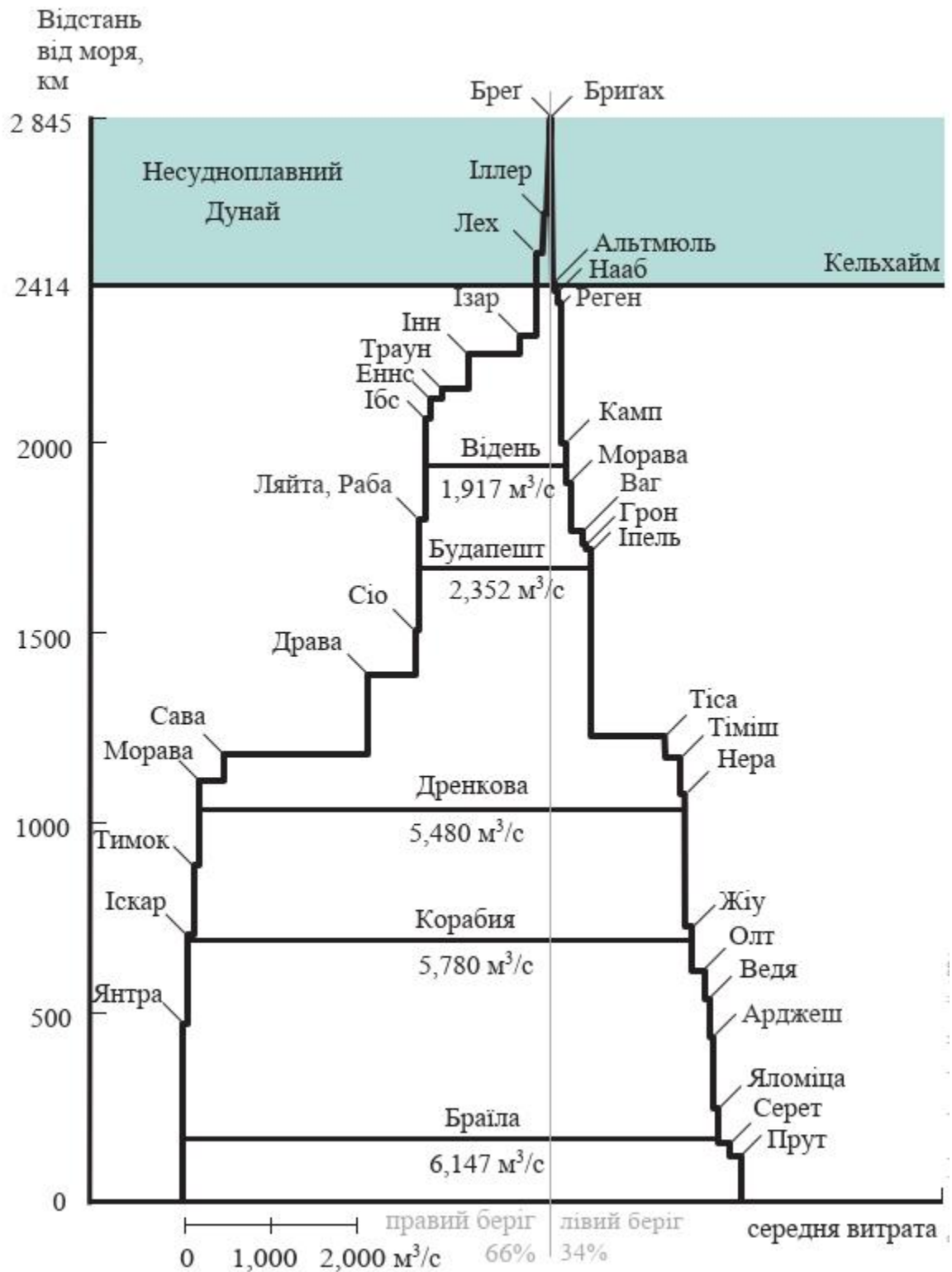


Рисунок 2.1 – Середня витрата Дунаю від джерела до 0 км на підставі даних 1941–2001 рр. [44]

Нижній Дунай (гідровузли «Залізні ворота» – Чорне море, від 942 р. км до 0 р. км). У верхній частині ділянки – зона двох гідровузлів Залізних Воріт (від 942 р. км до 863 р. км) з підпірним режимом у межах водосховищ. Нижній Дунай

нижче 863 р. км є найбільш сприятливою ділянкою для великотоннажного баржового судноплавства; характеризується меншим ухилом і значними витратами води, що формує риси великої низинної ріки з широкими заплавами та розгалуженою дельтою [15; 44]. У цьому відрізку судновий хід відповідає переважно класам VIb–VII, а на румунській ділянці до моря додатково функціонує штучний канал Дунай–Чорне море, який забезпечує стабільні глибини та прямий вихід до порту Констанца [14; 20; 44]. На морській ділянці нижче Браїли (172 р. км) допустима осадка зростає до 3,5 м і більше. Саме тут реалізуються найбільші конфігурації караванів – до 9–12 барж – що забезпечують максимальну транспортну ефективність [14; 44; 99; 102].

Проте навіть на нижньому Дунаї, попри загалом достатні глибини, у періоди екстремального маловоддя утворюються мілководні ділянки, де глибина суднового ходу стає меншою за проєктні значення, що призводить до вимушених обмежень по осадці і зменшення завантаження барж у караванах [14; 15]. У дельті Дунаю додатковими навігаційними факторами є розподіл витрат між рукавами, вплив вітрово-нагінних явищ та морських рівнів, а також обмеження по габаритах суден у каналах і на підходах до морських портів [14; 44].

З точки зору енергоефективності руху караванів нижній Дунай дозволяє формувати каравани з високим дедвейтом та досягати низьких питомих витрат палива на тонно-кілометр, але чутливість до маловодних періодів і локальних мілководь зберігається; вплив течії при високих витратах може вимагати додаткової потужності при русі проти течії, особливо на окремих звуженнях [14; 93]. Негативного впливу додає необхідність узгодження складу та габаритів каравану з можливостями безпечного проходу через гідровузли «Залізні ворота» [44; 93; 95].

2.1.3 Гідрологічний режим водного шляху та характеристика рівнів води

Гідрологічний режим Дунаю безпосередньо визначає умови роботи штовхачів з караванами барж, оскільки рівень води та швидкість течії є головними факторами, що впливають на опір руху каравану і необхідну

потужність ГЕУ. Для характеристики навігаційних умов Дунайська комісія та *viadonau* використовують три стандартних рівні [44; 73]:

- ЕНР, як розрахунковий низький рівень, при якому встановлюються нормовані параметри фарватеру, зокрема НСРР – низький судноплавний регуляційний рівень, який розраховується за методикою Дунайської Комісії та є офіційно визнаним еталонним для Дунаю;

- НСР – рівень, що досягається або перевищується в середньому 94 % днів на рік (343 дні) за багаторічним рядом спостережень; визначає рівень, при якому гарантуються мінімальні глибини на судновому ході з заданою імовірністю;

- ВСР – рівень, що досягається або перевищується в середньому 1 % днів на рік (3,65 дні); характеризує типові верхні межі рівнів води, за яких ще зберігається безпечне судноплавство [14; 44; 73; 94].

НСРР є динамічною статистичною величиною, яку вираховують на основі багаторічних спостережень. Значення НСРР підлягає періодичному перегляду. НСРР є базовою точкою відліку, відштовхуючись від значення якої судноводії вираховують глибину фарватеру, або фактичну осадку судна, або визначають, яка кількість вантажу є безпечною для проходу критичних перекатів Дунаю.

Для забезпечення безпечного й ефективного судноплавства на Дунаї створена розгалужена система постів спостережень за рівнем води, які експлуатуються національними гідрометеорологічними службами та координуються під егідою Дунайської Комісії та інших міжнародних організацій [14; 15]. На ключових ділянках ріки (у тому числі в районах критичних мілководь і гідровузлів) розташовані водомірні пости з довготривалими рядами спостережень, на основі яких визначаються характерні рівні для потреб судноплавства [14; 15; 44].

На рис. 2.2 наведено приклади коливань рівнів води за даними водомірних постів верхнього Дунаю. Такі спостереження проводяться уздовж верхнього, середнього та нижнього Дунаю. Усього на Дунаї існує 84 водомірні пости, дані яких свідчать про постійне спостереження за змінами гідрологічної ситуації на Дунаї у добовому, місячному, річному розрізах.

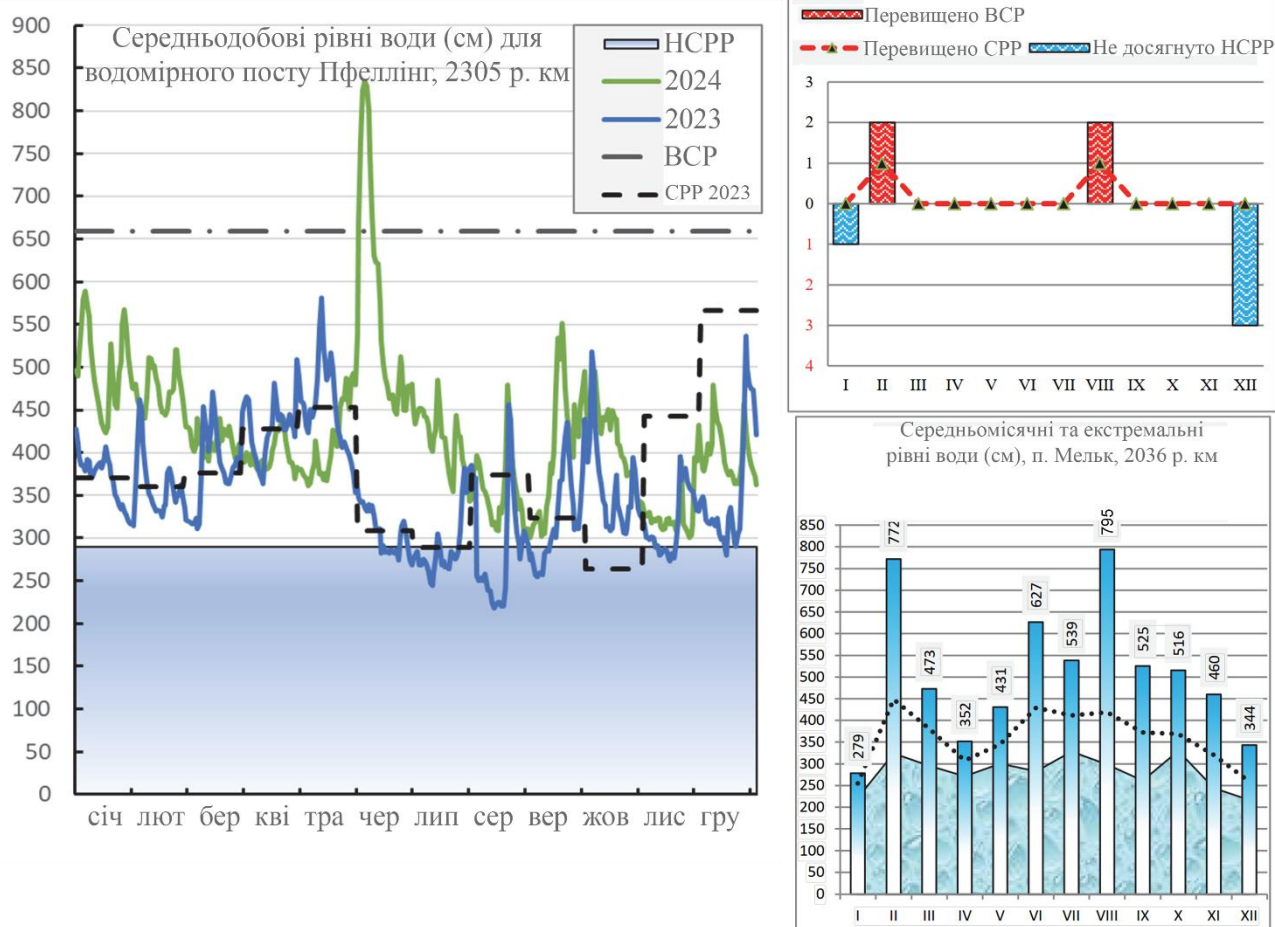


Рисунок 2.2 – Приклади діаграм коливань регуляційних рівнів води за даними водомірних постів [14]

У [Додатку Г](#) наведено узагальнені гідрологічні характеристики низки репрезентативних водомірних постів на судноплавному Дунаї на ключових ділянках ріки (верхній, середній та нижній Дунай, [табл. Г.1](#)). Для кожного поста подано значення регуляційного НСРР та ВСР, а також витрати води, що відповідають цим рівням ($Q_{\text{НСРР}}$, $Q_{\text{ВСР}}$), усереднені за періоди 1971–2000 рр.; 1981–2010 рр.; 1991–2020 рр. (аналіз даних Дунайської Комісії виконано автором на підставі публікацій [15; 17]). Такий підхід дає змогу зіставити гідрологічні режими різних ділянок і надалі використовувати отримані значення як вихідні дані для оцінки енергоефективності руху караванів та аналізу критичних умов судноплавства в розділах 2 і 3.

Як видно з таблиці Г.1 (Додаток Г), для верхнього Дунаю характерні менші витрати при НСРР та відносно менші амплітуди між НСР і ВСР, тоді як на середньому та нижньому Дунаї спостерігається суттєве зростання як абсолютних значень витрат, так і діапазону рівнів. Це відображає наростання ролі великих приток та більшої площі водозбору вниз за течією і прямо впливає на формування запасів глибини ходу і на чутливість судноплавства до маловодних та висоководних періодів. У подальшому ці масштабні відмінності враховуються при виділенні навігаційно-експлуатаційних режимів і нормуванні показників енергоефективності руху караванів.

Річні зміни рівнів суттєво відрізняються між ділянками. На Верхньому Дунаї максимумами, зумовлені таненням альпійських снігів та льодовиків, припадають на травень–серпень, мінімумами – на жовтень–березень. На Середньому та Нижньому Дунаї максимальні рівні спостерігаються у квітні–травні (паводки на рівнинних притоках), мінімумами – у серпні–жовтні [44].

Середня витрата води зростає вниз за течією (рис. 2.1): близько 1470 м³/с у Пасау, 1920 м³/с у Відні, 2350 м³/с у Будапешті, до 5300 м³/с після впадіння Драви, Тиси та Сави і 5523 м³/с при вході на румунську ділянку у Базіаші. Максимальна витрата зафіксована у Залізних Воротах – 15 800 м³/с (повінь 2006 р.) [25; 44].

За даними статті [99], характерні швидкості руху караванів на Дунаї становлять 9–13 км/год проти течії та 16–20 км/год за течією, а на мілководних ділянках розрахунковий діапазон зміщується до нижніх меж цих інтервалів. Варіабельність рівнів між НСР та ВСР призводить до 40–60 % зміни показника енергоефективності одного й того самого судна між сезонами [39], що є одним із ключових аргументів на користь необхідності гідрологічного нормування показника ЕЕ, розробці якого присвячено подальші підрозділи.

2.1.4 Гідроспоруди та їх вплив на умови судноплавства

На всій протяжності судноплавного Дунаю від Кельхайму до Сулини розташовано 19 ГЕС, які перетворюють енергію потоку на електроенергію і

одночасно формують підпірні зони, що змінюють режим течії та глибин фарватеру [44; 73].

На Верхньому Дунаї зосереджено 17 ГЕС зі шлюзами: 16 на австро-німецькій ділянці та Габчіковський гідровузол (1820 р. км, Словаччина). Підпірний режим забезпечує відносно стабільні рівні, проте проходження кожного шлюзу є обов'язковим і займає від 40 хвилин до 3–4 годин з урахуванням очікування. Більшість шлюзів австро-німецької ділянки мають камери 230×24 м або 225×24 м, що не допускає одночасного проходу каравану з двома баржами в ширину – це є безпосередньою причиною обмеження конфігурацій караванів схемами 1:1 та 1:2. Габчіковський гідровузол має дві камери розмірами 275×34 м, що є достатнім для проходження ширших складів [44; 73].

На Середньому Дунаї гідроспоруд зі шлюзами немає – течія вільна по всій довжині ділянки. На Нижньому Дунаї розташовано два гідровузли: Залізні Ворота I (942,9 р. км) та Залізні Ворота II (863 р. км) на сербсько-румунському кордоні. Кожен гідровузол має дві шлюзові камери розмірами 310×34 м, що є достатнім для проходження великих караванів у двох напрямках одночасно. Нижче Залізних Воріт (нижче 863 р. км) Дунай тече вільно; відсутність шлюзів на відстані понад 860 км є принциповою навігаційною перевагою нижньої ділянки [44].

2.1.5 Навігаційні обмеження, вузькі місця та їх значення для оцінки енергоефективності караванів

Ключовою навігаційною проблемою Дунаю є невідповідність реальних параметрів фарватеру цільовим показникам *AGN* на ряді критичних ділянок. Це безпосередньо впливає на умови роботи досліджуваних суден з караванами через необхідність виконання проводок (операцій з частковим роз'єднанням каравану для подолання мілководних ділянок) і паузок (операцій з роз'єднанням каравану, частковим розвантаженням барж за допомогою плавкрану, проводкою частково розвантажених барж по черзі через пережат, з подальшим довантаженням барж,

формуванням повного каравану та продовженням рейсу у вихідному стані завантаження).

Стратегічним «вузьким місцем» на Верхньому Дунаї є ділянка Штраубінг–Вільсхофен, де гарантована глибина часто знижується до 2,0–2,5 м, при цьому гарантована осадка при ЕНР складає лише 1,55 м. На Середньому Дунаї (угорська ділянка від 1708 р. км до 1433 р. км) фарватер не відповідає класам VIb–VIc приблизно половину року. На Нижньому Дунаї в маловодні роки окремі перекати створюють обмеження на 7–15 і більше днів на рік. Цільовий показник для всього Дунаю, встановлений проектом *FAIRway Danube II*, – 2,5 м при ЕНР (для Верхнього Дунаю – 2,0 м) [14; 22; 44].

Для досліджуваних суден з караванами барж обмеження осадки є критичним фактором енергоефективності: зменшення складу каравану при проходженні мілководних ділянок різко знижує транспортну роботу, практично не зменшуючи споживання палива штовхачем, що погіршує питомий показник енергоефективності. Операції роз'єднання і з'єднання каравану (проводки, паузки) вимагають маневрування поодинокого штовхача без вантажу – найменш ефективний режим з точки зору енергоефективності. За даними [99], такі етапи займають від 10 до 15 % часу типового дунайського рейсу протяжністю від 1800 км до 2000 км.

У періоди, коли фактичний рівень води наближається до НСРР або опускається нижче нього, глибина суднового ходу на природних ділянках (особливо на верхньому та нижньому Дунаї) стає істотно меншою за розрахункову, що призводить до обмеження осадки суден, зниження допустимого завантаження барж і відповідно до зростання питомих витрат палива та викидів на одиницю перевезеної маси вантажу [14; 15; 93]. Навпаки, під час проходження паводків і рівнів, близьких до ВСР, глибини, як правило, збільшуються, але зростають і швидкості течії, що може вимагати підвищеної потужності при русі проти течії й впливати на безпеку руху караванів у звужених ділянках [19; 44; 93].

Для подальшого аналізу енергоефективності руху суден внутрішнього судноплавства важливо, що на різних ділянках Дунаю характер та амплітуда сезонних коливань рівнів суттєво відрізняються: на зарегульованих верхніх ділянках вони частково згладжуються за рахунок роботи водосховищ, тоді як на середньому та нижньому Дунаї вплив НСР і ВСР на навігаційні глибини є більш вираженим [15; 44]. Це означає, що для коректного порівняння енергоефективності рейсів і складів караванів необхідно враховувати не лише середні параметри глибини й течії, а й сезонний рівневий режим, який визначає доступну осадку та характер режимів роботи пропульсивних установок у конкретні періоди навігації. [14; 94; 95].

Узагальнені значення НСР, ВСР та відповідних витрат води для основних постів на верхньому, середньому та нижньому Дунаї (Додаток Г, табл. Г.1) кількісно відображають «масштаб» навігаційних обмежень на кожній ділянці: саме при витратах, близьких до НСРР, формується більшість критичних ситуацій із недостатньою глибиною суднового ходу на перекатах і вузьких місцях. Для нижнього Дунаю характерні високі абсолютні витрати при НСРР і великі амплітуди між НСР та ВСР (табл. Г.1), що пояснює одночасно високий потенціал вантажопотоків та підвищену чутливість судноплавства до тривалих маловодних періодів на критичних ділянках.

Узагальнюючи наведені положення, можна зробити висновок, що судноплавний Дунай від Кельхайма до Чорного моря представляє собою систему ділянок із різним ступенем зарегульованості, глибиною, ухилом та рівневим режимом, які формують різні навігаційно-експлуатаційні умови для руху караванів. [14; 20; 44] Для верхнього Дунаю визначальними є каскад гідроспоруд і локальні «вузькі місця» з малими глибинами; для середнього – поєднання впливу течії та проходження складних гідровузлів; для нижнього – сполучення значних глибин з ризиком мілководь у періоди маловоддя та специфікою дельтових ділянок [14; 15; 93; 95]. Саме ці фактори мають бути враховані при побудові способу оцінки енергоефективності руху караванів у наступних підрозділах розділу 2 та при формуванні моделі енергоефективності в розділі 3.

2.2 Типовий флот та конфігурації караванів на Дунаї

2.2.1 Склад дунайського транспортного флоту та його значення для оцінки енергоефективності

Як показано в [підрозділі 1.2](#), досліджувані судна з караванами несамохідних барж є специфічним об'єктом оцінки енергоефективності. Нижче охарактеризовано конкретний склад та технічні параметри дунайського флоту, що є безпосереднім об'єктом цього дослідження і визначають вхідні дані для математичної моделі, що розробляється в [розділі 3](#).

За даними Дунайської комісії, транспортний флот судноплавного Дунаю налічує близько 5 основних категорій суден: самохідні пасажирські (≈ 200 од.), самохідні суховантажні (≈ 400 од.), самохідні наливні (≈ 35 од.), несамохідні баржі ($\approx 2\,300$ од.) та буксири і штовхачі (≈ 680 од.), рис. 2.3 [14; 99]. Несамохідні баржі та штовхачі разом становлять переважну більшість одиниць вантажного флоту, що підтверджує визначальну роль штовхано-баржових систем у вантажних перевезеннях Дунаєм.



Рисунок 2.3 – Склад Дунайського флоту [99]

Ключовими операторами флоту на Дунаї є підприємства з різних прибережних країн, технічні характеристики типових суден яких наведено в [Додатку В](#), таблиця В.1. Нижче розглянуто основних операторів у розрізі їх ролі в загальній картині енергоефективності дунайського судноплавства.

Українські оператори. ПрАТ «Українське Дунайське пароплавство» (УДП, м. Ізмаїл) є найбільшим українським оператором на Дунаї. Флот штовхачів УДП представлений серіями «Рига/Іваново» (1470 кВт, здатні працювати з караванами до 6 барж), «Запоріжжя» (1800 кВт, до 6–8 барж), «Ленінград» (1900 кВт, до 6–8 барж) та «Сергій Авдеєнков» (2400 кВт, до 9 барж). Самохідні судна серії «Капітан Антипов» мають потужність ГЕУ 1545 кВт і здатні працювати з 5 баржами. Середній вік штовхачів УДП становить 37–57 років, що визначає технічний стан ГЕУ і реальний діапазон питомої витрати палива [99; 102].

Австро-угорські оператори. *DDSG/MAHART* є одним із найбільших операторів на всій протяжності Дунаю. Надпотужні штовхачі компанії (від 1985 кВт до 3750 кВт) працюють на Середньому та Нижньому Дунаї з караванами з 8–12 барж дедвейтом до 20500 т проти течії та 11000 т за течією. Для Верхнього Дунаю компанія експлуатує штовхачі потужністю 1150 кВт з 1–2 баржами. Самохідні суховантажні судна для роботи між портами Середнього Дунаю та Західної Європи мають потужність 990–1500 кВт [23].

Сербські оператори. *Rhenus PartnerShip Serbia* (м. Белград) представлена штовхачами типу «*Rhenus Beograd*» потужністю 1900 кВт (до 6–8 барж, дедвейт каравану до 10000 т), штовхачами *TR-17* (750 кВт, 2 баржі) та самохідним суховантажним судном «*Rhenus Regensburg*» (1300 кВт, 2 баржі). Середній вік флоту становить 33–69 років [58].

Румунські оператори. *C.N.F.R. NAVROM S.A.* (м. Галац, Румунія) є четвертим за вантажопідйомністю оператором внутрішнього водного транспорту в ЄС після операторів Нідерландів, Німеччини і Бельгії. Щорічний обсяг перевезень перевищує 10 млн. т вантажів. Флот штовхачів *NAVROM* включає 19 лінійних штовхачів потужністю від 1765 кВт до 2648 кВт серії «*Mercur*», 5 штовхачів потужністю від 800 кВт до 1200 кВт та 9 маневрових штовхачів потужністю від 580 кВт до 660 кВт. Лінійні штовхачі серії «*Mercur 301*»–«*Mercur 309*» мають довжину від 34,60 м до 34,85 м, ширину від 10,10 м до 13,00 м, максимальну осадку від 1,80 м до 2,13 м і обладнані двигунами *CAT 3512* або *КТА* серій. Несамохідний флот налічує 424

суховантажні баржі різних проєктів вантажопідйомністю від 1000 т до 3000 т і 11 наливних барж-танків по 1300 т. Компанія формує каравани з 6–9 барж дедвейтом від 6000 т до 14000 т. У 2006–2007 рр. 14 лінійних штовхачів пройшли капітальний ремонт із заміною двигунів в рамках програми, фінансованої МФК/Світовим банком [7].

Болгарські оператори. *Bulgarian River Shipping J.S.Co.* (Болгарське річкове пароплавство – БРП, м. Русе, Болгарія) є найбільшим болгарським річковим перевізником на Дунаї та лідером серед болгарських компаній за обсягами транспортної діяльності. Флот компанії включає штовхачі, пасажирські судна, відкриті та криті баржі, нафтоналивні танкерні баржі, спеціалізовані баржі та ро-ро баржі. У 2007–2011 рр. холдинг *Chimimport* інвестував у компанію 25 млн. євро: було проведено повну реконструкцію та заміну двигунів 6 штовхачів на нові двигуни *Caterpillar*, а також внесені конструктивні зміни, що забезпечили можливість їх роботи на Верхньому Дунаї. Конкретні технічні характеристики флоту у відкритому доступі обмежені; за наявними даними, діяльність компанії охоплює всю судноплавну ділянку Дунаю від Чорного моря до Рейну [12].

Аналітичні висновки щодо діапазону параметрів флоту. Зведений аналіз технічних характеристик флоту п'яти основних операторів (Додаток В, таблиця В.1) дозволяє зробити кілька ключових висновків для цілей оцінки енергоефективності.

Потужність ГЕУ штовхачів варіює від 750 кВт (малі штовхачі для Верхнього Дунаю) до 2648–3750 кВт (надпотужні лінійні штовхачі *NAVRON* та *DDSG/MAHART* для Нижнього Дунаю) – розкид складає до п'яти разів [7; 23; 58; 102]. Дедвейт каравану при цьому змінюється від 2000–3500 т (одна-дві баржі на Верхньому Дунаї) до 13500–20500 т (каравани з 8–12 барж на Нижньому Дунаї). При різному напрямку руху той самий штовхач забезпечує принципово різний дедвейт каравану: для надпотужних штовхачів *DDSG/MAHART* – 20500 т проти течії і лише 11000 т за течією [23]. Цей факт є прямим обґрунтуванням необхідності врахування напрямку руху та гідрологічних умов при оцінці енергоефективності.

Середній вік флоту є одним із найвищих серед усіх для річкових систем Європи. Більшість штовхачів побудована у 1960–1980-х рр. і обладнана двигунами класу *CCNR Stage I* або нижче; виняток становлять модернізовані штовхачі *NAVRON* (2006–2011 рр.) та *BRP* (2007–2011 рр.) з новими двигунами *Caterpillar*. Технічний стан ГЕУ визначає реальний діапазон питомої витрати палива, який може суттєво відрізнятись від проєктних показників, і підкреслює значущість операційного підходу до оцінки енергоефективності на основі фактичних, а не розрахункових даних.

Жоден із стандартних методів оцінки енергоефективності не розроблявся для такого діапазону варіабельності параметрів флоту в поєднанні зі змінним складом каравану протягом рейсу. Це підтверджує необхідність розробки спеціалізованого підходу, описаного в [розділі 3](#), і дає кількісні орієнтири для параметризації математичної моделі.

2.2.2 Технічні параметри барж типу Європа-II як основної одиниці каравану

На Дунаї експлуатуються несамохідні вантажні баржі різних проєктів і конструктивних рішень, однак усі вони відповідають єдиному розмірному стандарту *AGN/UNECE*, відомому як «Європа-II» (*Europaschiff*): довжина 76,5 м, ширина 11,4 м. За конструктивною класифікацією *CESNI/CCNR* баржі цього типорозміру належать до типу *IIb*. Надалі в тексті дисертації для позначення несамохідних вантажних барж дунайського флоту зазначеного типорозміру вживається скорочена назва «баржа типу Європа-II» незалежно від конкретного проєкту судна.

Несамохідна баржа типу Європа-II є стандартною вантажною одиницею дунайського та рейнського судноплавства і становить основу переважної більшості караванів, що експлуатуються на Дунаї [44; 102]. Її стандартні габарити відповідають мінімальному модулю водних шляхів класу *Va/Vb* за *AGN*. Вантажопідйомність барж типу Європа-II, що експлуатуються на Дунаї, варіює від 1210 до 2400 т залежно від проєкту та технічного стану ([Додаток В](#), таблиця В.1) [23; 58; 102].

Осадка баржі у завантаженому стані є критичним параметром для формування каравану на різних ділянках Дунаю. При максимальному завантаженні 2400 т осадка баржі типу Європа-II досягає 2,7–2,8 м, тоді як при неповному завантаженні (наприклад, 1600 т) – близько 2,1–2,2 м. Порівняння з гарантованими глибинами фарватеру по ділянках (таблиця 2.1) показує, що на більшій частині Нижнього і Середнього Дунаю баржі можуть рухатись з близьким до максимального завантаженням, тоді як на ділянці Штраубінг–Вільсхофен Верхнього Дунаю гарантована глибина 1,55 м при ЕНР унеможливорює повне завантаження навіть однієї баржі [16; 44; 99].

Для цілей математичної моделі енергоефективності, що розробляється в розділі 3, кожна баржа каравану характеризується трьома ключовими параметрами: дедвейтом (фактичною масою вантажу), осадкою та водомісткістю, які визначають гідродинамічний опір і, відповідно, потрібну потужність штовхача. Залежність між цими параметрами є нелінійною, що особливо проявляється в умовах мілководдя при $H/d \leq 2,0$ [77; 99].

2.2.3 Конфігурації караванів та їх залежність від ділянки Дунаю

Конфігурація каравану несамохідних суден визначається як кількість барж у поздовжньому та поперечному напрямках, та визначається насамперед класом водного шляху відповідної ділянки Дунаю, тобто габаритними обмеженнями фарватеру і шлюзових камер (Додаток В, таблиця В.2) [44; 99; 102]. У прийнятих позначеннях запис $M:N$ означає M рядів барж у поперечному напрямку та N рядів у поздовжньому напрямку (за рухом каравану): наприклад, 2:3 – два ряди в ширину і три в довжину, тобто шість барж.

На Верхньому Дунаї (клас Vb–VIa) переважають конфігурації 1:1 та 1:2 через обмеження розмірів шлюзових камер (довжина 225–275 м, ширина 24–34 м). При конфігурації 1:2 (дві баржі послідовно) загальна довжина каравану з штовхачем досягає 170–185 м при ширині 11,4 м, дедвейт – від 2 400 т до 3 200 т [44; 102]. Це означає, що навіть при русі по відносно глибоководній підпірній ділянці Верхнього Дунаю штовхач фактично виконує роботу з мінімальним

складом каравану, що суттєво знижує транспортну ефективність рейсу в розрахунку на одиницю потужності ГЕУ.

На Середньому Дунаї (клас VI b –VII) стають доступними конфігурації 2:1 та 2:2, що дозволяють значно збільшити дедвейт каравану при незначному зростанні потрібної потужності штовхача. При конфігурації 2:2 (чотири баржі) загальна довжина каравану становить від 185 м до 195 м при ширині 22,8 м, дедвейт – від 6400 т до 9600 т [44; 102]. Саме конфігурація 2:2 демонструє найнижчу питому потужність ГЕУ на одиницю корисного навантаження серед типових схем для цієї ділянки [77].

На Нижньому Дунаї (клас VII, вільна течія нижче 863 р. км) реалізуються найбільші конфігурації караванів. Схеми 3:2, 3:3 та 3:4 дозволяють формувати каравани з 6–12 барж при загальній довжині від 275 м до 285 м і ширині від 33,0 м до 34,2 м, дедвейт яких досягає від 14500 т до 27000 т [44; 102]. Каравани з 9 барж при конфігурації 3:3 можуть перевозити до 15750 т вантажу, що еквівалентно 630 вантажівкам або близько 394 залізничних вагонів [14; 44]. Саме на Нижньому Дунаї досягається максимальна транспортна ефективність системи «штовхач + N барж», оскільки нелінійний масштабний ефект – зменшення питомого опору на одиницю вантажу зі збільшенням N – проявляється найбільшою мірою.

На рис. 2.4 схематично показані можливі стандартизовані та нестандартні конфігурації караванів, в яких ведучою одиницею є штовхач.

Стандартизовані конфігурації караванів зі штовхачем

Верхній Дунай (клас IV–VIa, шлюзи 225–275 × 24–34 м)

1:1  → $L \approx 120$ м; $B = 11,4$ м; $D_w = 1300$ – 1600 т

1:2  → $L \approx 185$ м; $B = 11,4$ м; $D_w = 2400$ – 3200 т

Середній Дунай (клас VIb–VII, вільна течія)

2:2  → $L \approx 195$ м; $B = 22,8$ м; $D_w = 6400$ – 9600 т

Нижній Дунай (клас VII, вільна течія нижче 863 р. км)

3:2  → $L \approx 195$ м, $B = 34,2$ м $D_w = 9600$ – 14400 т

3:3  → $L \approx 275$ м; $B = 34,2$ м
 $D_w = 14500$ – 15750 т
 ≈ 630 вантажівок

Нестандартні конфігурації караванів зі штовхачем

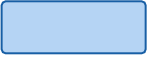
Середній та Нижній Дунай (клас VIb–VII, вільна течія)

2:3  → $L \approx 275$ м; $B = 22,8$ м
 $D_w = 6500$ – 80000 т

2:2  → $L \approx 275$ м; $B = 22,8$ м
 $D_w = 6500$ – 80000 т

Позначення:

 — штовхач ($\approx 35 \times 11$ м, власний вантаж відсутній)

 — несамохідна баржа типу Європа-II ($76,5 \times 11,4$ м)

Напрямок руху →

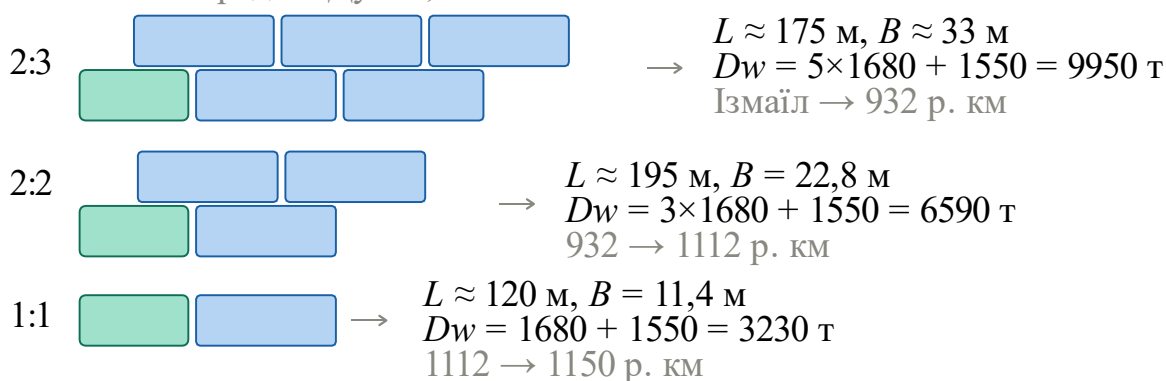
Рисунок 2.4 – Конфігурації караванів (стандартизовані та нестандартні)
штовхача з баржами

Наведені вище конфігурації описують каравани, в яких ведучою одиницею є штовхач – судно, конструктивно не призначене для самостійного перевезення

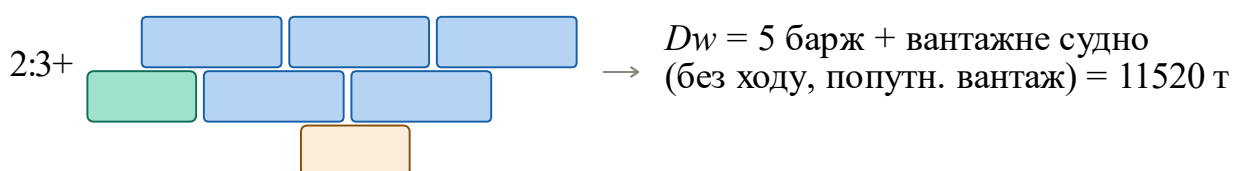
вантажу і позбавлене власних вантажних трюмів. Водночас, як зазначено у п. 2.2.1, на Дунаї експлуатуються також самохідні вантажні судна, здатні працювати у якості ведучої одиниці караванів несамохідних барж (рис. 2.5). Принциповою відмінністю таких караванів є те, що самохідне судно одночасно виконує дві функції: є рушійною одиницею каравану (аналогічно штовхачу) і перевозить власний вантаж у своїх трюмах. Це означає, що загальний дедвейт каравану включає як вантаж барж, так і вантаж самохідного судна, що впливає на методику обчислення транспортної роботи та показника енергоефективності.

Найчастіші конфігурації караванів з ведучим самохідним вантажним судном

Нижній та Середній Дунай, вільна течія



Нестандартна конфігурація: транспортування самохідного судна без ходу



Позначення:

- самохідне вантажне судно ($\approx 80\text{--}110 \times 11,4 \text{ м}$, несе вантаж)
- несамохідна баржа типу Європа-II ($76,5 \times 11,4 \text{ м}$)
- вантажне судно без ходу (транспортується як несамохідне)

Рисунок 2.5 – Конфігурації караванів самохідного вантажного судна з баржами

За даними рейсових схем ПрАТ «УДП» [102], самохідні вантажні судна серії «Капітан Антипов» (потужність ГЕУ 1545 кВт, власна вантажопідйомність $\sim 1550 \text{ т}$) працюють з караванами від 1 до 5 барж типу Європа-II на Нижньому та

Середньому Дунаї. Конфігурації караванів самохідних суден аналогічні за нотацією $M:N$ конфігураціям штовхачів та розташуванням позаду каравану (штовхає баржі перед собою). Максимальна зафіксована конфігурація – 2:3 (п'ять барж і самохідне судно), при якій загальний дедвейт каравану досягає приблизно 9950 т, з яких ~ 1550 т припадає на власний вантаж самохідного судна [102].

Додатковою специфікою дунайського судноплавства є можливість включення до складу каравану самохідного судна, що транспортується без ходу (наприклад, для доставки на базу ремонту). У цьому випадку таке судно фактично виконує функцію несамохідної баржі з попутним вантажем, що ще більше підкреслює нестаціонарність об'єкта оцінки – одне й те саме судно може бути ведучою одиницею каравану в одному рейсі, а в іншому рейсі – несамохідним елементом іншого каравану (рис. 2.5, конфігурація 2:3+).

Таким чином, на Дунаї реалізуються два принципово різні типи караванів: зі штовхачем (рис. 2.4) та із самохідним вантажним судном (рис. 2.5) як ведучою одиницею. Спільною рисою обох типів є змінність складу каравану протягом рейсу – від максимальної конфігурації на Нижньому Дунаї до мінімальної при проходженні ділянок з обмеженнями. Саме ця змінність, що поєднується з принциповою відмінністю у внеску ведучої одиниці в загальний дедвейт каравану (нульовий для штовхача, ~ 1550 т для самохідного судна), є одним із ключових аргументів на користь розробки спеціалізованого способу оцінки енергоефективності, здатного коректно обробляти обидва типи досліджуваних суден у єдиних методологічних рамках.

2.2.4 Зміна конфігурації каравану протягом рейсу як ключовий фактор оцінки енергоефективності

Принципова особливість дунайського рейсу полягає в тому, що конфігурація каравану не залишається постійною від початку до кінця переходу. Цей аспект є ключовим для розуміння специфіки оцінки енергоефективності і відрізняє штовхачі з караванами від будь-якого іншого типу транспортних засобів, для яких розроблені стандартні методи оцінки енергоефективності.

Для типового рейсу від Ізмаїла (від 85 р. км до 94 р. км) до Регенсбургу (від 2 373 р. км до 2379 р. км) або у зворотному напрямку каравани з максимальним складом (3:3; 3:4) на Нижньому Дунаї поступово скорочуються по мірі входження на Середній та Верхній Дунай. Баржі відчіплюються або в проміжних портах (комерційне розвантаження або завантаження), або при підходах до ділянок з обмеженнями по габаритах (технологічні проводки). Схема такого рейсу зображена на рис. 2.6. Зворотний рейс (Регенсбург – Ізмаїл) відбувається у дзеркальній логіці: каравани на Нижньому Дунаї формуються поступово при русі вниз [99; 102].

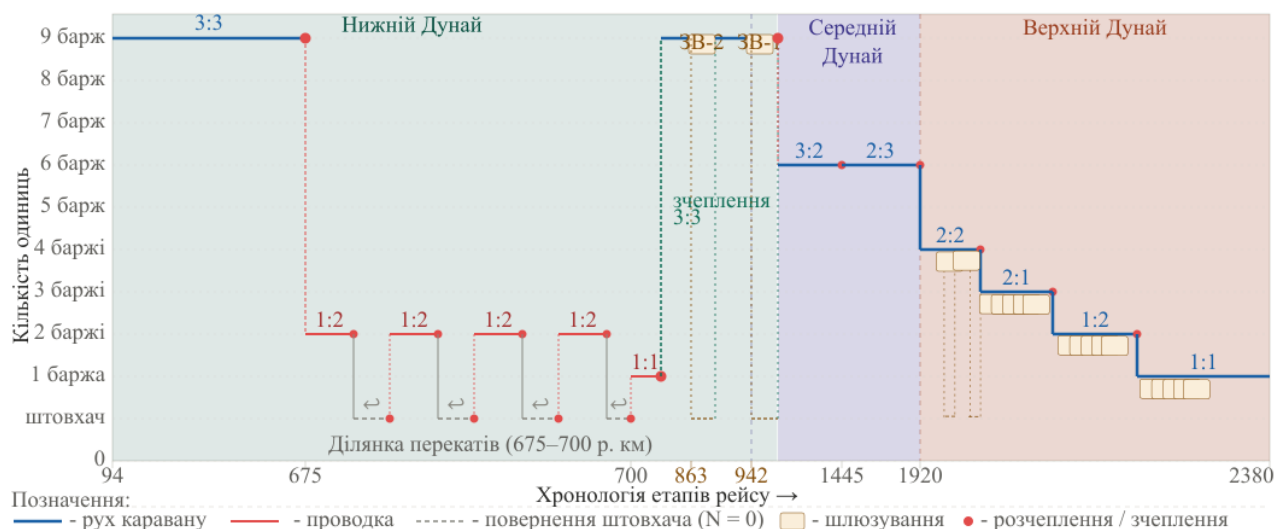


Рисунок 2.6 – Ступінчастий профіль типового рейсу (на прикладі рейсу Ізмаїл – Регенсбург)

На рис. 2.6 схематично показано ступінчастий профіль типового рейсу штовхача з караваном барж на Дунаї. По осі абсцис відкладено хронологію етапів рейсу від нижнього до верхнього б'єфу, а по осі ординат – кількість одиниць у складі каравану (баржі і штовхач). Синя лінія відображає рух штовхача з караваном у повному або частковому складі, червоні точки – моменти розчеплення/зчеплення, пунктирні лінії – проводки і повернення штовхача без каравану, а світлі прямокутники – інтервали шлюзування. Виділено зони Нижнього, Середнього та Верхнього Дунаю, для яких характерні різні допустимі конфігурації караванів за габаритами й глибинами.

Наслідком зміни конфігурації є те, що протягом одного рейсу показник дедвейту каравану може змінюватись від 0 т (поодинокий штовхач під час проводок) до 15000–20000 т (повний склад на Нижньому Дунаї). При цьому потужність ГЕУ штовхача змінюється відносно незначно – штовхач споживає паливо в усіх режимах, але транспортна робота (т·км) різниться на порядок. Саме цей нелінійний зв'язок між споживанням палива і транспортною роботою, зумовлений змінністю складу каравану, є головним методологічним викликом для оцінки енергоефективності, якому присвячено [розділ 3](#) [39; 77; 99].

За даними статті [99], розподіл часу типового дунайського рейсу за характерними етапами такий: рух у повному складі каравану – 65–75 %; зупинки – 2,5–3,5 %; проводка частини каравану через критичні ділянки – 10–15 %; маневрування поодинокого штовхача під час проводок і паузок – 2,5–3,5 %. Така структура рейсу означає, що від 25 до 35 % часу штовхач не виконує повноцінну транспортну роботу у первинному складі каравану, що суттєво впливає на інтегральний показник енергоефективності рейсу.

2.2.5 Перспективи розвитку флоту та їх вплив на вимоги до методів оцінки енергоефективності

Прогноз кількісного складу флоту внутрішнього судноплавства Європи до 2050 р. ([Додаток В](#), таблиця В.3) свідчить про те, що загальна кількість штовхачів потужністю від 500 кВт до 2000 кВт залишатиметься відносно стабільною (від 540 до 555 одиниць по Європі), тоді як частка штовхачів потужністю понад 2000 кВт суттєво не зростатиме. Це означає, що методи оцінки енергоефективності, розроблені для поточного флоту, залишатимуться актуальними в горизонті принаймні до 2035 р., а ймовірно – до 2050 р. [40].

Водночас прогноз вказує на скорочення загальної кількості малих самохідних суден (довжиною менше 80 м) – з 2813 до 1688 одиниць до 2050 р. – при збільшенні частки великих суден. Це свідчить про загальну тенденцію до укрупнення транспортних одиниць і зростання середнього розміру каравану, що підвищує актуальність розробки методів оцінки енергоефективності, здатних коректно описати масштабний ефект каравану [40].

Таким чином, аналіз складу і технічних характеристик дунайського флоту демонструє, що об'єкт дослідження – штовхачі з караванами барж – характеризується надзвичайно широким діапазоном параметрів: потужності ГЕУ (від 750 кВт до 3750 кВт), дедвейту каравану (від 2000 т до 27000 т), конфігурацій (від 1:1 до 3:4) і вікового складу. Жоден із стандартних методів оцінки енергоефективності не розроблявся для такого діапазону варіабельності в поєднанні зі змінним складом каравану протягом рейсу. Це підтверджує необхідність розробки спеціалізованого підходу, описаного в [розділі 3](#), і дає кількісні орієнтири для параметризації математичної моделі.

2.3 Фактори енергоефективності руху караванів на Дунаї

У підрозділах 2.1 та 2.2 встановлено два ключові контексти дослідження: 1 – водний шлях з урахуванням невизначеностей у формі змінних навігаційних умов; 2 – флот з різномаяттям технічних характеристик і конфігурацій караванів. Для розробки способу оцінки енергоефективності необхідно визначити, які саме фактори – і яким чином – впливають на витрату палива штовхача і транспортну роботу каравану протягом рейсу. Даній задачі присвячено цей підрозділ.

2.3.1 Навігаційні фактори

Під навігаційними факторами будемо розуміти зовнішні умови водного шляху, які безпосередньо діють на гідродинаміку руху каравану незалежно від волі оператора. Для дунайського судноплавства вони є найбільш специфічними і відрізняють умови роботи досліджуваних суден з караванами барж від умов морського транспорту, для якого розроблені стандартні методи оцінки енергоефективності.

Глибина фарватеру та ефект мілководдя. Відношення глибини фарватеру до осадки судна H/d є визначальним параметром гідродинамічного опору руху каравану на внутрішніх водних шляхах. При $H/d > 4,0$ вплив мілководдя практично відсутній і опір близький до глибоководного значення. При значеннях H/d від 2,0 до 4,0 спостерігається помірне зростання опору, а при $H/d \leq 2,0$ – нелінійне і різке збільшення. *Zentari et al.* (2022) встановили, що ефект мілководдя стає значущим уже при $H/d \leq 2,0$, а за найменшого дослідженого

відношення $H/d \approx 1,2$ повний опір руху каравану зростає різко нелінійно [77]. *Tabaczek et al.* (2007) показали, що для штовханих барж у мілководному каналі зростання опору є ще більш вираженим, ніж для самохідних суден [62]. Для дунайського судноплавства ефект мілководдя є систематичним: на ділянці Штраубінг–Вільсхофен гарантована глибина при ЕНР становить лише 1,55 м, а осадка повністю завантаженої баржі типу Європа-II досягає 2,7–2,8 м, тобто H/d навіть при частковому завантаженні баржі може наближатися до 1,0 і нижче [16; 44; 74].

Швидкість та напрямок течії. Швидкість течії є другим за значущістю навігаційним фактором. Для підтримання заданої швидкості відносно берега штовхач при русі проти течії повинен розвивати значно більшу тягу – і, відповідно, споживати значно більше палива – ніж при русі за течією з тією самою швидкістю відносно берега. На Нижньому Дунаї під час весняного паводку швидкість течії може досягати значень від 2,5 м/с до 3,0 м/с (від 9 км/год до 11 км/год), що перевищує половину типової швидкості каравану відносно берега [44]. Це означає, що потужність ГЕУ при русі проти течії в паводок може бути у 2–3 рази вищою, ніж при русі з тією самою швидкістю відносно берега за течією в меженний період. Асиметрія витрат палива між рейсом «вгору» і «вниз» є одним із найбільш характерних явищ дунайського судноплавства і одним із найважливіших аргументів на користь необхідності гідрологічного нормування показника енергоефективності [39; 99].

Сезонні коливання рівнів води. Як показано в підрозділі 2.1, амплітуда коливань рівня води між НСР та ВСР на Середньому та Нижньому Дунаї є значною. Підвищення рівня води одночасно змінює три параметри, що впливають на енергоефективність: збільшує глибину фарватеру (знижує ефект мілководдя, відповідно, зменшує опір), збільшує швидкість течії (підвищує потрібну потужність при русі проти течії) і може змінювати допустиму осадку барж (дозволяє збільшити завантаження). Сукупний вплив цих трьох ефектів є нелінійним і залежить від конкретної ділянки та напрямку руху. *Kalajdžić et al.* (2023) встановили, що варіабельність рівнів між НСР та ВСР призводить до 40–

60 % зміни операційного показника *ЕЕО* одного і того самого судна між сезонами [39]. Цей факт унеможливорює коректне порівняння рейсів без явного нормування на гідрологічні умови.

Шлюзування та технологічні простой. На Верхньому Дунаї кожен із 17 гідровузлів вимагає обов'язкового шлюзування, яке займає від 40 хвилин до 3–4 годин з урахуванням очікування [73]. Під час шлюзування та очікування ГЕУ штовхача працює на мінімальному або холостому ході, споживаючи паливо без виконання транспортної роботи. Для рейсу від Регенсбургу (2373–2379 р. км) до Гьоньо (1791 р. км) штовхач проходить 17 шлюзів, і сумарний час шлюзування може становити від 20 до 40 годин, тобто до 10–15 % тривалості цієї частини рейсу [44; 99]. Крім шлюзування, до навігаційних простойв відносяться також очікування у разі обмеженої видимості (туман, снігопад) та вимушені зупинки при екстремально низьких чи високих рівнях води.

Навігаційні фактори енергоефективності – насамперед рівень води, глибина суднового ходу й швидкість течії – безпосередньо пов'язані з положенням гідрологічного режиму між НСР та ВСР. Узагальнені дані табл. Г.1 (Додаток Г) показують, що для різних ділянок Дунаю це положення відповідає істотно різним витратам води, отже, однакові «номінальні» навігаційні обмеження (наприклад, глибина 250–270 см) реалізуються при різних енергетичних витратах руху суден і караванів. У подальших розділах ці діапазони витрат, що відповідають НСР та ВСР на обраних постах (табл. Г.1), використовуються для параметризації маловодних і висоководних режимів у математичній моделі опору руху та потрібної потужності.

2.3.2 Технічні фактори

Технічні фактори – характеристики самого судна і його енергетичної установки, які визначають, наскільки ефективно штовхач перетворює паливо на тягу за заданих навігаційних умов.

Потужність та навантажувальні характеристики ГЕУ. Для типових дунайських штовхачів потужність ГЕУ варіює від 750 кВт до 3750 кВт (підрозділ 2.2). Питома витрата палива дизельного двигуна суттєво залежить від режиму

навантаження: при роботі на оптимальному навантаженні (зазвичай 75–85 % від номінального) питома витрата мінімальна, тоді як при малих навантаженнях (менше 25–30 % від номінального) вона різко зростає – іноді у 1,5–2,0 рази порівняно з оптимальним режимом [72; 99]. Для штовхача, що маневрує без каравану або очікує у шлюзі, ГЕУ часто працює саме в цих неефективних режимах. Таким чином, відповідність встановленої потужності ГЕУ типовим умовам рейсу є самостійним технічним фактором енергоефективності. Штовхач із надлишковою потужністю значну частину рейсу, а також під час проводок та маневрування, працює на частковому навантаженні нижче оптимального, що підвищує питому витрату палива. У випадку недостатньої потужності є ризик тривалого перевантаження ГЕУ або неможливості забезпечити необхідну тягу в несприятливих гідрологічних умовах, що вимагатиме зменшення складу каравану, зниження швидкості, виконання додаткових проводок та маневрів.

Вік та технічний стан флоту. Як показано в [підрозділі 2.2](#), середній вік штовхачів дунайського флоту становить 37–57 років. Двигуни класу *CCNR Stage I* (норми до 2002 р.) або більш ранніх стандартів мають вищу питому витрату палива порівняно з сучасними двигунами, навіть за однакових умов навантаження. Накопичений знос паливної апаратури, турбонаддуву та системи охолодження додатково збільшує фактичну питому витрату відносно паспортних показників. Це означає, що для старого флоту реальні показники енергоефективності можуть суттєво відрізнятися від розрахункових, що є ще одним аргументом на користь операційного підходу до оцінки енергоефективності на основі фактично вимірянних даних, а не проєктних характеристик [99].

2.3.3 Експлуатаційні фактори

Експлуатаційні фактори – це параметри, якими оператор може керувати в рамках поточного рейсу або при плануванні наступного. Вони є основним інструментом практичної оптимізації енергоефективності і водночас основним джерелом варіабельності показника енергоефективності між рейсами за схожих навігаційних умов.

Склад та конфігурація каравану. Як показано в [підрозділах 2.2.2–2.2.4](#), конфігурація каравану є ключовим визначником транспортної роботи рейсу. Із збільшенням кількості барж N дедвейт каравану зростає майже пропорційно N , тоді як потрібна потужність ГЕУ штовхача зростає значно повільніше – через нелінійний масштабний ефект: питомий гідродинамічний опір на одиницю вантажу зменшується зі збільшенням N [77]. Результатом є те, що питома витрата палива SFC (кг/т·км) для великого каравану на Нижньому Дунаї може бути у 3–5 разів нижчою, ніж для поодинокого того самого судна без барж. Зміна конфігурації каравану протягом рейсу – від максимальної на Нижньому Дунаї до мінімальної на Верхньому – є не просто організаційним заходом, а є також фундаментальним фактором, що визначає інтегральний показник енергоефективності всього рейсу.

Завантаженість барж. Ступінь завантаження кожної баржі каравану визначає її осадку i , відповідно, два взаємопов'язані ефекти: по-перше, більше завантаження збільшує транспортну роботу (т·км) при незмінній відстані переходу; по-друге, більша осадка зменшує відношення H/d і посилює ефект мілководдя, що збільшує гідродинамічний опір [77]. На мілководних ділянках Верхнього Дунаю ці два ефекти прямо суперечать один одному: оператор змушений вибирати між збільшенням транспортної роботи і збільшенням питомого опору. Оптимальне завантаження барж у конкретних гідрологічних умовах є нетривіальною задачею оптимізації, для розв'язання якої необхідна математична модель, що розробляється в [розділі 3](#).

Швидкісний режим руху. Гідродинамічний опір руху каравану зростає приблизно пропорційно квадрату швидкості в умовах глибокої води, а в умовах мілководдя – ще швидше, оскільки при наближенні до критичної швидкості (числа Фруда по глибині $Fr_h = v/\sqrt{gH} \rightarrow 1,0$) опір зростає нелінійно і різко [19; 77]. Відповідно, зменшення швидкості на мілководних ділянках дає непропорційно більшу економію палива – це добре відомий оперативний захід підвищення енергоефективності («*slow steaming*» для внутрішнього судноплавства). Водночас зниження швидкості збільшує тривалість рейсу і може

призводити до пропуску вікон шлюзування, що збільшує час простою. Оптимальний вибір швидкісного режиму для кожної ділянки рейсу є тому задачею багатокритеріальної оптимізації [54; 99].

Профіль рейсу та структура витрат часу. Як показано в [підрозділі 2.2.4](#), типовий дунайський рейс складається з якісно різних етапів: рух у повному складі каравану (65–75 % часу), технологічні проводки через мілководні ділянки (10–15 %), маневрування поодинокого штовхача (2,5–3,5 %) і стоянки (2,5–3,5 %) [99]. Кожен з цих етапів характеризується власним значенням питомої витрати палива і власним значенням транспортної роботи (яка може дорівнювати нулю при маневруванні без вантажу). Частка кожного етапу в загальній тривалості рейсу є тому самостійним експлуатаційним фактором енергоефективності: рейс із більшою часткою проводок і маневрування матиме гірший інтегральний показник енергоефективності навіть за ідентичних навігаційних умов і технічних характеристик судна.

2.3.4 Взаємодія факторів та їх вплив на показники витрати палива і транспортної роботи

Три виявлені групи факторів – навігаційні, технічні та експлуатаційні – не діють незалежно одна від одної. Між ними існують суттєві взаємозалежності, що ускладнюють оцінку енергоефективності і разом із тим відкривають можливості для оптимізації.

Взаємодія навігаційних і технічних факторів виявляється насамперед у тому, що ефективність рушійного комплексу залежить від умов обтікання, які, у свою чергу, визначаються глибиною фарватеру і швидкістю течії. Гвинт у насадці, оптимізований для роботи на мілководді з малими швидкостями, може мати нижчий ККД при глибоководному плаванні на Нижньому Дунаї і навпаки. Таким чином, технічні характеристики штовхача мають розглядатися у прив'язці до конкретних навігаційних умов ділянки Дунаю, для якої він призначений [19; 77].

Взаємодія навігаційних і експлуатаційних факторів є ще більш прямою. Допустима конфігурація каравану визначається класом водного шляху

(навігаційний фактор), але вибір конкретної конфігурації в межах допустимої – це рішення оператора (експлуатаційний фактор). Рівень води визначає максимально допустиму осадку (навігаційний фактор), але ступінь фактичного завантаження барж – рішення оператора. Швидкість течії визначає мінімально необхідну потужність для підтримання заданої швидкості (навігаційний фактор), але вибір самої цільової швидкості – рішення оператора. Ця взаємодія означає, що оцінка енергоефективності, яка не розрізняє навігаційні умови і оперативні рішення, не може бути використана для коректного бенчмаркінгу між рейсами [39; 99].

Взаємодія технічних і експлуатаційних факторів проявляється через навантажувальні характеристики ГЕУ. Потужність, потрібна для буксирування каравану заданого складу при заданих навігаційних умовах, є зовнішньою вимогою (визначається навігаційними та експлуатаційними факторами). Фактична питома витрата палива при цій потужності визначається технічними характеристиками двигуна – зокрема, як далеко потрібна потужність відстоїть від оптимального навантаження. Якщо оператор веде каравани, для яких штовхач систематично перевантажений або недовантажений, енергоефективність флоту погіршується з суто технічних причин, навіть якщо навігаційні умови і оперативні рішення є оптимальними [72; 99].

Для цілей розробки способу оцінки енергоефективності, що є предметом [розділу 3](#), ця взаємодія факторів має принципове значення. Вона означає, що інтегральний показник енергоефективності рейсу є функцією одночасно всіх трьох груп факторів і не може бути коректно обчислений або інтерпретований без явного врахування кожної з них. Навігаційні фактори формують зовнішні умови, на які оператор не може впливати і які мають бути нормовані при порівнянні рейсів. Технічні фактори визначають потенційну ефективність перетворення палива у тягу і є відносно стабільними для конкретного судна. Експлуатаційні фактори є керованими змінними, оптимізація яких і є практичною метою системи управління ЕЕ флоту. Саме ця трирівнева структура

факторів буде покладена в основу концептуальної моделі в [підрозділі 2.4](#) та математичної моделі в [розділі 3](#).

2.4 Систематизація факторів і підсумкова концептуальна модель процесу руху досліджуваних суден з караванами на Дунаї

У [підрозділах 2.1–2.3](#) встановлено навігаційно-експлуатаційні умови судноплавного Дунаю, охарактеризовано типовий флот та конфігурації караванів і проведено змістовний аналіз трьох груп факторів, що визначають енергоефективність руху досліджуваних суден з караванами барж. Проведений аналіз є необхідною, але не самодостатньою базою для розробки способу оцінки енергоефективності: фактори описано якісно, тоді як формалізація способу вимагає їх систематизації за ознаками керованості й вимірюваності, явної декомпозиції рейсу за характерними етапами та побудови цілісної концептуальної моделі процесу руху, яка пов’язує вхідні параметри рейсу з інтегральними показниками енергоефективності. Цим задачам присвячено даний підрозділ, який одночасно виконує роль методологічного містка між змістовним описом [розділу 2](#) і математичною формалізацією [розділу 3](#).

2.4.1 Систематизація факторів за ознаками керованості та вимірюваності

Запропонований у [підрозділі 2.3](#) поділ факторів на навігаційні, технічні та експлуатаційні не є простою класифікацією за джерелом впливу. Він відображає принципову методологічну відмінність між трьома типами величин з погляду задачі оцінки енергоефективності: за можливістю керування ними оператором, за темпом змінюваності в межах рейсу та за способом отримання вхідних даних для розрахунку показника. Саме ця відмінність визначає триланкову логіку обробки факторів у способі оцінки: навігаційні фактори підлягають нормуванню, технічні враховуються через характеристики судна, а експлуатаційні є об’єктом оптимізації.

Навігаційні фактори (глибина фарватеру, відношення H/d , швидкість і напрямок течії, рівень води, наявність шлюзів, габаритні обмеження) є зовнішніми й некерованими для оператора в межах окремого рейсу. Їхні

значення задаються характеристиками ділянки водного шляху та її гідрологічним станом і можуть бути виміряні з використанням штатних джерел даних (гідропости, системи *RIS*, лоцманські карти, інформаційні сервіси *viadonau* та Дунайської Комісії). Для цілей оцінки енергоефективності навігаційні фактори відіграють роль умов, відносно яких має бути нормовано підсумковий показник – інакше рейси, виконані у різні сезони або на різних ділянках, не будуть порівнянними [39; 55].

Технічні фактори (встановлена потужність ГЕУ, навантажувальна характеристика двигуна $SFC(L)$, тип рушійного комплексу, вік і технічний стан, екологічний клас двигуна за *CCNR Stage*) описують технічний потенціал перетворення палива у тягу конкретним самохідним судном, штовхачем. Ці фактори є стабільними в межах рейсу і змінюються лише при модернізації судна або повільному зношуванні протягом багатьох років експлуатації. Їхні значення визначаються з паспорта судна, стендових випробувань двигуна та технічних звітів і не вимагають оперативного моніторингу.

Експлуатаційні фактори (склад і конфігурація каравану, ступінь завантаження барж, швидкісний режим по ділянках, тактика проводок і паузок, структура витрат часу рейсу) є керованими: оператор приймає рішення щодо їхніх значень на етапі планування рейсу та коригує їх у процесі виконання. Саме ці фактори є основним інструментом практичного підвищення енергоефективності і водночас основним джерелом варіабельності показника між рейсами за близьких навігаційних умов. Їх отримання забезпечується штатними системами судового обліку – судовим журналом, рейсовими планами, даними *RIS/AIS*.

Зведена систематизація факторів за зазначеними ознаками подана в табл. 2.2. Для кожного фактора вказано характер керованості та ступінь мінливості у межах рейсу, типове джерело даних та орієнтовний діапазон впливу на показники енергоефективності (на основі результатів [підрозділу 2.3](#) та літературних джерел [39; 72; 77; 99]).

Таблиця 2.2 – Систематизований реєстр факторів енергоефективності руху досліджуваних суден з караванами на Дунаї

Група	Фактор	Керованість / ступінь мінливості в рейсі	Джерело даних / спосіб отримання	Орієнтовний діапазон впливу
Навігаційні	Глибина фарватеру, відношення H/d	Некерований; змінюється по ділянках і в часі	Лоцманські карти, гідропости, FAIRway Danube [22]	До 1,5–2,5 рази збільшення опору руху при мілководді за оцінками різних авторів
	Швидкість і напрямок течії	Некерований; сезонна мінливість	Гідропости, моделі ДК, <i>viadonau</i>	Потужність до 2–3 разів при паводку [44; 99]
	Рівень води (НСРР / ВСР)	Некерований; сезонна мінливість	Водомірні пости, річні цикли	Від 40 % до 60 % варіації EEO між сезонами [39]
	Шлюзування і технологічні простої	Частково керований (час старту)	Розклад шлюзів, <i>RIS</i>	До 10–15 % часу на рейсах Верхнього Дунаю [44; 99]
	Габаритні обмеження (осадка, ширина)	Некерований; діє як обмежувач N	<i>AGN/UNECE</i> , клас водного шляху	Визначає $N_{\max}$ по ділянках
Технічні	Встановлена потужність ГЕУ $P_{\text{ном}}$	Стабільний для судна	Паспорт судна	Діапазон від 750 кВт до 3750 кВт по дунайському флоту
	Навантажувальна характеристика $SFC(L)$	Стабільна; повільна зміна з наробітком	Паспорт двигуна, стендові випробування	SFC зростає у 1,5–2,0 рази при $L \leq 0,25–0,30$ [72]
	Тип рушійного комплексу	Стабільний; змінюється при модернізації	Технічна документація	ККД гвинта варіює в межах 0,45–0,65 [19; 77]

	Вік і технічний стан	Стабільний у межах рейсу; повільне погіршення	Технічні звіти, дата модернізації	Збільшення SFC до 10–20 % відносно паспортних [99]
	Екологічний клас ($CCNR$ Stage)	Стабільний; визначає питомі викиди	Сертифікат типу двигуна	CF та питомі викиди NO_x , PM
Експлуатаційні	Склад і конфігурація каравану (N , $M:N$)	Керований; змінюється протягом рейсу	Рейсовий план, судновий журнал	SFC рейсу різниться у 3–5 разів [77]
	Ступінь завантаження барж (осадка d)	Керований на початку, в портах, під час паузок	Судновий журнал, вантажні документи	До ± 30 % транспортної роботи при незмінному FC
	Швидкісний режим по ділянках	Керований в рейсі	Рейсовий план, дані RIS/AIS	Опір $\sim v^2$ (глибока вода), нелінійний при $Fh \rightarrow 1$ [19; 77]
	Тактика провідок і паузок	Керований на етапі планування	Рейсовий план, статистика оператора	10–15 % часу рейсу, основне джерело втрат [99]
	Структура витрат часу рейсу (τ_i)	Частково керований; результат планування	Судновий журнал, системи моніторингу	До 25–35 % часу поза повним складом [99]

Наведена систематизація дозволяє зробити три висновки методологічного характеру. По-перше, жодна з груп факторів не може бути проігнорована без втрати коректності оцінки: навігаційні визначають умови, технічні – потенціал, експлуатаційні – реалізацію цього потенціалу. По-друге, навігаційні й експлуатаційні фактори взаємодіють через обмеження: наприклад, клас водного шляху задає верхню межу $N_{\max}$, а рішення щодо фактичного N приймається оператором у межах цього обмеження. По-третє, відмінність між групами за джерелом даних створює природну ієрархію збору вхідної інформації для способу оцінки: статичні технічні параметри судна зберігаються у довідковій базі, навігаційні отримуються автоматично за ділянками маршруту, а

експлуатаційні – зі штатної суднової звітності. Така ієрархія є відповіддю на вимогу 4 (вимірюваність і практична реалізованість), сформульовану у п. 1.4.4.

2.4.2 Декомпозиція рейсу за характерними етапами та операціоналізація ступінчастого профілю

Ключовою методологічною особливістю досліджуваних суден, виявленою у підрозділах 1.2 та 2.2, є ступінчастий профіль рейсу: протягом одного переходу склад каравану змінюється від максимального до мінімального (включно з поодиноким штовхачем без барж), а режим роботи ГЕУ – від оптимального маршевого до холостого. Як показано у п. 1.4.2, саме цей ступінчастий характер робить стандартний показник $EEOI$ математично невизначеним на етапах, коли $m_{cargo} = 0$ (п. 1.4.2, третє обмеження стандартних методик). Для побудови коректної оцінки енергоефективності необхідна формальна декомпозиція рейсу, яка перетворює ступінчастий профіль із концептуальної характеристики в операціональний об'єкт моделювання.

На основі емпіричного розподілу часу типового дунайського рейсу протяжністю від 1800 км до 2000 км (п. 1.2.2, п. 2.2.4) [99] виокремлено чотири якісно різних етапи $i = 1 \dots 4$, кожен з яких характеризується власним значенням складу каравану N_i , тривалості τ_i , пройденої відстані D_i , маси перевезеного вантажу m_{cargo_i} та режиму роботи ГЕУ. Інтегральні показники рейсу за цими етапами пов'язані адитивними співвідношеннями (2.1):

$$T = \sum_i \tau_i; D = \sum_i D_i; TW = \sum_i m_{cargo_i} \cdot D_i; FC = \sum_i FC_i; i = 1 \dots 4, \quad (2.1)$$

де T – загальна тривалість рейсу;

D – загальна пройдена відстань;

TW – інтегральна транспортна робота рейсу, т·км;

FC – сумарна витрата палива за рейс, т.

Змістовна характеристика кожного етапу, яка синтезує результати аналізу факторів з підрозділу 2.3, наведена в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Декомпозиція типового дунайського рейсу штовхача з караваном за характерними етапами

Етап i	Частка часу τ_i/T , %	Склад каравану N_i і режим руху	Транспортна робота TW_i , витрата палива FC_i , режим ГЕУ
1. Рух у повному складі каравану ($i = 1$)	65–75	$N_i = N_{\max}$; сталий рух	$TW_i = TW_{\max}$; ГЕУ у зоні оптимального навантаження $L \approx 0,70\text{--}0,85$; $SFC \rightarrow SFC_{\min}$; основний внесок у $\sum TW$ і в $\sum FC$
2. Проводка частини каравану ($i = 2$)	10–15	$N_i < N_{\max}$; рух у кілька проходів через критичну ділянку / вузьке місце у частковому складі	$TW_i \ll TW_{\max}$ у розрахунку на одиницю часу; ГЕУ у перехідних режимах; відхилення $SFC \gg SFC_{\min}$
3. Маневрування поодинокого штовхача ($i = 3$)	2,5–3,5	$N_i = 0$; рух у зворотному напрямку без барж	$TW_i = 0$; $FC_i > 0$; ГЕУ у часткових/холостих режимах; стандартний $EEOI$ математично невизначений
4. Стоянка та очікування	2,5–3,5	N_i не має значення; шлюзування, очікування за різних умов	$TW_i = 0$; $FC_i > 0$; ГЕУ у холостих режимах або робота допоміжних ДГ; $SFC \rightarrow SFC_{\max}$

Запропонована декомпозиція має кілька принципових наслідків для способу оцінки. По-перше, інтегральний показник енергоефективності рейсу розраховується як функція окремо визначених етапних величин – це дозволяє коректно обробляти нульову транспортну роботу на етапах 3 і 4 шляхом її врахування в знаменнику інтегрального показника (сума TW залишається додатною за рахунок етапів 1 і 2), а відповідне паливо – у чисельнику. По-друге, частка кожного етапу τ_i/T сама стає змістовним показником операційної ефективності: рейс із більшою часткою етапів 2 і 3 має гіршу енергоефективність навіть за ідентичних навігаційних і технічних умов. По-третє, декомпозиція створює природну структуру для бенчмаркінгу: порівняння рейсів можна

проводити не лише за інтегральним показником, а й поетапно – виявляючи джерела втрат у режимі проводок, маневрування або очікування.

Межі етапів у реальних рейсах можуть бути розмитими (наприклад, відчеплення останньої баржі перед входом у мілководну ділянку), однак для цілей способу оцінки достатня точність декомпозиції досягається на основі штатної судової звітності – судовий журнал, рейсовий план, записи *RIS/AIS*. У випадках, коли оператор має розширені системи моніторингу з поконтурним обліком витрати палива, декомпозиція може виконуватися з точністю до окремої операції, що додатково підвищує достовірність показника.

2.4.3 Концептуальна модель процесу руху досліджуваних суден з караванами на Дунаї

Систематизація факторів (п. 2.4.1) і декомпозиція рейсу (п. 2.4.2) дають необхідні структурні елементи для побудови підсумкової концептуальної моделі процесу руху досліджуваних суден. Модель представляє процес руху як багаторівневу функціональну трансформацію вхідних параметрів рейсу в інтегральні показники енергоефективності через послідовність п'яти блоків, пов'язаних причинно-наслідковими зв'язками (рис. 2.7).

Блок 1. Вхідні дані рейсу – початкові параметри, які повністю описують конкретний рейс як об'єкт оцінки. Вхідні дані згруповано у три масиви відповідно до структури джерел: маршрут і розклад (послідовність ділянок, напрямок руху, проміжні порти, шлюзи, критичні ділянки з обмеженнями осадки); параметри судна і каравану (тип штовхача, встановлена потужність ГЕУ, склад каравану N , конфігурація $M:N$, завантаження та осадка барж, план зміни N за етапами); гідрологічні умови (рівень води, глибина фарватеру H по ділянках, швидкість течії $v_{\text{теч}}$). Цей блок оперує даними, отриманими з джерел, систематизованих у п. 2.4.1, і є тією інформаційною базою, вимірюваність якої визначена вимогою 4 (п. 1.4.4).

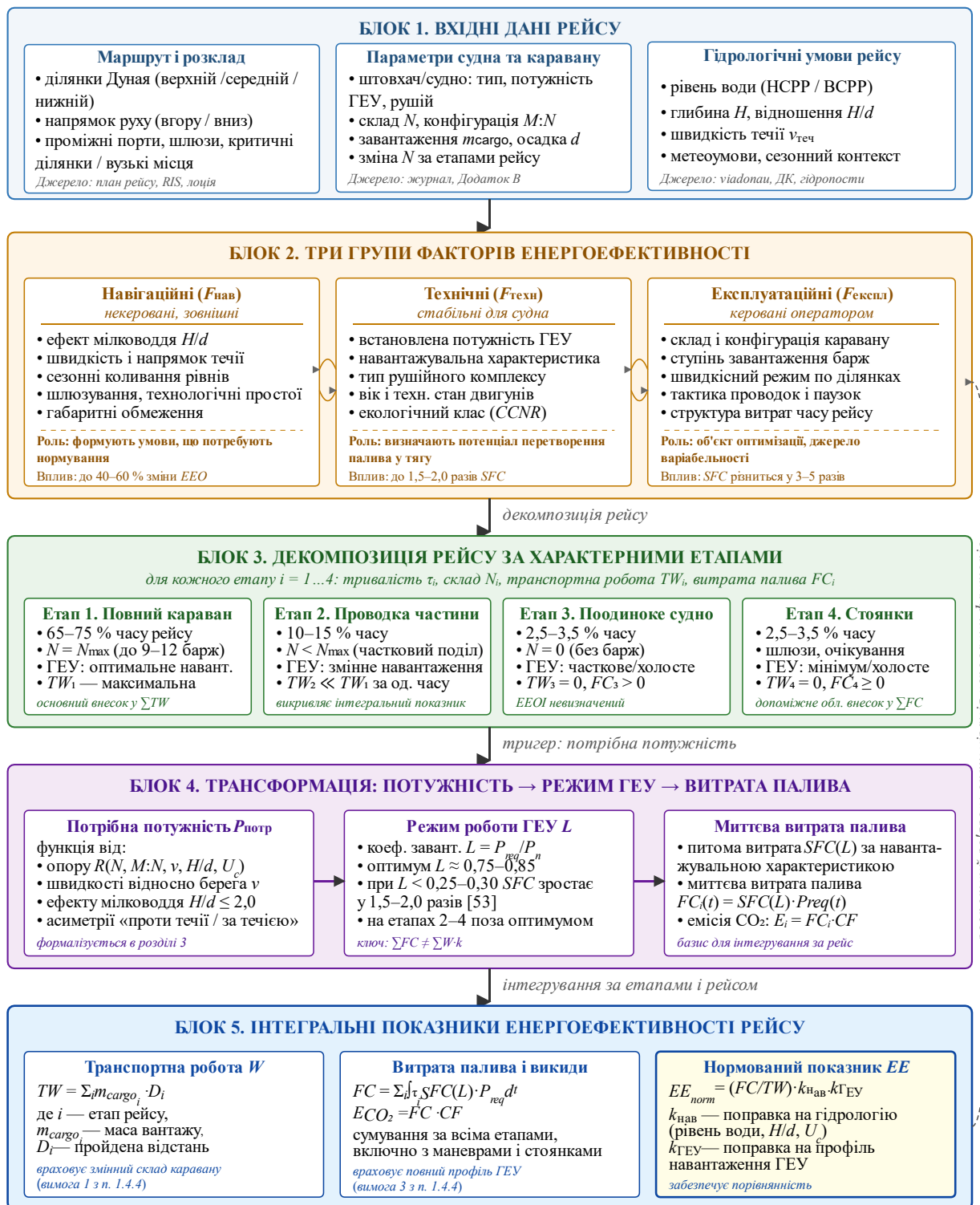


Рисунок 2.7 – Концептуальна модель процесу руху штовхачів з караванами на Дунаї

Блок 2. Три групи факторів. Вхідні дані трансформуються у значення навігаційних, технічних і експлуатаційних факторів у тому вигляді, в якому вони входять до розрахункових залежностей. Між групами факторів існують взаємозв'язки, охарактеризовані у п. 2.3.4: навігаційні й технічні фактори

визначають гідродинамічне середовище, у якому працює рушійний комплекс; навігаційні й експлуатаційні – допустимі конфігурації та завантаження каравану; технічні й експлуатаційні – фактичний режим роботи ГЕУ в конкретних умовах. Для цілей концептуальної моделі ці взаємозв'язки зображено двонапрямними зв'язками між відповідними групами, а формальне їх закріплення у вигляді рівнянь і поправкових функцій вноситься у розділ 3.

Блок 3. Декомпозиція рейсу за етапами. На цьому рівні цілісний рейс представляється у вигляді послідовності чотирьох характерних етапів (див. табл. 2.3), кожен з яких характеризується власним набором значень N_i , τ_i , D_i , m_{cargoi} і власним режимом роботи ГЕУ. Декомпозиція переводить ступінчастий профіль рейсу зі змістовної характеристики в операціональний об'єкт моделювання: всі подальші розрахунки виконуються поетапно, а інтегральні показники рейсу формуються шляхом підсумовування згідно з формами (2.1).

Блок 4. Трансформація «потрібна потужність $\rightarrow$ режим ГЕУ $\rightarrow$ миттєва витрата палива» є центральною ланкою концептуальної моделі, яка пов'язує фактори й етапи з енергоспоживанням. Для кожного етапу i та кожного моменту часу в межах етапу послідовно обчислюються три взаємопов'язані величини: (а) потрібна потужність $P_{req}(t)$ як функція опору руху каравану заданого складу при заданих навігаційних умовах і цільовій швидкості; (б) коефіцієнт завантаження ГЕУ $L(t) = \frac{P_{req}(t)}{P_n}$; (в) миттєва витрата палива $FC(t) = SFC(L) \cdot P_{req}(t)$. Принциповою особливістю цієї ланки є те, що питома витрата SFC залежить від L нелінійно: при $L \leq 0,25\text{--}0,30$ вона зростає у 1,5–2,0 рази порівняно з оптимальним режимом $L \approx 0,75\text{--}0,85$ [72]. Саме ця нелінійність є формальною причиною того, що сумарна витрата палива за рейс не може бути коректно отримана як добуток середньої потужності на тривалість – потрібне поетапне інтегрування з урахуванням $SFC(L)$.

Блок 5. Інтегральні показники енергоефективності рейсу формуються шляхом агрегування етапних величин у три групи вихідних характеристик:

інтегральна транспортна робота TW , сумарна витрата палива FC і відповідні викиди CO_2 , а також нормований показник енергоефективності:

$$EE_{norm} = \left(\frac{FC}{TW} \right) \cdot k_{нав} \cdot k_{ГЕУ}, \quad (2.2)$$

де $k_{нав}$ – поправка на гідрологічні умови рейсу;

$k_{ГЕУ}$ – поправка на профіль навантаження ГЕУ.

Структура нормованого показника є відповіддю на ключову проблему, сформульовану в п. 1.4.3 (неврахування стандартними методиками одночасно трьох груп чинників), а аналітична форма поправок $k_{нав}$ і $k_{ГЕУ}$ є об'єктом формалізації у розділі 3.

Додатковою структурною особливістю моделі, відображеною на рис. 2.7 пунктирним зворотним зв'язком, є те, що результат оцінки – значення EE_{norm} – використовується не лише як кінцевий показник звітності, а й як цільова функція для оптимізації керованих (експлуатаційних) факторів. Саме цей зворотний зв'язок перетворює спосіб оцінки у практичний інструмент управління енергоефективністю флоту, що відповідає меті дисертаційного дослідження, сформульованій у п. 1.5.

2.4.4 Узгодження концептуальної моделі з вимогами до способу оцінки енергоефективності та перехід до математичного моделювання

Побудована концептуальна модель повинна відповідати системі з шести вимог до способу оцінки енергоефективності, сформульованих у п. 1.4.4 на основі аналізу нормативних документів ЄС та критичної оцінки наявних методик. Зіставлення вимог і способу їхнього виконання в межах запропонованої моделі подано в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Відповідність концептуальної моделі вимогам до способу оцінки енергоефективності, сформульованим у п. 1.4.4

Вимога (п. 1.4.4)	Стислий зміст	Як відповідає запропонована концептуальна модель
Вимога 1	Адаптованість до змінного об'єкта оцінки (змінний N , завантаження барж за рейс)	Декомпозиція рейсу на етапи з власними N_i і m_{cargo_i} ; інтегральна TW враховує

		зміну N у часі; систематизація факторів у табл. 2.2 експліцитно фіксує спосіб обробки змінних N і m_{cargo}
Вимога 2	Урахування гідрологічних умов (рівень води, швидкість течії)	Навігаційні фактори входять у обчислення $P_{потр}$ через залежності $R(H/d, v_{теч})$; уводиться коефіцієнт $k_{нав}$
Вимога 3	Структурованість за етапами рейсу, облік профілю навантажень ГЕУ	Явна декомпозиція $\sum FC = \sum_i \int_{\tau_i} SFC(L) \cdot P_{потр} dt$; коефіцієнт $k_{ГЕУ}$
Вимога 4	Вимірюваність і практична реалізованість	Вхідні дані – штатні журнальні: $\tau_i, N_i, m_{cargo_i}, D_i$, $\sum FC, P_{потр}$ (оцінюється за навантажувальною характеристикою)
Вимога 5	Порівнянність, масштабованість, нормування	Введення $EE_{norm} = \left(\frac{FC}{TW}\right) \cdot k_{нав} \cdot k_{ГЕУ}$ забезпечує бенчмаркінг між рейсами, суднами, сезонами
Вимога 6	Відповідність регуляторному контексту ЄС (рівні C і D <i>PLATINA3/D2.6</i>)	Модель поєднує гідродинамічну складову (рівень C) з операційними даними (рівень D)

Таким чином, запропонована концептуальна модель є методологічно несуперечливою і забезпечує всі ключові вимоги, які впливають з регуляторного контексту ЄС, аналізу літератури та особливостей дунайського судноплавства. Водночас концептуальна модель залишається на рівні функціональних зв'язків: вона встановлює, що і як має бути пов'язане у способі оцінки, але не дає конкретних аналітичних залежностей для розрахунку опору руху, потрібної потужності, питомої витрати палива та поправкових коефіцієнтів $k_{нав}$ і $k_{ГЕУ}$.

Формалізація цих залежностей складає зміст [розділу 3](#), де на основі концептуальної моделі розробляється математична модель енергоспоживання руху штовхачів з караванами на Дунаї. Зокрема, у розділі 3 будуть

конкретизовані: модель сил опору $R\left(N, M: N, v, \frac{H}{d}, U_c\right)$ з урахуванням ефекту мілководдя та асиметрії «проти течії / за течією»; модель потрібної потужності $P_{req}(R, \eta_{prop}, \eta_D)$; навантажувальна характеристика $SFC(L)$ та модель витрати палива й викидів CO_2 ; аналітичні форми поправок $k_{нав}$ і $k_{ГЕУ}$; процедура агрегування етапних величин у нормований показник EE_{norm} . Побудова цих залежностей та їх чутливість до навігаційних і експлуатаційних факторів, а також верифікація моделі за літературними і доступними експлуатаційними даними складатимуть зміст підрозділів 3.1–3.5.

Висновки до другого розділу

1. Проаналізовано навігаційно-експлуатаційні умови судноплавного Дунаю від Кельхайму до Чорного моря, встановлено поділ на Верхній, Середній і Нижній Дунай та показано, що ці ділянки істотно відрізняються за класом водного шляху (IV–Va–Vb–VIa, VIb–VII, VII відповідно), ступенем зарегульованості стоку, глибиною фарватеру, гідрологічним режимом і допустимими конфігураціями караванів. Доведено, що ці відмінності є систематичними й потребують явного врахування у способі оцінки енергоефективності.

2. Охарактеризовано гідрологічний режим Дунаю на основі стандартних рівнів НСР, ВСР та ЕНР (НСРР) і встановлено, що варіабельність рівнів між НСР і ВСР призводить до зміни операційного показника енергоефективності *ЕЕО* одного і того самого судна на 40–60 % між сезонами. Цей факт обґрунтовує необхідність гідрологічного нормування показника енергоефективності для коректного порівняння рейсів.

3. Систематизовано склад типового дунайського флоту та технічні параметри його основних одиниць на основі даних п'яти ключових операторів (ПрАТ «УДП», *DDSG/MAHART*, *Rhenus PartnerShip Serbia*, *C.N.F.R. NAVROM S.A.*, *Bulgarian River Shipping J.S.Co.*). Встановлено, що потужність ГЕУ штовхачів варіює від 750 кВт до 3750 кВт, а дедвейт каравану – від 2000 т до 27000 т, що перевищує відповідні діапазони, для яких розроблялися стандартні методи оцінки енергоефективності морських суден.

4. Доведено, що принципова особливість дунайського рейсу полягає у ступінчастому профілі – склад каравану змінюється протягом одного переходу від максимального (до 9–12 барж на Нижньому Дунаї) до мінімального (поодинокий штовхач під час проводок). На основі даних статистики рейсів встановлено типовий розподіл часу рейсу за етапами: рух у повному складі – 65–75 %, проводка частини каравану – 10–15 %, маневрування поодинокого штовхача – 2,5–3,5 % та стоянки – 2,5–3,5 %.

5. Проведено змістовний аналіз трьох груп факторів, що визначають енергоефективність руху: навігаційних (некерованих зовнішніх умов водного шляху), технічних (стабільних характеристик судна та його ГЕУ) й експлуатаційних (керованих параметрів рейсу). Кількісно охарактеризовано вплив кожної групи: ефект мілководдя вже при $H/d \leq 2,0$ стає значущим, а за найменшого дослідженого відношення $H/d \approx 1,2$ повний опір руху каравану зростає різко нелінійно – за оцінками різних авторів, до 1,5–2,5 раза порівняно з глибокою водою.; режими ГЕУ при $L \leq 0,25–0,30$ збільшують SFC у 1,5–2,0 рази; конфігурація каравану визначає відмінність SFC рейсу у 3–5 разів.

6. Встановлено наявність суттєвих взаємозалежностей між трьома групами факторів: навігаційні умови обмежують допустимі експлуатаційні рішення, технічні характеристики визначають ефективність реалізації цих рішень, а навігаційні й технічні разом визначають гідродинамічне середовище рушійного комплексу. Ця взаємодія унеможлиблює побудову коректної оцінки енергоефективності без одночасного врахування всіх трьох груп і є безпосереднім обґрунтуванням структури запропонованої концептуальної моделі.

7. Запропоновано систематизований реєстр факторів енергоефективності руху досліджуваних суден з караванами на Дунаї (табл. 2.2), який класифікує фактори за ознаками керованості, ступеня мінливості в рейсі, джерела даних та орієнтовного діапазону впливу на показники енергоефективності. Запропонована систематизація є основою для розроблення механізмів нормування й оптимізації у способі оцінки.

8. Виконано формальну декомпозицію типового дунайського рейсу на чотири якісно різних етапи з власними значеннями тривалості τ_i , складу каравану N_i , пройденої відстані D_i , транспортної роботи TW_i і витрати палива FC_i . Декомпозиція переводить ступінчастий профіль рейсу із концептуальної характеристики в операціональний об'єкт моделювання та знімає проблему математичної невизначеності показника $EEOI$ на етапах з нульовою транспортною роботою.

9. Побудовано концептуальну модель процесу руху штовхачів з караванами на Дунаї у вигляді п'ятиблочної функціональної трансформації вхідних даних рейсу в інтегральні показники енергоефективності через послідовність: вхідні дані → три групи факторів → декомпозиція рейсу → трансформація «потрібна потужність → режим ГЕУ → миттєва витрата палива» → нормовані інтегральні показники. Центральним елементом моделі є нормований показник енергоефективності $EE_{\text{норм}}$ (2.2), який забезпечує порівнянність оцінок між рейсами, суднами й сезонами.

10. Підтверджено відповідність запропонованої концептуальної моделі всім шести вимогам до способу оцінки енергоефективності, сформульованим у п. 1.4.4 (табл. 2.4): адаптованість до змінного об'єкта оцінки, урахування гідрологічних умов, структурованість за етапами рейсу, вимірюваність і практична реалізованість, порівнянність і нормування, відповідність регуляторному контексту ЄС. Концептуальна модель утворює методологічну основу для розроблення математичної моделі енергоспоживання і способу оцінки енергоефективності, якій присвячено розділи 3 і 4 дисертаційної роботи.

11. Сформульовано перелік залежностей і поправок, що підлягають математичній формалізації у розділі 3: модель опору $R(N, M:N, v, H/d, v_{\text{теч}})$; модель потрібної потужності; навантажувальна характеристика $SFC(L)$; аналітичні форми поправок $k_{\text{нав}}$ і $k_{\text{ГЕУ}}$.

Таким чином, у розділі 2 повністю вирішено другу головну наукову задачу дослідження (ГЗ-2) та всі три її допоміжні задачі (ДЗ 2.1–2.3 відповідно до технологічної карти дослідження, Додаток Г). Крім того, побудовано концептуальну модель (п. 2.4), яка утворює методологічну основу для вирішення третьої головної задачі (ГЗ-3) у розділі 3.

Основні наукові результати по розділу наведені в працях здобувача [66–69; 72; 76; 85–87; 90–100].

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ РУХУ ШТОВХАЧІВ З КАРАВАНАМИ НА ДУНАЇ

Результати аналізу існуючих методів оцінки енергоефективності суден (розділ 1) та особливостей дунайського судноплавства з погляду складу флоту, конфігурацій караванів і гідрологічних умов (розділ 2) показали, що стандартні індекси типу *EEDI*, *EEXI*, *EEOI* та їх модифікації не враховують повною мірою специфіку роботи досліджуваних суден з караванами барж. Основними відмінними рисами є: змінний склад каравану протягом рейсу; сильна залежність опору та потрібної потужності від глибини фарватеру й течії при відношенні $H/d \leq 2,0$; суттєвий внесок структури часу рейсу (частка проводок, паузок, маневрувань) в інтегральні показники витрати палива та викидів. Ці фактори систематизовані у підрозділі 2.4 та покладені в основу концептуальної моделі, побудованої у п. 2.4.3.

Загальна логіка побудови розділу 3 проілюстрована на рис. 3.1. Послідовність викладу відображає поступовий перехід від концептуальної постановки задачі через її параметризацію за реальними експлуатаційними даними до імовірнісного узагальнення, що дозволяє кількісно оцінити вплив гідрологічної, експлуатаційної та технічної невизначеності на показники енергоефективності рейсу.



Розділ 4: апробація на даних рейсів УДП

Рисунок 3.1 – Структура розділу 3

Завданням цього розділу є формулювання математичної моделі руху досліджуваних суден (самохідних вантажних суден і штовхачів) з караванами несамохідних барж, яка поєднує гідродинамічні, експлуатаційно-часові та метеорологічні фактори в єдиному узагальненому векторі стану й дозволяє описати сумарний опір руху, потрібну потужність на валах і витрату палива як функції цього вектора. На відміну від класичних моделей для поодиноких суден, модель має забезпечити:

- можливість явного врахування конфігурації каравану (кількість барж, їх розміщення та завантаження);
- чутливість до гідроморфологічних умов дунайського русла (глибина, течія, ухил дна);
- прив'язку до структури часу рейсу (частки повного ходу, проводок, стоянок, маневрів) як до окремого блоку факторів.

Ці вимоги безпосередньо впливають із шести вимог до способу оцінки енергоефективності, сформульованих у п. 1.4.4, та відповідають другій головній науковій задачі дослідження (ГЗ-2) і третій головній задачі (ГЗ-3) відповідно до технологічної карти дослідження (Додаток Г). У подальшому ця модель використовується як основа для побудови показника енергоефективності руху каравану, узгодженого з концепціями *EEOI/EEO*, але адаптованого до змінного складу каравану й гідрологічного нормування, обґрунтованого у п. 2.3–2.4. Окремою наскрізною вимогою до способу є його практична придатність до впровадження: розрахункові процедури та інструмент програмної реалізації мають бути простими для застосування на судні та в судноплавній компанії, не потребувати спеціалізованого чи коштовного програмного забезпечення й висококваліфікованого статистичного супроводу. Цей принцип, зумовлений експлуатаційною спрямованістю роботи, визначає вибір методів на користь обчислювально простих і прозорих процедур скрізь, де це не шкодить достовірності результату; ускладнені статистичні методи застосовуються лише тоді, коли вони дають істотний приріст точності, недосяжний простими засобами.

3.1 Рейс штовхача з караваном барж як неусталений багаторежимний процес

Як показано в розділі 2, рейс дунайського штовхача з караваном несамохідних барж не може розглядатися як однорідний або усталений з точки зору гідрологічних умов, складу каравану, навантаження на головну енергетичну установку (ГЕУ) та структури часу. Протягом типового переходу від Нижнього до Верхнього Дунаю конфігурація каравану змінюється ступінчасто: на окремих ділянках караван формується в складі 3:3 або 3:4, на інших – скорочується до 2:2, 2:1 чи 1:1, а на критичних мілководних відтинках або в зоні шлюзування штовхач може рухатись з однією баржею або навіть без барж ($N = 0$). При цьому змінюються глибина фарватеру, швидкість течії, клас водного шляху за AGN , а також чергуються режими повного ходу, проводок, маневрування та стоянок, що призводить до практично безперервної зміни режиму роботи пропульсивного комплексу.

Ступінчаста структура рейсу (п. 2.2.4, рис. 2.6) означає, що навіть при номінально «сталому» завданні щодо середньої швидкості або витрати палива ГЕУ фактично працює переважно на перехідних, неусталених режимах. Зміни глибин під кілем, ухилу русла, течії, конфігурації каравану, ступеня завантаження барж і режимів руху призводять до постійної адаптації потужності й частоти обертання, що впливає як на миттєву, так і на інтегральну енергоефективність рейсу. Отже, для коректної оцінки енергоефективності об'єктом моделювання має бути не тільки статика опору або окремі усталені точки характеристики пропульсивного комплексу, а часовий процес руху каравану в цілому.

У такій постановці доцільно описувати потужність, витрату палива й транспортну роботу як функції часу, а інтегральний показник енергоефективності рейсу – у формі визначеного інтегралу за часом або пройденим шляхом. Це дозволяє природно охопити всі етапи рейсу, включно з проводками, порожніми переходами штовхача й періодами шлюзування, і уникнути втрати інформації при надмірній дискретизації процесу.

3.1.1 Часові залежності потужності, витрати палива та транспортної роботи

Розглянемо рейс тривалістю T від моменту виходу каравану з вихідного порту до завершення основних вантажних операцій у порту призначення. Для кожного моменту часу $t \in [0, T]$ введемо такі функції:

- $P_e(t)$ – миттєва ефективна (гальмівна) потужність головних двигунів на колінчастому валу, кВт; саме до неї відноситься питома витрата палива SFC ;
- $FC_h(t)$ – миттєва масова витрата палива головними двигунами, т/год (або кг/год);
- $m_{cargo}(t)$ – сумарна маса корисного вантажу в каравані, т;
- $v_g(t)$ – швидкість руху каравану відносно берега, км/год;
- $N(t)$ – кількість барж у складі каравану (ступінчаста функція часу);
- $H(t)$ – глибина фарватеру під еквівалентною осадкою каравану, м;
- $U_c(t)$ – швидкість течії, км/год;
- $shape(t)$ – конфігурація каравану (кількість барж у поперечному й поздовжньому напрямках, розташування штовхача, габарити й осадки барж).

У межах запропонованої моделі потужність $P(t)$ розглядається як функція миттєвого вектора стану $x(t)$, який об'єднує гідродинамічні, навантажувальні, експлуатаційно-часові та параметри роботи енергетичної установки. У спрощеному вигляді

$$P_e(t) = P_e(x(t)). \quad (3.1)$$

У свою чергу в розгорнутому вигляді миттєвий вектор стану

$$x(t) = \begin{pmatrix} v(t), H(t), U_c(t), i_r(t), k_{hull}(t), \\ m_{cargo}(t), N(t), shape(t), d_{eq}(t), \\ \tau_{mode}(t), \\ n(t), M(t), SFC(t), \eta_{prop}(t) \end{pmatrix}, \quad (3.2)$$

де $v(t)$ – швидкість відносно води ($v(t)$ та $v_g(t)$ взаємопов'язані через швидкість течії $U_c(t)$); $m_{cargo}(t), N(t), shape(t), d_{eq}(t)$ – маса вантажу, кількість барж, конфігурація та еквівалентна осадка каравану; $\tau_{mode}(t)$ – активний режим руху в момент часу t (повний хід, проводка, маневрування,

стоянка, шлюзування), його дискретну формалізацію через частки часу на ділянках наведено в п. 3.2; $n(t), M(t), SFC(t), \eta_{prop}(t)$ – частота обертання, крутний момент, питома витрата палива й пропульсивний ККД ГЕУ.

Миттєва витрата палива пов'язана з потужністю через питому витрату палива двигунів:

$$FC_h(t) = SFC(t)P_e(t) \cdot 10^{-6}, \quad (3.3)$$

де $SFC(t)$ – миттєве значення питомої витрати палива, г/(кВт·год); $P_e(t)$ – ефективна потужність, кВт. Множник 10^{-6} переводить г/год у т/год. $SFC(t)$ залежить від режиму роботи ГЕУ (частоти обертання, крутного моменту, навантаження) і відображає перехідний характер процесу. Значні коливання $SFC(t)$ по рейсу підтверджені результатами систематичних експлуатаційних спостережень для штовхачів із караванами на Дунаї.

Тоді інтегральна витрата палива за рейс:

$$FC_{\Sigma} = \int_0^T FC_h(t)dt = \int_0^T SFC(t)P_e(t)dt. \quad (3.4)$$

Транспортну роботу каравану за рейс доцільно визначити як інтеграл від добутку маси корисного вантажу на швидкість відносно берега:

$$W_{\Sigma} = \int_0^T m_{cargo}(t)v_g(t)dt, \quad (3.5)$$

що в розмірності т·км відповідає сумі елементарних транспортних робіт за всі диференціальні проміжки часу. Альтернативно, при переході до параметра пройденого шляху $s \in [0, S]$ можна записати:

$$W_{\Sigma} = \int_0^S m_{cargo}(s)ds, \quad (3.6)$$

де $m_{cargo}(s)$ змінюється ступінчасто відповідно до точок завантаження, розвантаження та розчеплення барж уздовж маршруту.

Слід зауважити, що рівність $v_g = \frac{ds}{dt}$ і, відповідно, ненульова транспортна робота мають місце лише на ділянках руху. На стоянках, шлюзуваннях і під час маневрування $ds = 0$, тобто транспортна робота не накопичується, тоді як витрата палива на цих ділянках входить у чисельник індексу. Це забезпечує коректне врахування непродуктивних режимів: вони збільшують чисельник, не

збільшуючи знаменник, і тим самим збільшують показник енергоефективності рейсу EE , що відповідає погіршенню енергоефективності рейсу.

Таким чином, навіть якщо в подальшому для практичних розрахунків використовуються усереднені значення по ділянках, фундаментальна постановка базується на інтегральних залежностях за часом або пройденим шляхом.

3.1.2 Вектор стану рейсу та неусталені режими роботи ГЕУ

Щоб формально відобразити неусталений багаторежимний характер рейсу, введемо вектор стану системи «штовхач–караван–водний шлях–ГЕУ» на інтервалі $[0, T]$. Для кожного моменту часу:

$$x(t) = (x_{hydro}(t), x_{load}(t), x_{time}(t), x_{eng}(t)), \quad (3.7)$$

де $x_{hydro}(t) = (v(t), H(t), U_c(t), i_r(t), k_{hull}(t))$ – гідродинамічний підвектор, що описує швидкість руху відносно води, глибину, течію, ухил русла, технічний стан корпусів і конфігурацію каравану;

$x_{load}(t) = (m_{cargo}(t), N(t), shape(t), d_{eq}(t))$ – підвектор завантаження та конфігурації каравану (маса корисного вантажу, кількість барж, конфігурація каравану й еквівалентна осадка); змінюється ступінчасто в точках завантаження, розвантаження та розчеплення/зчеплення барж;

$x_{time}(t)$ – експлуатаційно-часовий підвектор, який задає активний режим руху в момент часу T (повний хід, проводка, маневри, стоянка, шлюзування); його інтегральні частки часу на ділянках формалізовано в п. 3.2;

$x_{eng}(t) = (n(t), M(t), SFC(t), \eta_{prop}(t))$ – підвектор робочого процесу ГЕУ (частота обертання, крутний момент, питома витрата палива, пропульсивний ККД). Вимірюваними з рейсового журналу є $n(t)$ і $SFC(t)$; момент $M(t)$, ККД $\eta_{prop}(t)$ та похідна ефективна потужність $P_e(t) = M(t) \cdot \omega(t)$ відновлюються методом параметричної діагностики (п. 3.3.3).

Метеорологічні чинники (швидкість і напрямок вітру) до складу вектора стану не включаються: вони не фіксуються систематично в рейсових даних, а для штовхача з низькобортними баржами їхній вплив на енергоспоживання малий порівняно з гідродинамічними та конфігураційними чинниками. Повітряний

опір ураховується надалі сталою складовою R_{air} у моделі опору (п. 3.3), а не часозалежним метеорологічним підвектором.

На відміну від усталених моделей, де величини v , H , U_c , N вважаються постійними або усередненими для всього рейсу, тут вони розглядаються як функції часу, а їхній вплив на опір, потрібну потужність і витрату палива відображається через функціональну залежність:

$$R(t) = R(x(t)), P(t) = P(x(t)), FC_h(t) = FC_h(x(t)). \quad (3.8)$$

Ступінчастий характер зміни конфігурації каравану, показаний на рис. 2.6, означає, що $shape(t)$ та $N(t)$ є кусково-сталими функціями з розривами першого роду в моменти розчеплення/зчеплення барж. Глибина $H(t)$ та швидкість течії $U_c(t)$ змінюються як унаслідок переходу між ділянками з різними гідрологічними характеристиками, так і через сезонні коливання рівня води. Режими роботи ГЕУ, у свою чергу, переходять між різними зонами поля навантаження двигуна (повний хід, маневрування, холостий хід на проводках), що зумовлює зміну $SFC(t)$ в часі.

З формальної точки зору це означає, що рейс є неусталеним процесом, у якому більшість часу ГЕУ працює в режимах адаптації до змін зовнішніх умов, а не в ідеалізованій усталеній точці з постійними параметрами. Така постановка суттєво відрізняється від класичних моделей, де рух судна по рейсу розбивається лише на кілька умовно однорідних ділянок, а зміни конфігурації каравану й структури часу часто розглядаються як другорядні.

У подальшому це дозволяє:

- зв'язати миттєві характеристики $P(t)$, $FC_h(t)$, $m_{cargo}(t)$, $v_g(t)$ з інтегральними показниками FC_Σ та W_Σ ;
- перейти від часових інтегралів до еквівалентних дискретних сум по етапах або ділянках рейсу;
- побудувати інтегральний показник енергоефективності як відношення інтегральних функціоналів від $x(t)$, а не як статичне співвідношення усереднених величин.

3.1.3 Інтегральна постановка задачі енергоефективності рейсу

Узагальнюючи наведені міркування, задачу оцінки енергоефективності рейсу штовхача з караваном барж у першому наближенні можна сформулювати наступним чином.

– Для кожного моменту часу $t \in [0, T]$ за відомими функціями $x(t)$ визначити миттєві значення потужності $P(t)$ та витрати палива $FC_h(t)$ на основі моделі $P(x)$, $FC_h(x)$.

– Обчислити інтегральну витрату палива FC_Σ (3.4) та транспортну роботу W_Σ (3.5) за рейс шляхом інтегрування по часу.

– Визначити інтегральний показник енергоефективності рейсу як функціонал від $x(t)$ у вигляді відношення інтегралів. У найпростішому паливному варіанті:

$$EE = \frac{\int_0^T FC_h(t) dt}{\int_0^T m_{\text{cargo}}(t) v_g(t) dt}, \quad (3.9)$$

а для оцінки за викидами CO_2 :

$$EE_{\text{CO}_2} = \frac{\int_0^T FC_h(t) CF dt}{\int_0^T m_{\text{cargo}}(t) v_g(t) dt}, \quad (3.10)$$

де CF – конверсійний фактор, приведення кількості витраченого палива до кількості викидів CO_2 .

Якщо необхідно врахувати вплив гідрологічних умов (мілководдя, течія) у вигляді нормування, у знаменник інтегралу вводиться гідрологічний множник $k_H(t)$, який залежить від відношення $\frac{H(t)}{d_{\text{eq}}(t)}$, швидкості течії та класу ділянки за AGN :

$$EE_{\text{CO}_2} = \frac{\int_0^T FC_h(t) CF dt}{\int_0^T m_{\text{cargo}}(t) v_g(t) k_H(t) dt}. \quad (3.11)$$

Гідрологічний множник $k_H(t) > 1$ для складних умов (мілководдя, сильна зустрічна течія тощо), причому $k_H = 1$ у референтних (глибоководних) умовах. Оскільки k_H вводиться у знаменник, нормований індекс призначено виключно для порівняння рейсів, а не для оцінки фактичної енергоефективності; докладно його інтерпретацію та співвідношення з фактичним індексом розглянуто в

п. 3.2.4. Фактична енергоефективність подається індексами (3.9)–(3.10) без множника k_H . У практичних розрахунках обидва показники подаються разом: фактичний – для оцінки реального стану рейсу, нормований – для коректного порівняння.

Доцільно співвіднести інтегральну форму (3.11) з концептуальним нормованим показником (2.2), уведеним у п. 2.4.3. Гідрологічна поправка $k_{\text{нав}}$ конкретизується тут як гідрологічний множник $k_H(t)$ у знаменнику: вона нормує транспортну роботу – зовнішню умову порівнянності рейсів, виконаних за різних глибин і течій. Поправку на профіль навантаження ГЕУ $k_{\text{ГЕУ}}$ у явному вигляді окремим множником не вводимо. Вплив режиму роботи установки на енерговитрати враховується безпосередньо в чисельнику показника – через миттєву витрату палива $FC_h(t) = SFC(t) \cdot P(t)$, у якій питома витрата $SFC(t)$ є нелінійною функцією фактичного навантаження ГЕУ і визначається за результатами параметричної діагностики робочого процесу (пп. 3.3.3–3.3.4). Отже, ефект, який у концептуальній моделі відображав множник $k_{\text{ГЕУ}}$, у математичній моделі є ендеогенним: він уже міститься у вимірній (або діагностично відновленій) витраті палива на кожному етапі рейсу, тому винесення його в окремий зовнішній множник призвело б до подвійного врахування. Таким чином, у нормованому показнику зовнішнім нормувальним множником лишається лише k_H (приведення знаменника до референтних гідрологічних умов), тоді як профіль навантаження ГЕУ повністю реалізовано в чисельнику через $SFC(t)$.

У цьому формулюванні інтегральний показник енергоефективності (3.11) природно охоплює всі режими рейсу, включаючи ділянки з частковим або нульовим завантаженням, проводки та порожні переходи штовхача, оскільки витрата палива $FC_h(t)$ інтегрується по всій тривалості T , тоді як транспортна робота в знаменнику формується лише там, де $m_{\text{cargo}}(t) > 0$. Це забезпечує чутливість показника до нераціональної організації рейсу (надмірні проводки, порожні переходи) без втрати математичної стійкості.

У наступних підрозділах ця інтегральна постановка буде конкретизована через розбиття рейсу на ділянки, параметризацію функцій $x(t)$ і гідрологічного множника $k_H(t)$, а також співвіднесена з існуючими індексами енергоефективності внутрішнього водного транспорту, що дозволить порівняти результати, отримані різними підходами.

3.2 Дискретне наближення інтегральних показників енергоефективності рейсу за ділянками

Інтегральна постановка задачі енергоефективності рейсу, сформульована в п. 3.1, описує витрату палива, транспортну роботу та пов'язані з ними показники як функціонали від часових залежностей потужності $P(t)$, витрати палива $FC_h(t)$, маси вантажу $m_{\text{cargo}}(t)$, швидкості $v_g(t)$, глибини $H(t)$ і конфігурації каравану $\text{shape}(t)$. Такий підхід адекватно відображає неусталений багаторежимний характер рейсу, однак безпосередньо застосувати його в експлуатаційних умовах складно через обмежений обсяг вимірюваних даних та дискретний характер рейсових спостережень.

Практичні дані, наявні в журналах спостережень та систематичних дослідженнях рейсів дунайських штовхачів, зазвичай мають вигляд середніх величин по окремих характерних ділянках: відтинках між портами, шлюзами, гідрологічно однорідними зонами (наприклад, 789–942 км, 942–1445 км тощо). Кожна така ділянка характеризується протяжністю, середніми значеннями глибини, течії, складу каравану, швидкості, витрати палива та транспортної роботи. Відповідно, для побудови інтегрального показника енергоефективності в формі, придатній для розрахунків за рейсовими даними, доцільно перейти до **дискретного наближення** інтегралів п. 3.1 як сум по ділянках.

3.2.1 Поділ рейсу на ділянки та усереднення параметрів

Нехай повний рейс тривалістю T та довжиною S поділено на n ділянок Δ_i ($i = 1, \dots, n$), для яких гідрологічні умови, конфігурація каравану та режими роботи ГЕУ можна вважати квазісталіми. Такий поділ узгоджується як із практикою експлуатаційних досліджень (виділення відрізків із близькими значеннями глибини, течії та конфігурації каравану), так і з ілюстративним

ступінчастим профілем рейсу (рис. 2.6), де чітко виділяються етапи з різною кількістю барж і режимами руху.

Для кожної ділянки Δ_i задаються:

- довжина ділянки D_i , км;
- середня маса вантажу в каравані $m_{\text{cargo},i}$, Т;
- витрата палива на ділянці FC_i , т (або кг);
- середня швидкість відносно берега $v_{g,i}$, км/год;
- тривалість проходження ділянки T_i , год;
- середні гідрологічні параметри: глибина H_i , швидкість течії $U_{c,i}$,

відношення $\frac{H_i}{d_{\text{eq},i}}$;

- характеристика конфігурації каравану shape_i (наприклад, 3:3, 2:2, 2:1, 1:1);
- параметри структури часу на ділянці (частки часу повного ходу, проводок, маневрувань, стоянок, шлюзування).

У термінах моделі п. 3.1 це відповідає заміні безперервного вектора стану $x(t)$ на дискретну послідовність усереднених векторів $x^{(i)}$ по ділянках. Усереднення застосовується лише до неперервних компонент (v, H, U_c, n, SFC): $x_{\text{cont},i} = \left(\frac{1}{T_i}\right) \int_{\Delta_i} x_{\text{cont}}(t)dt$, тоді як ступінчасті (категоріальні) компоненти – конфігурація shape , кількість барж N та режим τ_{mode} – на квазісталій ділянці беруться як константи. Підсумковий дискретний вектор стану ділянки:

$$x^{(i)} = (v_i, H_i, U_{c,i}, n_i, SFC_i, \text{shape}_i, N_i, \tau_{\text{mode},i}), \quad (3.12)$$

де нижній індекс i для неперервних величин позначає середнє на ділянці, а для ступінчастих – стале значення. Інтеграли по часу далі замінюються на суми по ділянках із ваговими коефіцієнтами T_i або D_i .

3.2.2 Дискретні аналоги інтегральної витрати палива та транспортної роботи

Інтегральна витрата палива за рейс:

$$FC_{\Sigma} = \int_0^T FC_h(t)dt \quad (3.13)$$

у дискретному наближенні набуває вигляду:

$$FC_{\Sigma} \approx \sum_{i=1}^n FC_i, \quad (3.14)$$

де FC_i – фактична витрата палива на ділянці Δ_i . Залежно від наявності даних вона визначається одним із двох способів. Якщо доступні дані рейсового журналу, FC_i береться безпосередньо з них (вимір). Якщо ж FC_i розраховується за моделлю, вона визначається через усереднені параметри ділянки: $FC_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} SFC(t)P_{e(t)}dt \approx SFC_i P_{e,i} T_i$, де SFC_i , $P_{e,i}$ – середні значення на ділянці; T_i – тривалість ділянки, год. Заміна інтеграла добутком середніх вносить похибку усереднення, яка є малою за умови, що в межах ділянки SFC і P_e не зазнають різких змін; саме тому ділянки виділяються як квазісталі за режимом (п. 3.2.1). Розрахункове значення FC_i слід відрізнити від фактичного з журналу: перше є оцінкою моделі, друге – виміром.

Для переведення до дискретної форми інтегральної транспортної роботи

$$TW_{\Sigma} = \int_0^T m_{\text{cargo}}(t)v_g(t)dt \quad (3.15)$$

доцільно ввести позначення D_i довжини i -ї ділянки шляху, км, яку судно проходить за час T_i , тобто $D_i = \int_{\Delta_i} v_g(t) dt \approx v_{g,i} T_i$, якщо на ділянці середня швидкість $v_{g,i}$ репрезентує часовий профіль $v_g(t)$. Таким чином, при переході від інтегральної форми до дискретної суми по ділянках інтегрування по часу замінюється інтегруванням по шляху, а добуток $v_{g,i}T_i$ замінюється довжиною ділянки D_i . Швидкість у явному вигляді зникає з формули, але врахована в D_i :

$$TW_{\Sigma} \approx \sum_{i=1}^n m_{\text{cargo},i} D_i, \quad (3.16)$$

за умови, що на кожній ділянці середня швидкість $v_{g,i}$ та маса вантажу $m_{\text{cargo},i}$ достатньо добре описують відповідні часові залежності. Така форма збігається з традиційним визначенням транспортної роботи як суми добутків маси вантажу на пройдений шлях для кожного етапу рейсу.

Отже, безперервні інтеграли п. 3.1 природно переходять у дискретні суми, що відповідає структурі реальних рейсових даних.

3.2.3 Базовий дискретний індекс енергоефективності рейсу

Виходячи з безперервної форми паливного індексу енергоефективності (3.9), дискретне наближення при поділі рейсу на n ділянок можна записати як:

$$EE_{disc} = \frac{\sum_{i=1}^n FC_i}{\sum_{i=1}^n m_{cargo,i} D_i}. \quad (3.17)$$

У випадку, коли метою є оцінка викидів CO_2 , до чисельника вводиться конверсійний фактор палива в CO_2 – CF , як і в методиці $EEOI$:

$$EE_{CO_2, disc} = \frac{\sum_{i=1}^n FC_i CF}{\sum_{i=1}^n m_{cargo,i} D_i}. \quad (3.18)$$

Такий індекс є прямим дискретним аналогом безперервних функціоналів п. 3.1 і за змістом відповідає узагальненому $EEOI$ для рейсу штовхача з караваном барж, із урахуванням змінної маси вантажу й довжини окремих ділянок.

Перевага такої форми полягає в тому, що вона дозволяє використовувати наявні рейсові дані без необхідності суцільного моніторингу миттєвих значень $P(t)$ та $FC_h(t)$, зберігаючи при цьому зв'язок із інтегральною постановкою задачі.

3.2.4 Врахування гідрологічних умов: дискретний гідрологічний множник

Як показано в розділі 2, а також у попередніх дослідженнях впливу мілководдя на опір та енергоефективність, зміни відношення H/d і швидкості течії можуть суттєво змінювати питомі витрати палива й викиди навіть за незмінної маси вантажу і номінальної швидкості. Тому для коректного порівняння рейсів, виконаних за різних гідрологічних умов, доцільно застосувати гідрологічне нормування, введене в інтегральній формі в п. 3.1, і адаптувати його до дискретного подання.

Нехай для кожної ділянки Δ_i визначено гідрологічний множник $k_{H,i}$, який залежить від відношення $H_i/d_{eq,i}$, класу водного шляху за AGN, швидкості течії $U_{c,i}$ та конфігурації каравану $shape_i$. За змістом гідрологічний множник є відношенням опору каравану у фактичних гідрологічних умовах ділянки до

опору в референтних (глибоководних) умовах: $k_{H,i} = \frac{R_{shallow,i}}{R_{ref,i}} (R_{shallow,i} - \text{опір за фактичних } H_i/d_{eq,i}, \text{ течії } U_{c,i} \text{ та конфігурації } shape; R_{ref,i} - \text{опір тих самих каравану й швидкості в референтних умовах}).$ Числові значення отримано за параметризацією відношення опорів (Додаток Є), побудованою на верифікованих НСРР/ВСР-даних і результатах щодо росту опору на мілководді.

Тоді дискретне наближення до нормованого інтегрального індексу набуває вигляду:

$$EE_{CO_2,norm} = \frac{\sum_{i=1}^n FC_i CF}{\sum_{i=1}^n m_{cargo,i} D_i k_{H,i}}, \quad (3.19)$$

де знаменник інтерпретується як «еквівалентна» транспортна робота в референтних гідрологічних умовах, приведена до референтних гідрологічних умов. Слід підкреслити, що множник $k_{H,i}$ у знаменнику не усуває вплив мілководдя з чисельника: чисельник зберігає фактичну витрату палива FC_i , яка вже відображає підвищені витрати у складних умовах, тоді як $k_{H,i}$ лише перешкальовує транспортну роботу до референтних умов для зіставлення. Подвійного врахування немає – чисельник і множник k_H виконують різні ролі (фактичне споживання та нормування бази порівняння відповідно).

Паливний варіант нормованого індексу:

$$EE_{fuel,norm} = \frac{\sum_{i=1}^n FC_i}{\sum_{i=1}^n m_{cargo,i} D_i k_{H,i}}. \quad (3.20)$$

Таким чином, у дискретній постановці співіснують два показники. Фактичний (EE_{disc} , $EE_{CO_2,disc}$ – формули (3.17)–(3.18), без множника k_H) відображає реальну енергоефективність рейсу в умовах конкретного мілководдя й течії. Нормований ($EE_{fuel,norm}$, $EE_{CO_2,norm}$ – формули (3.19)–(3.20), з множником k_H) приведений до референтних умов і призначений для коректного порівняння рейсів із різними гідроморфологічними характеристиками. Нормований індекс не є фактичною енергоефективністю: він приводить фактичну витрату палива до референтних умов, тож рейс у складніших умовах не виглядає у ньому штучно «кращим». У практичних розрахунках обидва показники подаються разом: фактичний – для оцінки реального стану рейсу,

нормований – для зіставлення. Дискретний підхід зберігає логіку п. 3.1, у якій гідрологічні умови виокремлюються як окремий блок впливу в моделі стану системи.

3.2.5 Облік ділянок із нульовим завантаженням і проводок

Особливу роль у структурі дунайського рейсу відіграють ділянки, на яких маса вантажу в каравані є нульовою або істотно зменшеною: порожні переходи штовхача до місця формування каравану, проводки частини барж через мілководні ділянки, маневрування й шлюзування. На цих етапах витрата палива FC_i залишається значною, але транспортна робота в тонно-кілометрах відсутня або істотно менша, ніж на основних вантажних відтинках.

В інтегральній постановці п. 3.1 ці етапи автоматично враховуються в чисельнику індексів EE та $EE_{CO_2,norm}$ через інтегрування $FC_h(t)$ по всьому інтервалу T , тоді як внесок у знаменник визначається значеннями $m_{cargo}(t)$. У дискретній формі запропоновано аналогічний підхід:

- у чисельник $\sum FC_i$ або $\sum FC_i CF$ включаються всі ділянки Δ_i , незалежно від значення $m_{cargo,i}$;
- у знаменнику $\sum m_{cargo,i} D_i$ та $\sum m_{cargo,i} D_i k_{H,i}$ ділянки з нульовим завантаженням, де $m_{cargo,i} = 0$, дають нульовий внесок, тобто $m_{cargo,i} D_i = 0$, але відбувається повний внесок через FC_i у чисельнику у вигляді врахування витрати палива.

Це забезпечує:

- чутливість показника до наявності та тривалості порожніх переходів і проводок;
- відсутність математичних проблем, пов'язаних з поділом на нульову транспортну роботу;
- повну відповідність інтегральній логіці п. 3.1, де всі етапи рейсу входять до чисельника, але лише вантажні – до знаменника.

Запропонована форма коректна за умови ненульової сумарної транспортної роботи рейсу: $\sum(m_{cargo,i} D_i) > 0$. Для окремих баластних перегонів

без вантажу, де сумарна транспортна робота мала або нульова, тоннокілометровий індекс втрачає інформативність; для них доцільно вводити допоміжний показник питомої витрати на кілометр ($\frac{FC_i}{D_i}$) або на годину ($\frac{FC_i}{T_i}$), що характеризує ефективність порожнього переходу окремо, не включаючи його штучно в тоннокілометровий індекс.

3.2.6 Зв'язок дискретного індексу з моделлю стану рейсу

Остаточно дискретні індекси EE_{disc} , $EE_{CO_2, disc}$, $EE_{fuel, norm}$, $EE_{CO_2, norm}$ можна інтерпретувати як наближення інтегральних функціоналів від множини векторів стану $\{x^{(i)}\}_{i=1}^n$. Для кожної ділянки Δ_i : $m_{cargo, i}$ та D_i визначаються відповідно до експлуатаційних даних та параметрів ділянки,

$$FC_i = FC(x^{(i)}), k_{H, i} = k_H(x_{hydro}^{(i)}), \quad (3.21)$$

а сам індекс є функцією:

$$EE_{(.)} = \Phi(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(n)}), \quad (3.22)$$

де $\Phi(\cdot)$ задається відповідними сумами по ділянках у чисельнику та знаменнику.

Таке формулювання зберігає зв'язок між локальною динамікою стану системи «штовхач–караван–водний шлях–ГЕУ» і глобальною оцінкою енергоефективності рейсу, що створює основу для подальшого аналізу чутливості індексу до змін окремих груп факторів і порівняння з іншими індикаторами енергоефективності, адаптованими до умов внутрішнього водного транспорту.

3.2.7 Співвідношення запропонованого показника з існуючими індексами енергоефективності та економічними критеріями

Запропонований у підрозділах 3.1–3.2 інтегральний показник енергоефективності рейсу штовхача з караваном барж (3.9)–(3.11) за своєю фізичною суттю є узагальненням відомих індексів типу *Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI)* та *Energy Efficiency in Operation (EEO)*, адаптованим до специфіки дунайського судноплавства. Як і *EEOI*, він базується на відношенні витрат палива або викидів CO_2 до транспортної роботи в тонно-кілометрах, однак принципово відрізняється:

- часовою постановкою (опис рейсу як неусталеного багаторежимного процесу з функціями $P(t)$, $FC_h(t)$, $m_{cargo}(t)$, $v_g(t)$);
- явним урахуванням змінної конфігурації каравану $N(t)$, $shape(t)$ та ступінчастої структури рейсу (розчеплення, зчеплення, проводки, шлюзування);
- гідрологічним нормуванням через множник $k_H(t)$ або $k_{H,i}$, що враховує вплив відношення H/d і течії на опір та енерговитрати.

У класичному варіанті $EEOI$ для морських суден транспортна робота обчислюється за рейс або період експлуатації за формулою (1.2), де сумування ведеться за окремими переходами j . У випадку штовхача з караваном така схема не враховує ані змінної конфігурації каравану протягом одного рейсу, ані різкої зміни опору на мілководді. Запропонований дискретний індекс $EE_{CO_2, disc}$ (3.18) є його прямим узагальненням для умов, коли один рейс включає багато етапів з різним складом каравану й різними гідрологічними умовами. Подальше введення гідрологічного множника $k_{H,i}$ у знаменник $EE_{CO_2, norm}$ (3.19) робить показник придатним для порівняння рейсів, виконаних за різних глибин і течій, що принципово важливо для Дунаю.

Окремий інтерес становить співвіднесення енергетичного індексу з економічними критеріями ефективності. Витрати на паливо є домінуючою складовою змінних експлуатаційних витрат штовхача з караваном, тому для оцінки реальної паливної собівартості рейсу використовується фактичний індекс (EE_{disc} , (3.17)), а для аналітичного зіставлення рейсів у різних гідрологічних умовах нормований ($EE_{fuel, norm}$, (3.20)). Відповідно вводяться два показники питомих змінних витрат на 1 т·км при відомій ціні палива C_f :

$$C_{var} = EE_{disc} \cdot C_f, \quad (3.23)$$

що виражає фактичні витрати на паливо на одиницю транспортної роботи в реальних гідрологічних умовах рейсу. Таким чином, запропонований індекс водночас виконує роль:

- енергетичного критерію (т палива або т CO_2 на 1 т·км);
- економічного критерію (вартість палива на 1 т·км);

– інструмента порівняння рейсів і сценаріїв модернізації (зміна конфігурації каравану, режимів руху, технічного стану ГЕУ) за єдиною шкалою, що враховує як змінність складу каравану, так і вплив гідрології.

Таким чином, запропонована постановка відрізняється від класичного *EEOI* та інших відомих індексів енергоефективності внутрішнього водного транспорту (*EEDI_{Binnen}*, індекси *PLATINA3*, *CCNR*) трьома принциповими елементами, що разом становлять наукову новизну дослідження.

По-перше, врахування змінної конфігурації каравану в межах одного рейсу. У класичних формулюваннях *EEOI* судно розглядається як об'єкт зі сталими характеристиками, а рейс – як послідовність переходів з фіксованим складом вантажу. Для штовхача з караваном несамохідних барж така постановка є принципово неадекватною: у межах одного рейсу склад каравану змінюється ступінчасто ($3:3 \rightarrow 2:2 \rightarrow 1:1 \rightarrow 0$) унаслідок розчеплень, проводок частини барж та формування каравану на проміжних портах. Уведення у формули (3.17)–(3.20) параметрів N_i , $shape_i$ та $m_{cargo,i}$, що змінюються від ділянки до ділянки, дозволяє врахувати цю змінність безпосередньо в індексі енергоефективності, а не усереднювати її по всьому рейсу, як це робиться у стандартному *EEOI*.

По-друге, гідрологічне нормування через множник k_H . Введений у формулах (3.11), (3.19), (3.20) гідрологічний множник $k_H(t)$ ($k_{H,i}$ у дискретній формі) є принципово новим елементом порівняно з існуючими індексами. Він відображає вплив відношення H/d_{eq} , швидкості течії U_c та класу водного шляху за *AGN* на фактичні енерговитрати й дозволяє порівнювати рейси, виконані за різних гідрологічних умов, на єдиній методологічній основі. У стандартному *EEOI*, орієнтованому на морське судноплавство в умовах глибокої води, такий множник відсутній за визначенням, оскільки $H/d \gg 2,0$ і вплив глибини на опір є нехтовно малим. Для Дунаю ж, де на значних відтинках маршруту $H/d \leq 2,0$, відсутність гідрологічного нормування призводить до систематичного викривлення оцінок енергоефективності.

По-третє, явне врахування структури часу рейсу. Запропонована постановка явно виділяє частки часу повного ходу, проводок, маневрування,

стоянок і шлюзування як окремий блок параметрів вектора стану ($x_{\text{time}}(t)$ у (3.7)) та включає відповідні ділянки до чисельника індексу без їх внеску до знаменника (пп. 3.2.5). Це дозволяє кількісно відобразити вплив нераціональної організації рейсу – надмірних проводок, тривалого шлюзування, порожніх переходів штовхача – на інтегральну енергоефективність. У класичному *EEOI* такі етапи або усереднюються разом із вантажними, або взагалі не враховуються, що приховує суттєві резерви підвищення ефективності експлуатації.

Сукупно ці три елементи забезпечують методологічну адекватність запропонованого показника специфіці дунайського судноплавства й становлять основу подальшого практичного застосування індексу для аналізу рейсів, оцінки сценаріїв модернізації та обґрунтування рішень щодо оптимізації режимів руху штовхачів з караванами.

У подальших розділах ця система показників використовується для кількісної оцінки впливу гідрологічних умов, конфігурації каравану та структури часу рейсу на енергоефективність штовхачів на Дунаї, а також для порівняння результатів, отриманих різними варіантами методик, з метою виявлення оптимального способу практичного застосування.

3.3 Моделі сил опору й потрібної потужності з урахуванням особливостей дунайських умов

У підрозділах 3.1–3.2 інтегральні показники енергоефективності рейсу були сформульовані в загальному вигляді через функціональну залежність потужності, витрати палива та транспортної роботи від вектора стану рейсу $x(t)$. Для практичного застосування цієї постановки необхідно конкретизувати структуру гідродинамічного опору у дунайських умовах, побудувати модель потрібної потужності на валах гребних гвинтів і скоригувати її за результатами параметричної діагностики робочого процесу суднових двигунів. Особливістю запропонованого підходу є використання параметричної діагностики робочого процесу не лише як засобу контролю технічного стану ГЕУ, а як інструменту верифікації та параметризації гідродинамічної моделі опору в дунайських умовах.

3.3.1 Особливості гідродинамічного опору штовхача з караваном на Дунаї

Сумарний гідродинамічний опір руху досліджуваного судна з караваном барж у річкових умовах Дунаю доцільно подавати як суму основних фізичних складових, у якій вплив мілководдя й течії враховується не окремими доданками, а через аргументи цих складових:

$$R = R_F \left(\frac{H}{d} \right) + R_W \left(\frac{H}{d}, Fr_h \right) + R_{int} \left(shape, N, \frac{H}{d} \right) + R_{air}, \quad (3.24)$$

де $R_F \left(\frac{H}{d} \right)$ – опір тертя (в'язкісного походження), що залежить від відносної глибини H/d через модифікований формфактор;

$R_W \left(\frac{H}{d}, Fr_h \right)$ – хвильовий опір як функція H/d і числа Фруда по глибині Fr_h ;

$R_{int} \left(shape, N, \frac{H}{d} \right)$ – інтерференційний опір від гідродинамічної взаємодії корпусів штовхача й барж, що залежить від конфігурації $shape$, кількості барж N та H/d ;

R_{air} – повітряний опір надбудов (стала складова).

У формі (3.24) вплив мілководдя не додає окремої складової сили опору: він враховується аргументом H/d у в'язкісній, хвильовій та інтерференційній складових, змінюючи кожну з них. Вплив течії також не виокремлюється в самостійний доданок – його враховано через швидкість відносно води $v = v_g \pm U_c$ (знак « $-$ » для руху проти течії, « $+$ » – за течією). Технічний стан і обростання корпусів ураховано множником k_{hull} у складовій R_F , тому окремий експлуатаційний запас не вводиться. Інтерференційний опір R_{int} описує взаємодію корпусів каравану на боці опору; взаємодію корпус–гвинт віднесено до пропульсивного коефіцієнта η_{prop} (п. 3.3.2), тож подвійного врахування цієї взаємодії немає. У формулі (3.24) опір форми не виокремлений як самостійна складова повного опору води руху – він, як опір в'язкісного походження, врахований у R_F та R_W через формфактори й поправки на розподіл тиску навколо корпусів. Такий підхід відповідає сучасній практиці тривимірної декомпозиції

повного опору суден згідно з рекомендаціями ІТТС [48; 77], адаптованій до умов мілководдя для суден внутрішнього плавання у роботах [77 ;78; 79], де формфактор $(1 + k^*)$ модифікується з урахуванням впливу обмеженої глибини на в'язкісну складову опору тиску.

У формулі (3.24) опір форми не виокремлений як самостійна складова повного опору води руху, він, як опір в'язкісного походження, врахований у $R_{\text{терт}}$ та $R_{\text{взаємод}}$ через відповідні форм-фактори та поправки на розподіл тиску навколо корпусів досліджуваного судна й барж. Такий підхід відповідає сучасній практиці тривимірної декомпозиції повного опору суден згідно з рекомендаціями ІТТС, адаптованій до умов мілководдя для суден внутрішнього плавання у роботах, де формфактор модифікується з урахуванням впливу обмеженої глибини на в'язкісну складову опору тиску.

Класичні дослідження гідродинамічного опору суден на мілководді [19, 41, 62, 77] показують, що при відношенні $H/d \leq 2,0$ відбувається істотне зростання як хвильової, так і в'язкої складових опору, а швидкісні характеристики помітно відрізняються від глибоководних. Для штовхача з караваном ця картина ускладнюється взаємодією кількох корпусів: змінюються картина потоку, розподіл тиску на підводній частині барж, параметри струменя за гвинтами та індуктивні ефекти. У результаті сумарний опір залежить не лише від швидкості й відносної глибини H/d , а й від конфігурації каравану $shape(t)$, кількості барж $N(t)$ та їх завантаження.

Для цілей подальшого моделювання опір подається як функція гідродинамічного підвектора та підвектора завантаження, уведених у п. 3.1.2:

$$R(t) = R(x_{hydro}(t), x_{load}(t));$$

$$R = R\left(v(t), \frac{H}{d_{eq}}, Fr_h, Re, S_{wet}, C_b, N, k_{hull}(t), shape(t)\right), \quad (3.25)$$

де $v = v_g \pm U_c$ – швидкість відносно води (течія входить саме тут, а не окремим доданком); $\frac{H}{d_{eq}}$ – відносна глибина; Fr_h – число Фруда по глибині; Re – число Рейнольдса; S_{wet} – змочена поверхня каравану; C_b – коефіцієнт повноти

(відображає водотоннажність і завантаження); N , $shape$ – кількість барж і конфігурація каравану; k_{hull} – технічний стан корпусів. Ухил русла окремим компонентом не вводиться: оскільки течія U_c виникає саме внаслідок поздовжнього ухилу водної поверхні, її врахування через $v = v_g \pm U_c$ уже відображає вплив ухилу, а додавання окремого члена за ухилом призвело б до подвійного врахування. Залежності складових опору від $\frac{H}{d_{eq}}$ та Fr_h задаються за узагальненням результатів згаданих досліджень і класу ділянки за AGN .

3.3.2 Модель потрібної потужності на валах гребних гвинтів

Перетворення енергії від двигуна до подолання опору описується послідовністю ККД, у якій кожен вид втрат ураховується один раз: $P_R = R \cdot v$ – буксирувальна потужність; $P_D = \frac{P_R}{\eta_{prop}}$ – потужність, підведена до гвинта; $P_e = \frac{P_D}{\eta_{shaft}}$ – ефективна потужність двигуна; $P_i = \frac{P_e}{\eta_{mech}}$ – індикаторна потужність.

Потрібна ефективна потужність головних двигунів визначається через сумарний опір, швидкість відносно води та послідовність ККД пропульсивного комплексу й валопроводу:

$$P_{req}(t) = \frac{R(t)v(t)}{\eta_{prop}(t)\eta_{shaft}}, \quad (3.26)$$

де $\eta_{prop}(t)$ – квазіпропульсивний (гідродинамічний) ККД ($\equiv \eta_D$ за нотацією *ITTC*), що враховує лише гідродинамічну взаємодію корпусу й гвинта, ККД гвинта у вільній воді та вплив нерівномірності потоку; η_{shaft} – ККД валопроводу. Механічні втрати двигуна враховуються окремо через η_{mech} (див. (3.27)), що виключає подвійне врахування.

Класичні методики прогнозування опору й потужності типу *Holtrop–Mennen*, систематично викладені у сучасних монографіях [48], розроблялися переважно для морських суден у глибоководних умовах і базуються на регресіях за параметрами форми корпусу. У застосуванні до дунайських штовхачів з караваном ці методики мають принципові обмеження: по-перше, вплив мілководдя враховується лише через прості емпіричні поправки на швидкість, що є недостатнім для умов $H/d \leq 2,0$, типових для значних відтинків Дунаю; по-

друге, методики орієнтовані на одиничне судно й не охоплюють специфіки багатокорпусної системи «досліджуване судно + караван барж» зі змінною конфігурацією; по-третє, у формулах опору тертя застосовується класична кореляційна лінія *ITTC-1957*, яка, як показано у роботах [75; 78], дає систематичну похибку до 5–10% для суден ВВТ на мілководді через зміну структури примежового шару при обмеженій глибині. З огляду на ці обмеження в роботі застосовано не пряме перенесення методик типу *Holtrop–Mennen*, а параметричну декомпозицію опору (3.24) з модифікованим формфактором мілководдя та гідрологічним множником k_H , параметри яких узяті з верифікованих параметризацій для суден внутрішнього плавання [62; 75; 78] (Додаток Є) і скориговано параметричною діагностикою (п. 3.3.3). Лінію тертя, формфактор, хвильову та інтерференційну складові задано згідно зі структурою (3.24); конкретні числові значення коефіцієнтів наведено в Додатку Є та калібруються за рейсовими даними (розділ 4).

У зв'язку з цим у даній роботі модель $R(t)$ та $P_{\text{req}}(t)$ будується на основі тривимірної декомпозиції повного опору з модифікованим для мілководдя формфактором [75; 78], згідно з якою в'язкісна складова опору подається як $(1 + k^*)C_F^*$, де C_F^* – кореляційна лінія тертя, скоригована за відношенням H/d , а $(1 + k^*)$ – формфактор, що залежить як від форми корпусу, так і від відносної глибини. Хвильова складова обчислюється з урахуванням впливу обмеженої глибини на швидкість поширення хвиль і число Фруда за глибиною (Fr_h), як це обґрунтовано у роботах [62; 81].

Для врахування специфіки каравану базова модель доповнюється трьома модифікаціями, обґрунтованими сучасними експериментальними та чисельними дослідженнями суден з караваном:

- коефіцієнт взаємодії корпусів – отримується за результатами модельних і *CFD*-досліджень одно-, дво- та чотирибаржевих конфігурацій у глибокій та мілкій воді [41; 79] та враховує зміну поля тиску й структури потоку у проміжку між штовхачем і баржами;

– поправка на конфігурацію каравану $\text{shape}(t)$ – побудована на основі узагальнення даних [19; 62] для різних компонувань (3:3, 2:2, 2:1, 1:1) та відображає вплив співвідношення довжина/ширина каравану на хвильову й в'язкісну складові;

– поправочні коефіцієнти до $\eta_{prop}(t)$ – отримуються емпірично за результатами параметричної діагностики (п. 3.3.3) і відображають зниження пропульсивної ефективності в режимах роботи в струмені за караваном, при шлюзуванні та маневруванні.

Таким чином, базова модель опору й потужності у роботі будується як поєднання трьох рівнів:

а) тривимірна декомпозиція *ITTC* з модифікованим формфактором k^* для мілководдя [48; 75; 78];

б) специфічні для штовхачів з караваном корекції за результатами модельних та *CFD*-досліджень [41; 62; 79];

в) емпіричне калібрування коефіцієнтів за даними експлуатаційних вимірювань на дунайських штовхачах із застосуванням параметричної діагностики (п. 3.3.3). Таке поєднання дозволяє зберегти фізичну інтерпретацію окремих складових опору й ККД пропульсивного комплексу, одночасно підвищивши точність розрахунків у специфічних гідроморфологічних умовах дунайського русла та при змінній конфігурації каравану.

3.3.3 Параметрична діагностика робочого процесу як джерело уточнених даних про ефективну потужність

Пряме вимірювання сумарного опору $R(t)$ або потужності на гребних валах $P_S(t)$ у рейсових умовах дунайських суден технічно можливе, проте в наявних рейсових даних відсутнє: на таких суднах, як правило, не встановлено тензометричних муфт на гребних валах, які застосовуються переважно на нових морських суднах для верифікації *EEDI* [13; 29]. Тому потужність відновлюється непрямо – параметричною діагностикою робочого процесу (п. 3.3.3). Наявні на штовхачах судові лаги (переважно акустичні доплерівські та електромагнітні)

у дунайських умовах також не забезпечують достатньої для наукових цілей точності з трьох взаємопов'язаних причин.

По-перше, нормативна гранична похибка лагів за стандартом *IMO MSC.96(72)* становить до 2% від пройденого шляху на годину, причому ця характеристика гарантується лише за умови глибини понад 3 м під кілем [34]. На значних відтинках Дунаю, особливо в умовах низьких рівнів води сезону 2022 р. та подібних, ця умова систематично порушується, і фактична похибка лагів зростає поза нормативні межі через спотворення поля швидкостей під корпусом і вплив відбиття від дна на акустичні сигнали.

По-друге, навіть для морських суден у нормованих умовах експлуатаційна точність лагів суттєво гірша за паспортну. Натурні випробування на контейнеровозі 1800 TEU, оснащеному одночасно шістьма лагами різних типів, показали, що швидкість через воду, виміряна лагами, систематично не корелює з очікуваною залежністю від поглинутої потужності гребних гвинтів через вплив обростання корпусу, дрейфу, осадки та диференту [29]. Імовірнісний аналіз похибки оцінки швидкості через воду методом Монте-Карло, виконаний у роботі [13], підтверджує: лаги визнаються одним з найменш точних вимірювальних приладів на борту судна, а кубічна залежність потужності від швидкості означає, що навіть відносно невеликі похибки в значенні швидкості відносно води (порядку 2–5%) переходять у похибки порядку 6–15% у потрібній потужності ($P \sim v^3 \rightarrow \delta P/P \approx 3 \delta v/v$. Якщо $\delta v/v = 2\%$, то $\delta P/P \approx 6\%$; якщо $\delta v/v = 5\%$, то $\delta P/P \approx 15\%$).

По-третє, для досліджуваного судна з караваном на Дунаї до перелічених загальних факторів додаються специфічні: значна неоднорідність поля течій (швидкість течії варіюється як по довжині рейсу, так і по перетину русла), сильна аерація потоку гвинтами штовхача й гідравлічними збуреннями за караваном, а також складна геометрія потоку за караваном барж, що ускладнює як пряме відновлення опору з гідродинамічних вимірювань, так і коректне розділення компонент швидкості «через воду» та «над ґрунтом».

З огляду на це, у даній роботі замість прямого вимірювання запропоновано використати параметричну діагностику робочого процесу головних двигунів як опосередковане джерело даних про індикаторну та ефективну потужність [72, 76]. Суть підходу полягає в тому, що за часовими діаграмами тиску в циліндрах, параметрами впорскування, температур і віброакустичними сигналами визначаються:

- індикаторна потужність двигунів $P_i(t)$;
- механічні втрати в кривошипно-шатунному механізмі та допоміжних агрегатах;
- ефективний ККД двигуна $\eta_{mech}(t)$, що характеризує перехід від індикаторної потужності до ефективної.

Тоді ефективна потужність на валах може бути подана як

$$P_e(t) = P_i(t) \eta_{mech}(t), \quad (3.27)$$

де $P_i(t)$ та $\eta_{mech}(t)$ обчислюються за результатами параметричної діагностики за методикою, розробленою у роботах [72, 76, 85–87]. Саме $P_e(t)$ – ефективна потужність на колінчастому валу – є тією потужністю, до якої відноситься SFC і яка фігурує у формулах (3.1)–(3.4). Потужність на гребному валу за потреби визначається як $P_S(t) = P_e(t)\eta_{shaft}$.

Ключовим елементом тут є аналітична синхронізація даних моніторингу [85–87]: тиску в циліндрах, обертів валу, витрати палива, положення органів керування, параметрів навколишнього середовища й режимів руху каравану. Це дозволяє будувати узгоджені часові ряди $P_e(t)$, що відображають фактичні режими роботи ГЕУ протягом усього рейсу. Отримані ряди використовуються для [86–87]:

- перевірки й уточнення гідродинамічної моделі через баланс $P_e(t) \approx P_{req}(x_{hydro}(t))$, що дозволяє калібрувати поправочні коефіцієнти до $R(t)$ та $\eta_{prop}(t)$ в дунайських умовах;
- побудови емпіричних залежностей питомої витрати палива $SFC(t)$ як функції ефективної потужності й режиму роботи за аналогією з (3.3), але з урахуванням реальних перехідних режимів;

– ідентифікації неусталених режимів роботи ГЕУ (часті зміни навантаження, робота в зонах підвищеної питомої витрати), на які було звернуто увагу в п. 3.1.2.

Таким чином, параметрична діагностика виконує роль «містка» між гідродинамічною моделлю опору та фактично реалізованим режимом роботи двигунів на конкретних штовхачах.

3.3.4 Замкнена модель «опір → потужність → витрата палива» для дунайських умов

Поєднання гідродинамічної моделі опору $R(x_{\text{hydro}})$, моделі потрібної потужності $P_{\text{req}}(x)$ та діагностично уточненої ефективної потужності $P_e(t)$ дозволяє побудувати замкнену модель енергоспоживання руху штовхача з караваном у дунайських умовах. У цій моделі:

- гідродинамічний блок задає залежність $R(t) = R(x_{\text{hydro}}(t))$, $P_{\text{req}}(t) = \frac{R(t) v(t)}{\eta_{\text{prop}}(t)}$,
- діагностичний блок забезпечує часові ряди $P_e(t)$ та уточнені значення $SFC(t)$, що дозволяє скоригувати параметри $R(\cdot)$ і $\eta_{\text{prop}}(\cdot)$ так, щоб $P_e(t) \approx P_{\text{req}}(t)$ на всьому інтервалі рейсу;
- паливний блок визначає миттєву витрату палива за уточненою залежністю $FC_h(t) = SFC(t)P_e(t)$, яка враховує реальні перехідні режими й технічний стан ГЕУ.

Калібрування полягає у визначенні параметрів моделі опору й пропульсивного ККД, які мінімізують неузгодженість між потрібною потужністю $P_{\text{req}}(t)$, розрахованою за гідродинамічною моделлю (3.25)–(3.26), та ефективною потужністю $P_e(t)$, отриманою за результатами параметричної діагностики (3.27). Калібрувальними є три групи параметрів:

- коефіцієнти модифікованого формфактора $(1 + k^*)$ у моделі в'язкісного опору, що залежить від відношення H/d (за [75; 78]);
- емпіричні поправочні коефіцієнти, що враховують вплив конфігурації каравану $shape(t)$ на сумарний опір та взаємодію корпусів;

– параметри пропульсивного ККД $\eta_{prop}(t)$ як функції режиму руху (повний хід, проводка, маневрування, шлюзування).

Цільовою функцією калібрування є середньоквадратична нев'язка між $P_{req}(t)$ та $P_e(t)$, на множині експлуатаційних спостережень, накопичених за результатами рейсів дунайських штовхачів:

$$J(\theta) = \sum_t [P_{req}(x(t); \theta) - P_e(t)]^2 \rightarrow \min, \quad (3.28)$$

де θ – вектор калібрувальних параметрів усіх трьох груп.

Найпоширенішим методом розв'язання задачі (3.28) є метод найменших квадратів у його нелінійній модифікації, оскільки залежність P_{req} від θ є суттєво нелінійною через степеневі співвідношення в моделі опору на мілководді. Для підвищення стійкості оцінки за наявності викидів та неоднорідності точності експлуатаційних даних доцільно застосовувати зважений нелінійний МНК, де вагові коефіцієнти точок обернено пропорційні дисперсіям відповідних вимірювань.

В умовах, коли частина параметрів θ має апріорні оцінки (наприклад, типові діапазони k^* за результатами *CFD*-досліджень [79]), а інша частина уточнюється за експлуатаційними даними, доцільно застосовувати Байєсівське оновлення апостеріорних розподілів параметрів. Цей підхід природно поєднується з імовірнісною постановкою задачі енергоефективності, що розглядається у [підрозділі 3.4](#): апостеріорні розподіли калібрувальних параметрів стають вхідними розподілами для моделі Монте-Карло, забезпечуючи методологічну узгодженість детермінованої й стохастичної постановок.

У цій роботі калібрування виконується нелінійним МНК як базовою процедурою; Байєсівське розширення розглядається як перспективний напрям подальшого розвитку методики (п. 3.4) при накопиченні достатнього обсягу експлуатаційних даних.

Після калібрування такої моделі за експлуатаційними даними, отриманими із застосуванням параметричної діагностики [72, 85–87], інтегральна витрата

палива за рейс обчислюється за формулою (3.4), а інтегральні показники енергоефективності (3.9)–(3.11) та їх дискретні аналоги (3.17)–(3.20) отримують параметризовані й верифіковані підінтегральні функції.

Отже, підрозділ 3.3 забезпечує зв'язок між концептуальною інтегральною постановкою задачі енергоефективності рейсу (3.1–3.2) та реальними експлуатаційними режимами дунайських штовхачів, поєднуючи гідродинамічні моделі опору, моделі потрібної потужності та результати параметричної діагностики робочого процесу головних двигунів у єдиній системі, апробованій на прикладах дунайських штовхачів [72, 76, 85–87].

3.4 Імовірнісне узагальнення моделі енергоефективності та аналіз чутливості до умов плавання

Детерміністична інтегральна постановка задачі оцінки енергоефективності рейсу, сформульована у п. 3.1, та її дискретне наближення за ділянками (п. 3.2) припускають, що всі компоненти вектора стану $x(t)$ відомі точно. У реальних умовах експлуатації дунайських штовхачів це припущення є ідеалізацією: глибина фарватеру, швидкість течії, тривалість шлюзувань і проводок, питома витрата палива головних двигунів та інші чинники мають стохастичну природу й характеризуються суттєвою мінливістю як у межах одного рейсу, так і між рейсами. Параметрична діагностика робочого процесу (п. 3.3) забезпечує верифікацію гідродинамічної моделі через баланс $P_e \approx P_{req}$ і дає емпіричні залежності $SFC(P_e)$, що дозволяє параметризувати підінтегральні функції в (3.4), однак і ці залежності мають характер умовних розподілів, а не детермінованих функцій. У подальшому викладі функцію розподілу позначаємо літерою F з відповідними індексами або умовами

У зв'язку з цим у цьому підрозділі виконується імовірнісне узагальнення моделі (3.9)–(3.22), у якому компоненти вектору стану трактуються як випадкові величини з емпіричними розподілами, побудованими за даними гідрологічних спостережень, експлуатаційних журналів та параметричної діагностики (п. 3.3). Інтегральний індекс енергоефективності при цьому розглядається як випадкова величина, для якої визначаються математичне сподівання, дисперсія, довірчі

інтервали та квантилі. Додатково виконується глобальний аналіз чутливості, який дозволяє кількісно ранжувати вклад окремих груп факторів у загальний розкид показника. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям розвитку методик оцінки енергоефективності у внутрішньому водному транспорті (*CCNR Roadmap*, *NAIADES III*) та створює основу для обґрунтованого вибору пріоритетних напрямків підвищення ефективності роботи дунайського флоту.

Методологічно підрозділ орієнтований на реалізацію розрахунків в електронних таблицях (наприклад, *Google Таблиці*, *LibreOffice Calc*, *MS Excel*), що робить його придатним для практичного застосування в судноплавних компаніях без потреби у спеціалізованому програмному забезпеченні.

3.4.1 Джерела невизначеності в оцінці енергоефективності дунайських рейсів

Аналіз специфіки дунайського судноплавства (розділ 2) та структура моделі (пп. 3.1–3.3) дозволяють виділити чотири основні групи джерел невизначеності, що впливають на інтегральний показник енергоефективності рейсу штовхача з караваном:

- гідрологічна невизначеність: глибина фарватеру H , швидкість течії U_c , рівень води на контрольних постах, які змінюються в сезонному й міжрічному масштабах та описуються статистично на основі рядів спостережень Дунайської Комісії, *via donau*, *FAIRway Danube II*;

- експлуатаційна невизначеність: тривалість шлюзувань τ_{lock} , тривалість проводок τ_{pass} , конфігурація каравану $shape(t)$ та його фактичне завантаження m_{cargo} , які залежать від організації роботи, трафіку на шлюзах і стану інфраструктури;

- технічна невизначеність: питома витрата палива SFC головних двигунів, механічний ККД η_{mech} , пропульсивний ККД η_{prop} , стан корпусів k_{hull} , поправочні коефіцієнти до $R(t)$ та $\eta_{prop}(t)$, отримані через калібрування (п. 3.3.4) – усі вони мають розкид навіть для однакових режимів роботи ГЕУ і визначаються за даними параметричної діагностики (п. 3.3.3);

– метеорологічна невизначеність: швидкість і напрям вітру U_w , ω , які впливають на надводний опір повітря, особливо для порожніх барж з великою площею бортової поверхні.

Окрім класифікації за джерелами, для коректної інтерпретації результатів імовірнісної оцінки доцільно прив'язати невизначеності до класифікації за методом їх оцінювання, прийнятої у метрологічному стандарті GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement; ISO/IEC Guide 98-3) [37]. Згідно з цією класифікацією розрізняють два типи невизначеностей. Невизначеність типу А оцінюється статистичним аналізом серії повторних вимірів (через стандартне відхилення вибірки, дисперсію або інші статистичні характеристики). Невизначеність типу В оцінюється на основі нестатистичних даних: документації виробників вимірювальних приладів і стендових випробувань, експертних оцінок, теоретичних розрахунків, попередніх дослідних результатів та літературних параметризацій.

У контексті цієї роботи виділені чотири групи джерел невизначеності за GUM-класифікацією розподіляються таким чином. Гідрологічна, експлуатаційна і метеорологічна групи оцінюються переважно як невизначеності типу А на основі статистичної обробки рядів спостережень: глибин фарватеру і швидкостей течії з даних Дунайської Комісії та *viadonau* (гідрологічна група), даних диспетчерських служб портів і шлюзів про тривалість шлюзувань та проводок (експлуатаційна), даних гідрометеостанцій про швидкість і напрям вітру (метеорологічна). Технічна група оцінюється як комбінація обох типів, причому тип невизначеності SFC визначається способом отримання даних про витрату палива, який у практиці дунайського судноплавства суттєво різниться. На судах із вимірювальними засобами годинна витрата FC_h вимірюється безпосередньо, а SFC відновлюється статистично, що відповідає невизначеності типу А. На старих судах без вимірювальних засобів витрата оцінюється наближено або за паспортною чи стендовою характеристикою головних двигунів; обидва випадки відповідають невизначеності типу В. Розрахунки розділу 5 виконано за даними експериментальних рейсів із витратомірами, тобто

для SFC типу А. Механічний η_{mech} і пропульсивний η_{prop} ККД, а також коефіцієнти k_H для урахування впливу мілководдя, отримані з проєктно-літературних параметризацій [56], оцінюються як тип В.

Виконаний розподіл невизначеностей за типами GUM забезпечує відповідність розробленого способу оцінки енергоефективності міжнародним метрологічним практикам і дозволяє коректно інтерпретувати результати оцінки як в детермінованій, так і в імовірнісній постановках. Тип кожної невизначеності враховується при побудові емпіричних розподілів у подальшому викладі (підпункти 3.4.2–3.4.4), а також у програмній реалізації способу (підрозділ 4.4).

Введена класифікація відрізняється від блочної структури моделі п. 3.3 – деякі джерела впливають одночасно на кілька блоків (наприклад, гідрологічна невизначеність впливає і на гідродинамічний, і на паливний блоки через зміну режимів роботи ГЕУ). Для кожної групи у подальшому аналізі використовуються емпіричні розподіли, побудовані за наявними даними спостережень. У тих випадках, коли обсяг даних недостатній для надійної статистичної ідентифікації типу розподілу, застосовуються параметричні наближення (нормальний, логнормальний, трикутний, рівномірний розподіли) з параметрами, узгодженими з даними за методом моментів або методом максимальної правдоподібності.

3.4.2 Імовірнісна постановка задачі

В імовірнісній постановці задачі компоненти вектора стану рейсу та похідні від них показники розглядаються як випадкові величини. Для уникнення термінологічної неоднозначності у подальшому викладі прийнято такі позначення: великими літерами EE (без додаткових індексів) позначається інтегральний показник енергоефективності як випадкова величина, для якої визначаються розподіл, моменти, квантилі та довірчі інтервали; малою літерою z позначається числове значення-аргумент цього показника, відносно якого обчислюється функція розподілу $F(z) = Pr\{EE \leq z\}$; функція F з відповідними індексами або умовними позначеннями (через символ «|») інтерпретується як функція розподілу відповідної випадкової величини; запис випадкової величини

у формі $\xi \sim N(\mu, \sigma^2)$ означає, що ξ має нормальний (Гауссів) розподіл з математичним сподіванням μ та дисперсією σ^2 ; символ $Pr\{\cdot\}$ позначає ймовірність зазначеної у фігурних дужках події (для уникнення колізії з позначенням P , що використане у п. 3.1–3.3 для потужності пропульсивного комплексу). Прийняті позначення зберігаються як для безумовної постановки (п. 3.4.2–3.4.6), так і для прогностичного розширення (п. 3.5).

Вибір типів апроксимувальних розподілів для компонент вектора стану підпорядковано класифікації невизначеностей за GUM (п. 3.4.1) та принципу максимуму ентропії. Для компонент, невизначеність яких оцінюється як тип А – тобто статистично, за рядами спостережень (глибина фарватеру H та швидкість течії U_c за даними Дунайської Комісії [17] і *viadonau* [22], швидкість відносно берега v_g за експлуатаційними журналами, питома витрата палива SFC у випадку її прямого бортового вимірювання – тип А), – прийнято усічений нормальний (Гауссів) розподіл. Такий вибір має подвійне обґрунтування. По-перше, згідно з центральною граничною теоремою, величина, що формується як результат накладання багатьох незалежних дрібних впливів (для рівнів води – добові метеорологічні, стокові та регуляційні чинники; для швидкості та SFC – сукупність експлуатаційних збурень), асимптотично прямує до нормального розподілу. По-друге, за принципом максимуму ентропії, за умови, що з наявної вибірки надійно ідентифікуються лише перші два моменти – математичне сподівання та дисперсія, – саме нормальний розподіл є найменш упередженим, тобто таким, що не привносить додаткової апіорної інформації понад задані середнє і розкид. Усічення розподілу за фізично допустимими мінімумом і максимумом вводиться з огляду на те, що відповідні величини за своєю природою не можуть набувати від’ємних значень або виходити за межі фізично реалізованих діапазонів.

Слід зауважити, що питома витрата палива SFC задається в моделі не єдиним розподілом на рейс, а окремим розподілом для кожної ділянки (режиму роботи), параметри яких ($\overline{SFC}$, σ , межі) визначено за результатами вимірювань годинної витрати FC_h витратомірами в експериментальних рейсах. Таким чином,

залежність SFC від навантаження двигуна врахована безпосередньо – кожен режим (повний хід, проводка, маневрування) має власний розподіл SFC (у моделі – від 215 до 235 г/(кВт·год) залежно від режиму), що знімає потребу в окремій функціональній залежності SFC від навантаження.

Прийнятність усіченого нормального розподілу для гідрологічних величин потребує окремого обґрунтування з огляду на відому сезонність, автокореляцію та можливу асиметрію рядів рівнів і течій. Ці властивості не суперечать прийнятому розподілу з трьох причин. По-перше, масштаб застосування: розподіл будується не для річного ряду, а локально – у межах однієї ділянки та горизонту рейсу (5–10 діб), на якому сезонний хід не встигає проявитися, тож сезонність впливає на параметри розподілу ($\bar{x}$, σ) конкретної ділянки, а не на його форму. По-друге, автокореляція винесена за межі безумовного розподілу: часову залежність послідовних значень моделює окремий авторегресійний (AR(1)) прогностичний блок (п. 3.5), тому в безумовній постановці (п. 3.4) компоненти коректно трактуються як розподіли миттєвих станів без подвійного врахування інерції. По-третє, усічення за фізичними межами надає розподілу обмеженого носія й помірної асиметрії, що відповідає природі гідрологічних величин. Для ділянок чи режимів із вираженою асиметрією рядів усічений нормальний розподіл може бути замінений емпіричним (місячним або локальним) без зміни структури методики; такий перехід визначено як напрям подальшого уточнення.

Для компонент, невизначеність яких оцінюється як тип В – тобто на основі нестатистичних даних (проектна документація, літературні параметризації, експертні оцінки) за відсутності репрезентативної вибірки, – застосовано трикутний розподіл. До цієї групи належить маса корисного вантажу m_{cargo} : сценарна, для конкретного рейсу вона задається планом завантаження (детермінована), а трикутний розподіл на відомому діапазоні з найімовірнішим (типовим) значенням використовується для сценарного аналізу чутливості результату до завантаження, а не як вираження алеаторної випадковості. Вибір саме трикутного розподілу відповідає GUM [37]: за відсутності статистичної

вибірки, коли відомі лише межі величини, приймається рівномірний розподіл, а якщо додатково відоме найімовірніше значення (мода) – трикутний; для маси вантажу типове значення визначене, тому використано трикутний. До типу В належить також пропульсивний ККД η_{prop} , обмежений проєктно-літературним інтервалом $[0,52; 0,68]$ з модою 0,60, та питома витрата палива для суден без бортових вимірювальних засобів (оцінка за залишками в цистернах) або для планованих рейсів (паспортна характеристика).

Гідрологічний множник k_H , отриманий з літературної параметризації [56] (тип В), задано усіченим нормальним розподілом: джерело подає його центральне значення разом із симетричною смугою невизначеності, що відповідно до GUM [37] (п. 3.4.1) інтерпретується як стандартна невизначеність типу В нормального виду. Прийнятий розподіл типів невизначеності та апроксимувальних розподілів за компонентами вектора стану зведено в табл. 3.1. Таблиця 3.1 – Типи невизначеності та апроксимувальні розподіли компонент вектора стану

Компонента	Тип за GUM	Розподіл	Підстава/джерело
Глибина фарватеру H	A	усічений нормальний	ряди рівнів ДК / <i>viadonau</i> ; ЦГТ + макс. ентропія
Швидкість течії U_c	A	усічений нормальний	дані ДК / <i>viadonau</i> про швидкості течії
Швидкість відносно берега v_g	A	усічений нормальний	експлуатаційні журнали швидкості
Питома витрата палива SFC	A	усічений нормальний	за наявності прямого вимірювання FC_h
	B		паспортні та стендові дані ГД, окремий розподіл за кожною ділянкою
Маса вантажу m_{cargo}	B	трикутний	діапазон завантаження + типове значення
Пропульсивний ККД η_{prop}	B	трикутний	інтервал $[0,52; 0,68]$, мода 0,60 (проєкт/література)

Гідрологічний множник k_H	В	усічений нормальний	параметризація [56]: центральне значення + смуга невизначеності

Позначимо вектор стану рейсу на ділянці Δ_i , як $x_i = (H_i, U_{c,i}, m_{\text{cargo},i}, v_{g,i}, \text{shape}_i, \tau_{\text{mode},i}, SFC_i, k_{H,i}, \eta_{\text{prop},i})$. В імовірнісній постановці кожна компонента вектора стану трактується як випадкова величина з відомим розподілом:

$$H_i \sim F_{H,i}, U_{c,i} \sim F_{U_{c,i}}, SFC_i \sim F_{SFC,i}, \text{ і т. ін.} \quad (3.29)$$

де $F_{\cdot,i}$ – емпіричні функції розподілу відповідних величин на ділянці Δ_i , побудовані за даними спостережень. У випадку, коли окремі компоненти можна вважати взаємно незалежними, сумісний розподіл вектора x_i є добутком маргінальних розподілів; у випадку наявності кореляцій (наприклад, між глибиною H і швидкістю течії U_c) використовується копулярне подання або багатовимірний нормальний розподіл з відповідною кореляційною матрицею.

Інтегральний показник енергоефективності рейсу (3.19) у дискретному наближенні стає функціоналом від набору випадкових векторів:

$$EE_{CO2,norm} = \frac{\sum FC_i \cdot CF}{\sum m_{\text{cargo},i} \cdot D_i \cdot k_{H,i}} = \Psi(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (3.30)$$

де функція Ψ задається сумами по ділянках у чисельнику та знаменнику, а її залежність від випадкових аргументів розкривається через причинно-наслідковий ланцюг (п. 3.2–3.3): для кожної ділянки випадкові гідрологічні величини визначають швидкість відносно води, далі – опір, потрібну ефективну потужність, витрату палива й, нарешті, показник енергоефективності: $H_i, U_{c,i} \rightarrow v_i = v_{g,i} \pm U_{c,i} \rightarrow R_i \rightarrow P_{\text{req},i} = P_{e,i} \rightarrow FC_i = SFC_i P_{e,i} T_i \rightarrow EE$. Саме через цей ланцюг невизначеність гідрологічних (H, U_c) і технічних (SFC, η_{prop}) параметрів поширюється на показник EE . Оскільки аргументи є випадковими величинами, сам показник EE також є випадковою величиною, для якої визначаються:

- математичне сподівання $E[EE]$ – очікувана енергоефективність рейсу;
- дисперсія $D[EE]$ та стандартне відхилення σ_{EE} – міра розкиду показника;

- квантилі EE_{α} ($\alpha = 0,05; 0,50; 0,95$) – для побудови довірчих інтервалів та оцінки ризиків перевищення нормативних значень;
- ймовірність перевищення порогового значення $P(EE > EE_{\text{threshold}})$ – для регуляторного та контрактного застосування.

Аналітичне визначення цих характеристик у загальному випадку неможливе через складну нелінійну залежність Ψ від аргументів, тому застосовується чисельний метод Монте-Карло.

3.4.3 Алгоритм Монте-Карло для оцінки розподілу показника енергоефективності

Обчислення характеристик випадкової величини EE виконується за такою процедурою.

Крок 1. Задаються параметри рейсу: кількість ділянок n , довжини ділянок D_i , базові (детерміністичні) значення всіх компонент вектора стану та параметри їх розподілів (тип розподілу, математичне сподівання, стандартне відхилення або межі для рівномірного/трикутного розподілів).

Крок 2. Задається кількість реалізацій Монте-Карло N (рекомендоване початкове значення $N = 1000$; для стійких оцінок квантилів 0,05 та 0,95 – $N \geq 5000$; для практичних розрахунків в електронних таблицях *Excel* $N = 10000$ є верхньою межею за часом виконання).

Крок 3. Для кожної реалізації $k = 1, 2, \dots, N$ та кожної ділянки $i = 1, 2, \dots, n$ генеруються випадкові значення компонент вектора стану згідно з обраними розподілами. У середовищі *MS Excel* для цього використовуються вбудовані функції генерації: $\text{RAND}()$ для рівномірного розподілу на $[0,1]$, $\text{NORM.INV}(\text{RAND}(); \mu; \sigma)$ для нормального розподілу, $\text{LOGNORM.INV}(\text{RAND}(); \mu; \sigma)$ для логнормального, а також комбінації цих функцій для трикутного розподілу.

Крок 4. Для кожної реалізації k за згенерованими значеннями компонент обчислюються проміжні величини у порядку причинно-наслідкового ланцюга (п. 3.2–3.3): швидкість відносно води $v_i = v_{g,i} \pm U_{c,i}$; опір R_i за (3.24)–(3.25); потрібна ефективна потужність $P_{e,i} = P_{req,i}$ за (3.26); витрата палива на ділянці

$FC_{ik} = SFC_{ik}P_{e,ik}T_i$ за (3.3), (3.14); транспортна робота $m_{cargo,ik}D_{ik}$ та її нормований еквівалент $m_{cargo,ik}D_{ik}k_{H,ik}$ (зі згенерованим гідрологічним множителем $k_{H,ik}$) для знаменника відповідно фактичного й нормованого індексів; а також їх суми по всіх ділянках.

Крок 5. Для кожної реалізації k обчислюється значення EE^k згідно з (3.30), формуючи вибірку $\{EE^{(1)}, EE^{(2)}, \dots, EE^{(N)}\}$.

Крок 6. За отриманою вибіркою обчислюються статистичні характеристики: середнє значення як AVERAGE(), стандартне відхилення як STDEV.S(), квантілі як PERCENTILE.INC(), ймовірність перевищення порогу як COUNTIF(діапазон; ">" & порог) / N .

Результати представляються у вигляді емпіричної функції розподілу $F_{EE}(z)$ та гістограми, побудованих вбудованими засобами *Excel* (функція FREQUENCY, інструмент «Аналіз даних – Гістограма» або зведена таблиця з групуванням).

3.4.4 Аналіз чутливості індексу енергоефективності

Для попереднього ранжування (скрінінг, *screening*) впливових факторів за силою їх монотонного зв'язку з показником EE використовується ранговий кореляційний аналіз Спірмена. Метод обрано як методологічно прозорий інструмент попереднього відбору факторів, що не потребує складних обчислювальних процедур і реалізується наявними засобами (функції RANK.AVG, CORREL). Слід наголосити, що ранговий аналіз дає ранжування факторів за монотонним впливом, а не строгу декомпозицію дисперсії показника.

Процедура аналізу чутливості:

Крок 1. За результатами Монте-Карло симуляції з п. 3.4.3 формуються дві таблиці: матриця вхідних змінних розмірності $N \times t$ (де t – кількість вхідних параметрів, які аналізуються на чутливість) та вектор вихідних значень $\{EE^k\}$ розмірності $N \times 1$.

Крок 2. Для кожного стовпця матриці вхідних змінних та для вектора EE виконується ранжування значень (функція RANK.AVG в *Excel*).

Крок 3. Обчислюється коефіцієнт рангової кореляції Спірмена між кожним вхідним параметром та показником EE (функція CORREL, застосована до рангів):

$$\rho_j = \text{corr}(\text{rank}(x_j), \text{rank}(EE)), j = 1, 2, \dots, m, \quad (3.31)$$

де ρ_j характеризує силу та напрямок монотонного зв'язку між j -м параметром та EE .

Крок 4. Для порівнянності внесків обчислюються нормовані квадрати коефіцієнтів кореляції:

$$S_j = \frac{\rho_j^2}{\sum \rho_k^2}, \sum S_j = 1, \quad (3.32)$$

які є нормованими індикаторами рангової чутливості показника EE до j -го параметра. Підкреслимо, що величини S_j не є частками дисперсії: квадрати коефіцієнтів рангової кореляції Спірмена не утворюють дисперсійної декомпозиції, особливо за наявності кореляцій між входами та нелінійних взаємодій. Тому S_j використовуються виключно для попереднього ранжування факторів за силою монотонного впливу. Для коректної декомпозиції дисперсії (визначення часток, що пояснюються кожним фактором) потрібні методи на основі дисперсії (*variance-based*): індекси Соболя, *FAST* (метод аналізу чутливості Фур'є, *Fourier Amplitude Sensitivity Test*), внески Шеплі (*Shapley effects*) або стандартизована регресія з перевіркою мультиколінеарності. Ранжування за величиною S_j дозволяє виділити фактори, що найсильніше впливають на розкид енергоефективності рейсу, і зосередити подальший детальний аналіз саме на них.

Для корельованих входів і параметрів зі складною нелінійною взаємодією ранговий аналіз дає лише попередню скрінінгову (*screening*) оцінку впливу; для точної декомпозиції дисперсії застосовуються індекси Соболя або інші методи на основі дисперсії (*variance-based*), обчислення яких потребує спеціалізованих інструментів поза межами базової реалізації в електронних таблицях, що виходить за рамки даної методики.

3.4.5 Структура робочої книги Excel для реалізації методики

Для практичної реалізації методики Монте-Карло симуляції та аналізу чутливості пропонується така структура робочої книги *MS Excel*, що складається з шести пов'язаних аркушів (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Структура робочої книги *MS Excel* обчислення характеристик випадкової величини *EE*

Аркуш	Назва	Призначення
1	Параметри	Базові значення та параметри розподілів для всіх компонент вектора стану по кожній ділянці: H_i , $U_{c,i}$, $m_{\text{cargo},i}$, $v_{g,i}$, D_i , $\tau_{\text{mode},i}$, SFC_i , $k_{H,i}$. Задаються тип розподілу, математичне сподівання, стандартне відхилення або межі
2	Ділянки	Характеристики n ділянок рейсу: довжина, тип ділянки (вантажна / проводка / порожній перехід / шлюзування), клас за <i>AGN</i> , референтні значення для нормування
3	Симуляція	Основний розрахунковий аркуш. N рядків реалізацій; у кожному рядку згенеровані значення випадкових компонент по всіх ділянках, обчислені FC_i , транспортна робота, індекс <i>EE</i> для даної реалізації
4	Статистика	Обчислення $E[EE]$, σ_{EE} , квантилів 0,05 / 0,50 / 0,95, ймовірностей перевищення порогів. Гістограма розподілу <i>EE</i>
5	Чутливість	Ранжування вхідних змінних та <i>EE</i> , обчислення ρ_j за Спірменом, нормованих S_j . Діаграма «торнадо» з ранжуванням факторів за величиною внеску в дисперсію <i>EE</i>
6	Звіт	Зведений результат: очікувана енергоефективність, довірчі інтервали, рейтинг ключових факторів, порівняння зі сценарієм-базою

Ключова особливість реалізації – використання функції F9 (повний перерахунок книги) для регенерації всіх випадкових значень. Оскільки вбудована функція RAND() не має можливості фіксації (*seed*) і кожен перерахунок дає нову вибірку, відтворюваність числових результатів забезпечується зафіксованими реалізаціями через опцію *Paste Value*: згенеровану вибірку Монте-Карло ($N = 1000$) одноразово копіюють як значення на окремому аркуші, і саме ця «заморожена» реалізація є джерелом усіх наведених у роботі числових результатів (безумовний і прогнозний режими, [розділ 5](#)).

Обмеження реалізації в Excel пов'язані переважно з обсягом вибірки (при $N > 10000$ і кількості ділянок $n > 20$ час перерахунку книги стає відчутним) та з якістю вбудованого генератора випадкових чисел (для задач з вимогами до статистичної строгості рекомендується використання спеціалізованих пакетів, наприклад, @RISK або Python з бібліотекою SALib). Для цілей обґрунтування управлінських рішень у судноплавних компаніях і для аналізу, виконаного в межах даної дисертації, реалізації в MS Excel є цілком достатньою.

3.4.6 Інтерпретація результатів та практичне застосування

Результати застосування імовірнісної методики оцінки енергоефективності мають подвійне значення – методологічне і прикладне.

З методологічної точки зору, отримання розподілу $F_{EE}(z)$ замість одного детерміністичного значення EE дозволяє коректно описати реальну мінливість показника й уникнути типової помилки прийняття рішень на основі одного «середнього» сценарію, який може системно занижувати або завищувати оцінку. Довірчі інтервали ($EE_{0,05}$; $EE_{0,95}$) дають кількісну міру невизначеності, з якою можна оперувати при порівнянні суден, рейсів і сценаріїв модернізації.

З прикладної точки зору, ранжування факторів за індикаторами рангової чутливості S_j дозволяє попередньо визначити, які напрямки підвищення енергоефективності дунайських штовхачів є пріоритетними. Якщо, наприклад, найсильніший вплив на розкид EE справляє мінливість гідрологічних умов (H , U_c), пріоритетом стає оптимізація

маршрутного планування з урахуванням сезонних прогнозів рівня води та гнучкого підбору складу каравану. Якщо домінує внесок *SFC* і стану ГЕУ – пріоритет надається модернізації головних двигунів і впровадженню систем параметричної діагностики на базі методу аналітичної синхронізації (п. 3.3.3). Якщо найбільший внесок дає структура часу рейсу (тривалість проводок і шлюзувань) – напрямком стає вдосконалення логістики й взаємодії з інфраструктурними операторами Дунаю.

Таким чином, імовірнісне узагальнення моделі енергоефективності, запропоноване у цьому підрозділі, не лише уточнює кількісні оцінки, отримані в пп. 3.1–3.3, але й створює інструментальну основу для прийняття обґрунтованих рішень щодо розвитку дунайського флоту в умовах гідрологічної, експлуатаційної й технічної невизначеності. Реалізація методики в середовищі *MS Excel* забезпечує її доступність для практичного використання судноплавними компаніями, науково-дослідними установами та регуляторними органами басейну Дунаю без потреби у спеціалізованому програмному забезпеченні.

У подальших розділах роботи (розділ 4) методика апробується на реальних даних рейсів штовхачів Українського Дунайського пароплавства, а отримані результати використовуються для кількісного обґрунтування рекомендацій щодо підвищення енергоефективності дунайського судноплавства.

3.5 Імовірнісне прогнозування енергоефективності рейсу за гідрологічними даними Дунайської Комісії

Імовірнісне узагальнення моделі енергоефективності, розглянуте у п. 3.4, ґрунтується на статистичному описі компонент вектора стану рейсу як випадкових величин з відомими розподілами. Однак для практичного застосування методики на етапі планування рейсу необхідно перейти від загальної постановки до конкретного інструменту прогнозування, який враховує актуальний гідрологічний стан судноплавного шляху та використовує наявні офіційні джерела даних.

У цьому підрозділі запропоновано прогностичне розширення моделі енергоефективності, орієнтоване на горизонт планування дунайського рейсу 5–10 діб. Методика спирається на офіційні гідрологічні дані Дунайської Комісії, представлені у трьох формах: довгострокових багаторічних рядах спостережень за рівнями води на основних водомірних постах (Гідрологічний довідник 1921–2010), регулярних щорічних доповідях про судноплавний шлях Дунай з добовим розрізненням рядів (2005–2020) та нормативних значеннях низького (НСРР) і високого (ВСР) судноплавних рівнів регулювання за період 1991–2020. Запропоноване поєднання трьох рівнів даних дозволяє реалізувати інструмент прогнозування, придатний як для оперативного планування окремого рейсу, так і для довгострокового стратегічного аналізу маршрутів.

Особливістю запропонованого підходу є інтеграція двох методологічних шарів: кліматологічного, що відображає довгострокову статистику рівнів води у певний календарний місяць, та динамічного, що описує короткострокову інерцію гідрологічного режиму через автокореляційну структуру добових рядів. Поєднання цих шарів реалізується через імовірнісну Монте-Карло симуляцію рейсу, побудовану в п. 3.4, з тією відмінністю, що вхідні розподіли глибин фарватеру замість безумовних замінюються на умовні – за датою виходу та актуальним гідрологічним станом.

3.5.1 Постановка задачі прогнозування на горизонті планування рейсу

Прогнозування енергоефективності планованого рейсу штовхача з караваном можна формалізувати як задачу обчислення умовного розподілу інтегрального показника EE при заданих вхідних умовах:

$$F(EE | t_0, \text{маршрут}, W_0) = Pr\{EE \leq z | t_0, \text{маршрут}, W_0\} \quad (3.33)$$

де $F(\cdot)$ – функція умовного розподілу інтегрального показника енергоефективності рейсу, що визначає ймовірність того, що EE не перевищить заданого значення z , за умов відомих параметрів планування;

$Pr\{\cdot\}$ – ймовірність відповідної події;

z – числове значення показника енергоефективності, для якого обчислюється функція розподілу (тобто аргумент функції розподілу, що пробігає всі можливі значення EE при формуванні розподілу);

t_0 – планована дата виходу штовхача з порту; маршрут визначається переліком ділянок Δ_i , $i = 1, \dots, n$, з відомими довжинами D_i та прив'язками до водомірних постів;

$W_0 = (W_{0,1}, W_{0,2}, \dots, W_{0,K})$ – вектор актуальних рівнів води на ключових постах, отриманий з оперативних інформаційних джерел напередодні виходу.

Принципова відмінність прогностичної постановки (3.33) від базової імовірнісної постановки (3.30) полягає у тому, що вхідні параметри вектора стану на майбутньому інтервалі рейсу $[t_0, t_0 + T]$ не є відомими навіть статистично у безумовному вигляді – вони є випадковими процесами з умовними розподілами, що залежать від двох категорій інформації: довгострокової кліматології (характерні рівні води у відповідному місяці) та короткострокової динаміки (автокореляція з поточним станом).

Ключовою методологічною задачею є побудова умовних розподілів $F(W_t | t, W_0)$ для рівнів води на кожному пості та для кожного дня прогнозного періоду. Маючи такі розподіли, через детерміновані залежності рівень – глибина фарватеру $H_{\text{фарв}}(W_{\text{пост}})$ формуються розподіли $F(H_i | t, W_0)$ для кожної ділянки маршруту, які потім подаються на вхід Монте-Карло симуляції з п. 3.4.

Горизонт прогнозу T визначається не лише потребами планування рейсу (типова тривалість дунайського рейсу 5–10 діб), а й гідрологічно – затуханням автокореляційної структури рядів рівнів води. Як буде показано у п. 3.5.3, для основних дунайських постів цей горизонт становить 7–8 діб у нормальних гідрологічних умовах, що добре узгоджується з потребами планування.

3.5.2 Структура бази добових рівнів води щорічників Дунайської Комісії

Основним джерелом первинних даних для побудови моделей рівнів води є Щорічні доповіді про судноплавний шлях Дунай, що публікуються Дунайською Комісією починаючи з 1950-х років. Доповіді мають уніфіковану структуру з

тримовним викладом (німецькою, французькою та російською мовами) та включають розділ III.2 «Щоденні рівні та витрати води», де для кожного водомірного поста на основних ділянках Дунаю подаються добові рівні води у форматі регулярних таблиць (місяці у стовпцях, дні у рядках).

Для побудови прогностичної моделі у даній роботі використано добові ряди за період 2005–2020 рр., що охоплює 16 років спостережень – кліматологічно значущий обсяг для виявлення стійких автокореляційних і кросс-кореляційних структур. Аналіз вибірки за середньорічним рівнем води на пості Регенсбург дозволив класифікувати її як збалансовану: 4 повноводні роки (2006, 2010, 2013, 2016), 7 нормальних (2005, 2007, 2008, 2009, 2011, 2012, 2018) та 5 маловодних (2014, 2015, 2017, 2019, 2020). Така структура вибірки забезпечує репрезентативність моделі для всіх характерних гідрологічних режимів Дунаю.

Витягання даних з PDF-файлів щорічників виконано засобами програмного парсера на мові *Python*. Постановку задачі, структуру алгоритму, вибір бібліотек і логіку обробки визначено здобувачем; AI-асистент використано як допоміжний інструмент кодування окремих функцій, що відповідає сучасній практиці програмування й не замінює авторського контролю над результатом. В кінцевій реалізації парсер автоматично розпізнає табличні структури, виконує декодування усіх видів приватних шрифтів окремих видань, екстрагує метадані постів (кілометраж від Сулини, абсолютна позначка нуля поста, нормативи НСРР і ВСР) та формує єдину реляційну таблицю записів формату (рік, місяць, день, пост, рівень води в см). Алгоритмічну логіку обробки трьох типів шифрування PDF-файлів (приватні шрифти 0x13–0x1C, шифр Цезаря зі зсувом +0x1D, додаткове кодування Цезарівськими літерами M..V для цифр) визначено за результатами аналізу первинних файлів. Коректність роботи парсера перевірялася для кожної реалізації особисто здобувачем за такою процедурою: (1) для випадкової вибірки постів і років вилучені значення звірено вручну з відповідними сторінками PDF-щорічників, а також через контекстний пошук електронних таблиць; (2) проведено контроль цілісності рядів – перевірку діапазонів фізичної правдоподібності рівнів, виявлення пропусків і дублікатів

дат; (3) звірено сумарну кількість вилючених записів із очікуваною (кількість постів $\times$ кількість діб). Звірка проводилася ітеративно, до повного усунення розбіжностей; виявлені помилки розпізнавання поверталися для доопрацювання тексту парсера, доки ручна звірка та перевірка через контекстний пошук в електронній таблиці не перестали виявляти відхилень від даних Щорічників. Повний текст програми наведено в [Додатку Д](#).

Загальний обсяг отриманої бази становить 265798 валідованих добових записів за 16 років спостережень (2005–2020 рр.) по 71 водомірному посту від Регенсбурга (2376 км від Сулини) до гирла. На рис. 3.2 показано приклад добових рядів рівнів води на чотирьох ключових постах різних ділянок Дунаю – від верхнього (Регенсбург, Пфеллінг) до нижнього (Силистра, Тулча) – з виділенням року 2020 для наочності.

З рисунку видно дві важливі особливості гідрологічного режиму Дунаю, що мають принципове значення для прогностичної методики. По-перше, на верхньому Дунаї (Регенсбург, Пфеллінг) переважає внутрішньорічна варіативність у формі коротких паводкових подій з тривалістю 3–7 днів, накладених на відносно стабільне середнє значення. По-друге, на нижньому Дунаї (Силистра, Тулча) домінуючою є міжрічна варіативність – у повноводному 2010 році рівні впродовж навігаційного сезону тримаються на 200–300 см вище за маловодні 2015 і 2020 роки. Ці структурні особливості, що принципово відрізняються між верхнім і нижнім Дунаєм, відображаються у методиці через окреме калібрування авторегресійних моделей для постів кожної ділянки.

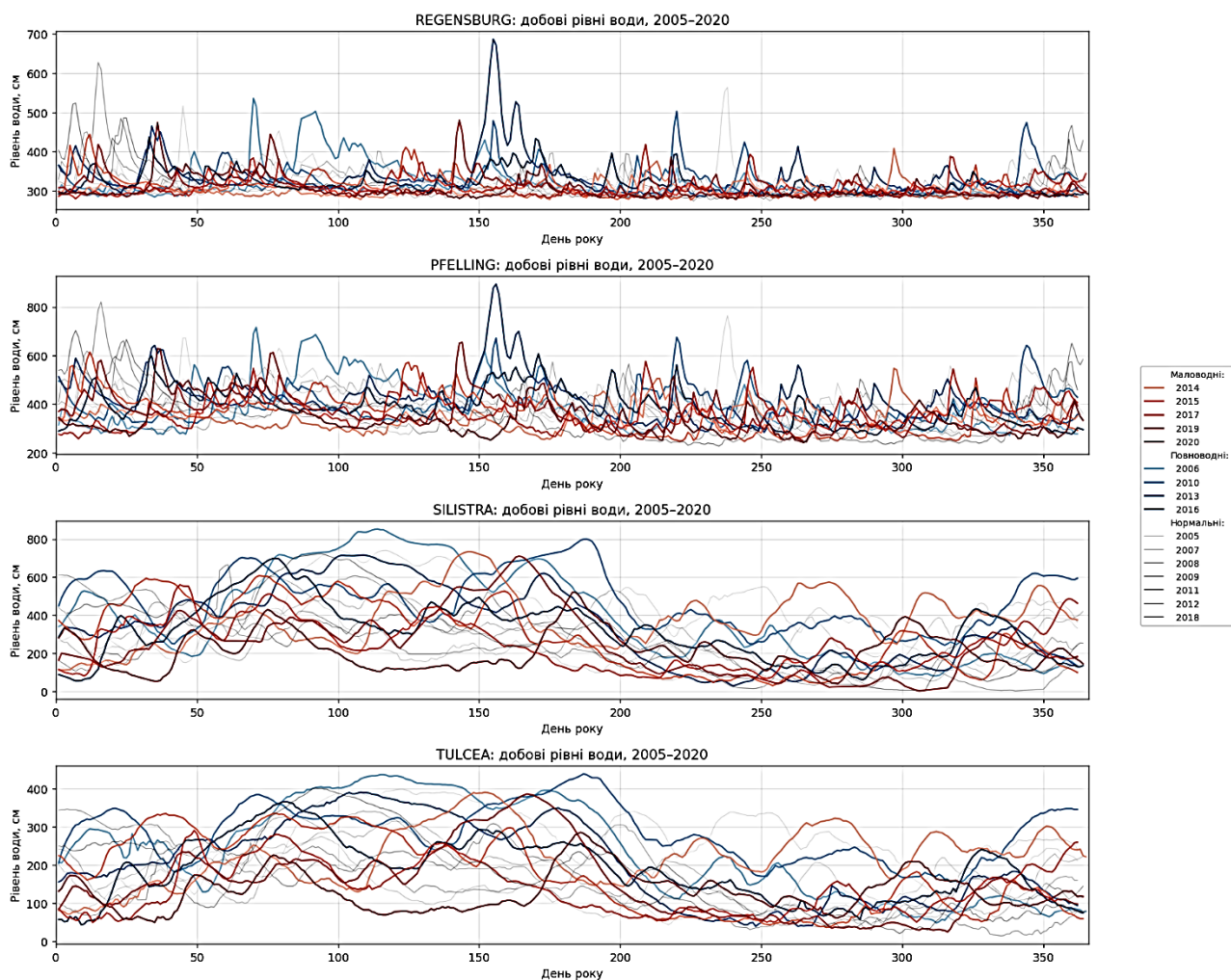


Рисунок 3.2 – Багаторічна варіативність добових рівнів води на ділянках дунайського судноплавного шляху за даними Дунайської Комісії (2005–2020 рр.)

3.5.3 Авторегресійна модель добових рівнів. Горизонт корисного прогнозу

Для прогнозування рівня води на короткостроковому горизонті 1–10 діб використано авторегресійну модель першого порядку AR(1):

$$W_{t+1} = \mu_{m(t+1)} + \varphi(W_t - \mu_{m(t)}) + \varepsilon_t, \quad \varepsilon_t \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2), \quad (3.34)$$

де W_t – рівень води на пості у день t ;

$\mu_{m(t)}$ – кліматологічне середнє рівня для календарного місяця $m(t)$, якому належить день t ; для прогнозу, що перетинає межу місяця, μ змінюється відповідно до місяця кожного дня горизонту;

φ – коефіцієнт автокореляції першого порядку, що характеризує гідрологічну інерцію поста;

ε_t – гаусівський шум з нульовим середнім і дисперсією σ_ε^2 , що описує неузгодженість моделі з фактичними даними.

Параметри моделі (3.34) ідентифікуються методом найменших квадратів за добовими рядами щорічників ДК. Перевага AR(1) перед складнішими моделями (SARIMA, LSTM) у даному застосуванні полягає у трьох обставинах: по-перше, обчислювальна простота й прозорість, що дозволяє реалізацію в електронних таблицях без спеціалізованого програмного забезпечення; по-друге, кількість калібрувальних параметрів (3 на пост: μ_m , φ , σ_ε^2) узгоджується з обсягом доступних даних, що мінімізує ризик статистичної переускладненості моделі (не призводить до надмірної підгонки моделі під випадкові флуктуації ряду); по-третє, як показав попередній статистичний аналіз, реальна автокореляційна структура рядів дунайських рівнів дуже близька до AR(1) – частково-автокореляційна функція (PACF) рядів затухає різко після першого лагу, що є класичною ознакою AR(1)-процесу.

Прогнозний розподіл рівня води на k днів вперед при заданому актуальному значенні W_0 виводиться рекурсивним застосуванням (3.34) і має вигляд нормального розподілу з параметрами:

$$E[W_{t+k}|W_0] = \mu_m + \varphi^k \cdot (W_0 - \mu_m), \quad (3.35)$$

$$Var[W_{t+k}|W_0] = \sigma_\varepsilon^2 \cdot \frac{1 - \varphi^{2k}}{1 - \varphi^2}. \quad (3.36)$$

Формули (3.35)–(3.36) є аналітичним розв’язком прогнозу AR(1) за умови сталого кліматологічного середнього в межах горизонту, тобто коли горизонт (5–10 діб) не перетинає межу календарного місяця. Для прогнозу, що перетинає межу місяця, замість замкнених формул застосовується рекурсивне обчислення за (3.34) зі зміною $\mu_{m(t)}$ на межі місяця; розбіжність із замкненою формою тим більша, чим сильніше різняться кліматологічні середні суміжних місяців. У межах одного місяця формули (3.35)–(3.36) дозволяють для горизонту k обчислити очікуване значення та довірчий інтервал прогнозу, не виконуючи

Монте-Карло симуляцію рівнів. Це дає значну економію обчислень: замість генерації реалізацій рядів рівнів симуляція виконується одразу для розподілу глибин фарватеру.

Емпірична оцінка автокореляційної функції добових рівнів на пості Регенсбург за 2020 рік представлена на рис. 3.3.

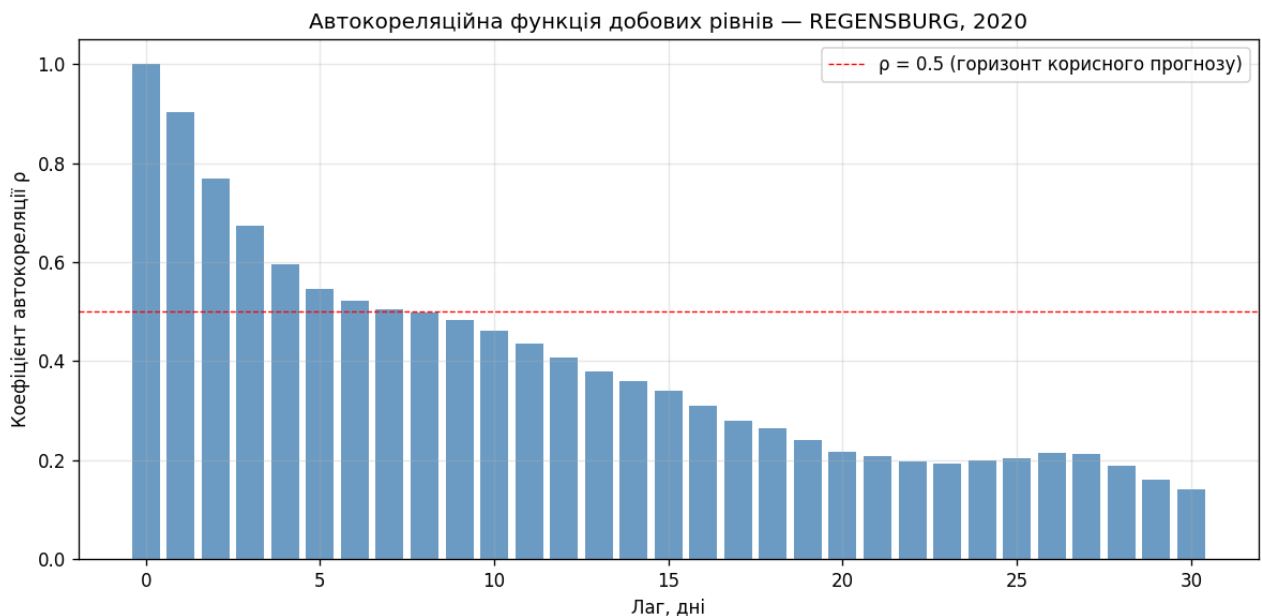


Рисунок 3.3 – Автокореляційна функція добових рівнів води на пості Регенсбург (2020)

На рис. 3.3 горизонтальна штрихова лінія $\rho = 0,5$ умовно позначає горизонт корисного прогнозу. Горизонт визначається емпірично – як ляг, на якому вибіркова автокореляційна функція спадає до рівня 0,5; для цього поста він становить 8 діб. Для порівняння, теоретичний горизонт ідеальної AR(1)-моделі з коефіцієнтом φ впливає з умови $\varphi^k = 0,5$: $k_{0,5} = \frac{\ln 0,5}{\ln \varphi}$, проте емпіричний горизонт із цією величиною загалом не збігається (див. нижче й табл. 3.3), оскільки реальна ACF відображає не лише ляг-1 інерцію, а й сезонну та багатодобову складові. Параметр AR(1) для цього поста становить $\varphi \approx 0,90$, що підтверджує сильну гідрологічну інерцію, тобто повільне згасання впливу попередніх рівнів на поточні значення. Аналогічна оцінка, виконана для Регенсбурга у різні роки, показує таку картину (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Стабільність параметрів AR(1) моделі рівнів води на пості Регенсбург за період 2005–2020 рр. (за даними Дунайської Комісії)

Рік	Коефіцієнт AR(1) φ	Емпіричний горизонт $\rho \geq 0,5$, діб	Теоретичний горизонт $k_{0,5} = \frac{\ln 0,5}{\ln \varphi}$	Середньо- річний рівень, см	Гідрологічний режим року
2005	0,896	3	6	317	нормальний
2006	0,937	9	11	318	повноводний
2007	0,877	4	5	314	нормальний
2008	0,905	15	7	313	нормальний
2009	0,907	10	7	315	нормальний
2010	0,887	4	6	322	повноводний
2011	0,938	8	11	313	нормальний
2012	0,930	7	10	315	нормальний
2013	0,944	6	12	332	повноводний
2014	0,820	3	4	301	маловодний
2015	0,904	8	7	309	маловодний
2016	0,916	8	8	318	повноводний
2017	0,851	3	4	310	маловодний
2018	0,960	>29	17	311	нормальний
2019	0,901	4	7	309	маловодний
2020	0,902	8	7	303	маловодний
Середнє	0,905	≈ 8	≈ 8	314	$std(\varphi) = 0,034$

Попри річні розбіжності, середній горизонт за обома способами практично збігається (теоретичний $k_{0,5} \approx 8$ діб, емпіричний ≈ 8 діб), що підтверджує адекватність AR(1) як базової прогнозової моделі в середньому по вибірці й обґрунтовує прийняте базове значення горизонту 7–8 діб (п. 3.5.5).

Для більш детального уявлення про структуру вхідного шуму AR(1) моделі у різні гідрологічні режими на рис. 3.4 наведено розподіли добових рівнів води на пості Регенсбург за календарними місяцями для трьох репрезентативних років з різних класів – нормального (2008), повноводного (2010) та маловодного (2014). Кожен стовпчик на рисунку є коробковою діаграмою (англ. *boxplot*) – стандартним статистичним поданням розподілу вибірки даних: межі прямокутника відповідають першому ($Q_1 = 25\%$) і третьому ($Q_3 = 75\%$) квантилям вибірки добових значень за відповідний місяць; горизонтальна риска

всередині прямокутника позначає медіану ($Q_2 = 50\%$); вертикальні «вуса», які виходять зі стовпчика догори і вниз, сягають крайніх спостережень у межах $1,5 \cdot IQR$ від відповідного квантиля (де $IQR = Q_3 - Q_1$ – міжквартильний розмах) і обмежуються короткими поперечними рисками; окремі крапки за межами вус – викиди (статистично екстремальні значення), що для гідрологічних рядів відповідають паводковим пікам у повноводні роки або поодиноким низьким мінімумам у маловодні.

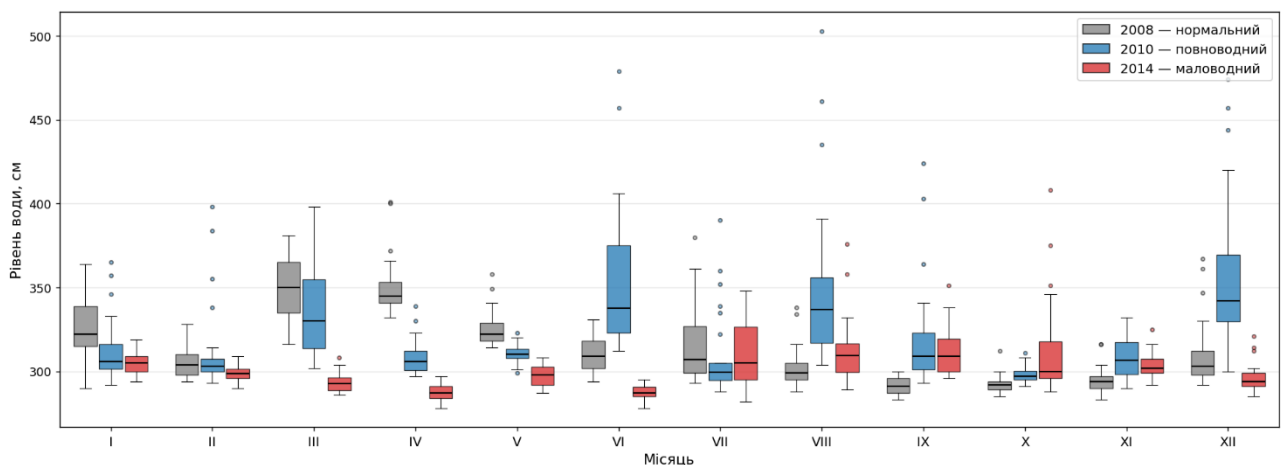


Рисунок 3.4 – Розподіл добових рівнів води на пості Регенсбург за календарними місяцями для трьох репрезентативних років різних гідрологічних режимів: 2008 (нормальний), 2010 (повноводний), 2014 (маловодний)

Рис. 3.4 ілюструє характер міжрічної варіативності, яка кількісно описується дисперсією σ_ε^2 гаусівського шуму ε_t у формулі (3.34) AR(1) моделі. У повноводні роки розкид характеризується широкими хвостами розподілу через епізодичні паводкові події (помітно у місяцях III–VIII), у маловодні роки – стиснутими розподілами поблизу нижніх судноплавних рівнів. Ця варіативність є базовим джерелом невизначеності прогнозу – саме вона визначає ширину довірчих інтервалів у формулах (3.35)–(3.36).

Аналіз даних табл. 3.3 виявляє три методологічно важливі особливості, що обґрунтовують вибір AR(1) як базової прогнозової моделі. По-перше, коефіцієнт авторегресії φ зберігає високу стабільність впродовж 16 років спостережень: середнє значення 0,905 зі стандартним відхиленням 0,034 (відносна варіація менше 4%). Це підтверджує квазі-стаціонарність гідрологічного режиму поста і

виправдовує одноразове калібрування моделі. По-друге, емпіричний горизонт корисного прогнозу (за вибірковою ACF) варіює від 3 діб у маловодних 2014, 2017 та 2020 рр. до понад 29 діб у стабільному 2018 р. Він відрізняється від теоретичного $k_{0,5} = \frac{\ln 0,5}{\ln \varphi}$ (наведеного в табл. 3.3 для порівняння): для більшості років обидві оцінки одного порядку, проте в окремі роки емпіричний горизонт суттєво довший (наприклад, 2018 р.: теоретичний ≈ 17 діб, емпіричний > 29 діб), що пояснюється персистентністю реальних рядів поза межами лаг-1 AR(1)-структури. Емпіричний горизонт чітко корелює з гідрологічним типом року: у роки з частими короткими паводковими подіями автокореляція затухає швидше. По-третє, у вибірці спостерігається міжрічна тенденція до зниження рівнів: до 2013 р. переважали повноводні та нормальні роки (з повноводними у 2006, 2010, 2013), тоді як є період 2014–2020 рр. П'ять із семи років класифіковано як маловодні (2014, 2015, 2017, 2019, 2020). Статистичну значущість цієї тенденції підтверджено непараметричним критерієм Манна–Кендалла для сукупності постів Дунаю (п. 3.5.4, Додаток Г).

У прогностичній методиці виявлену залежність горизонту корисного прогнозу від гідрологічного типу року пропонується враховувати через типізацію поточних умов на основі актуального рівня води W_0 відносно кліматологічного середнього μ_m : якщо $|W_0 - \mu_m|$ перевищує одне стандартне відхилення вибірки, прогностичний горизонт скорочується на 30–50% від базового значення 7–8 діб.

Графічне представлення стабільності параметрів AR(1) моделі за період 2005–2020 рр. наведено на рис. 3.5 та 3.6, який візуалізує дані табл. 3.3 та дозволяє наочно побачити кореляцію між гідрологічним режимом року і горизонтом корисного прогнозу.

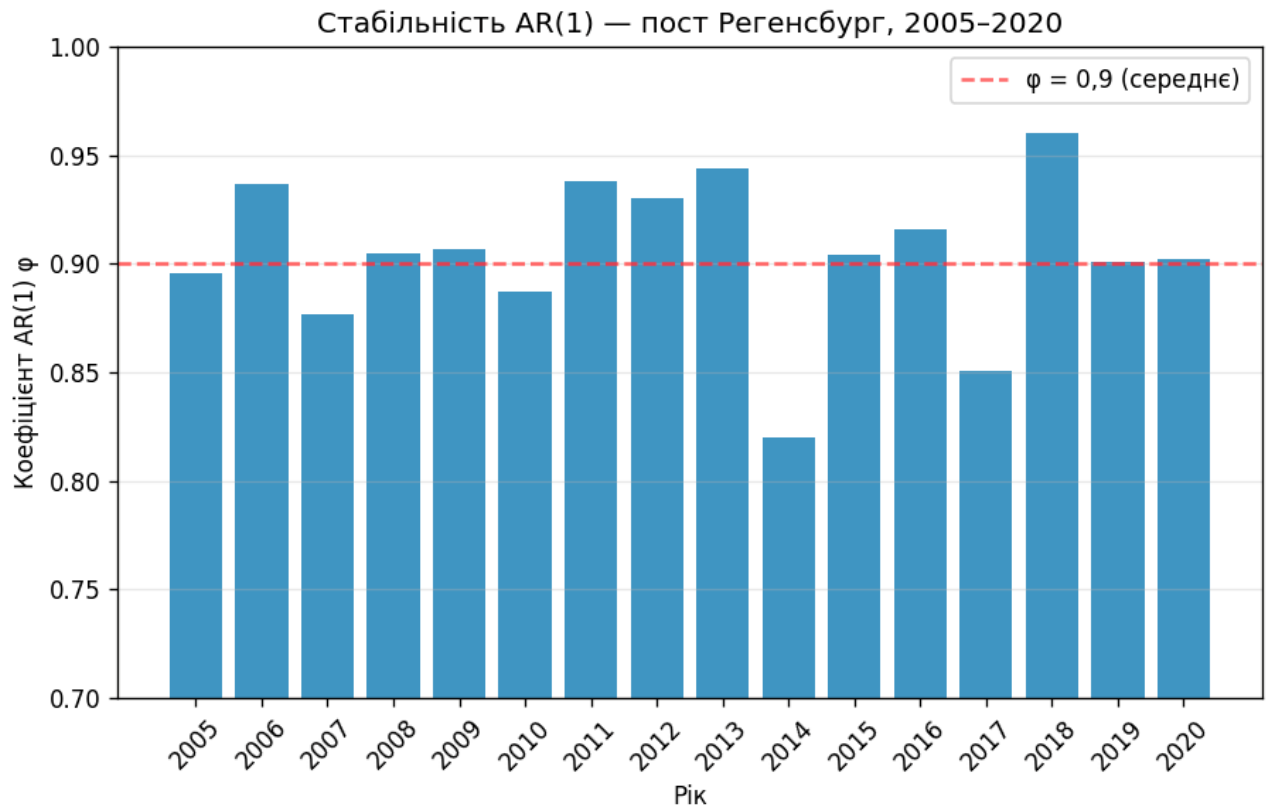


Рисунок 3.5 – Стабільність коефіцієнта AR(1) на пості Регенсбург за період 2005–2020 рр.

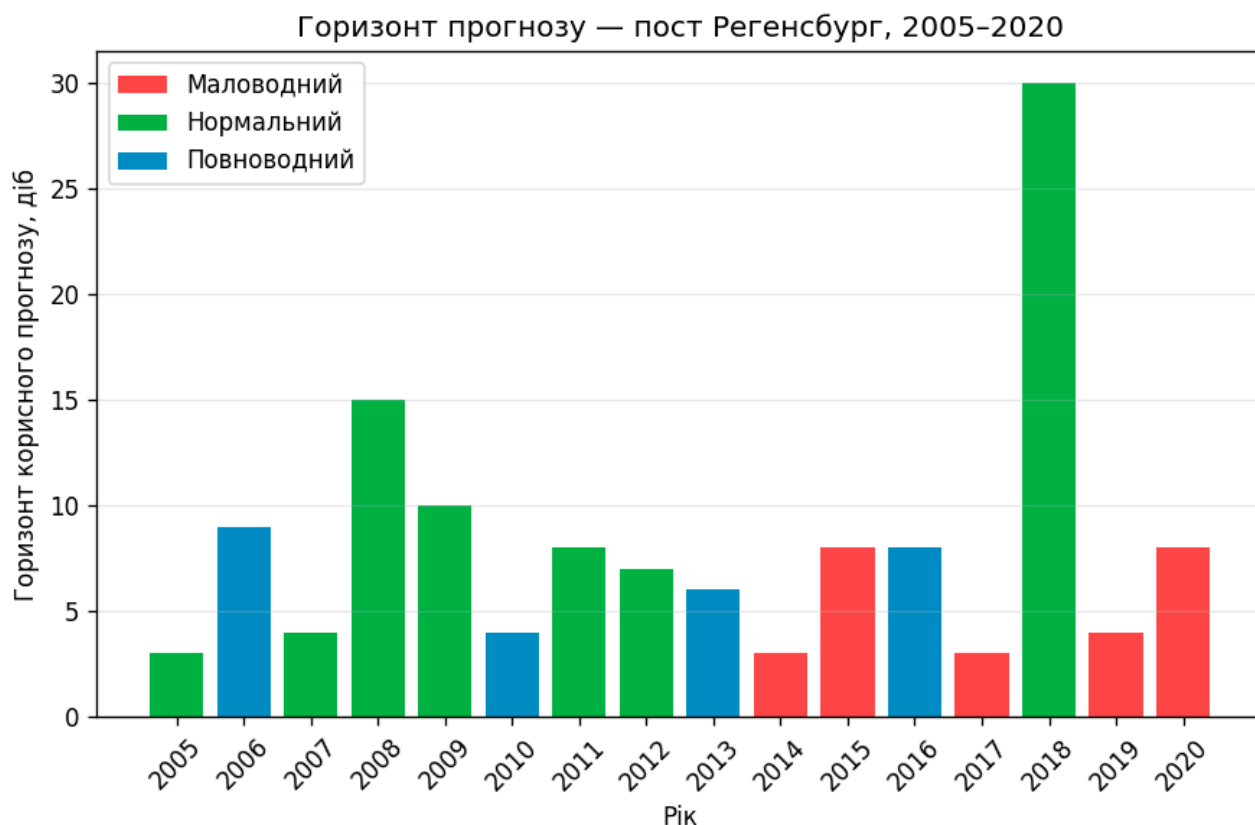


Рисунок 3.6 – Варіативність горизонту корисного прогнозу на пості Регенсбург за період 2005–2020 рр.

Стабільність параметра φ підтверджується аналогічним аналізом для всіх ключових постів дунайського судноплавного шляху. У табл. 3.4 наведено усереднені значення AR(1) для 12 постів, обраних рівномірно вздовж течії від Регенсбурга до Рені.

Таблиця 3.4 – Усереднені параметри AR(1) моделей рівнів води на ключових водомірних постах Дунаю за період 2005–2020 рр.

Водомірний пост	Ділянка Дунаю	φ середнє	$std(\varphi)$	Горизонт, діб (мін–макс)
Регенсбург	верхній	0,904	0,035	3 – 15
Вільсхофен	верхній	0,944	0,019	4 – 20
Лінц	верхній	0,902	0,038	4 – 25
Відень	середній	0,920	0,029	4 – 24
Братіслава	середній	0,925	0,031	4 – 23

Будапешт	середній	0,967	0,013	6 – 23
Мохач	середній	0,981	0,008	7 – 24
Велике Градіште	нижній	0,880	0,057	4 – 23
Лом	нижній	0,988	0,006	10 – 27
Силистра	нижній	0,993	0,003	11 – 29
Рені	нижній	0,996	0,002	12 – 29

Аналіз даних табл. 3.4 виявляє важливу просторову закономірність: значення φ систематично зростає від верхнього Дунаю (0,90–0,94) до нижнього (0,98–1,00), причому одночасно скорочується варіативність $std(\varphi)$ – від 0,035–0,057 на верхньому й середньодунайському відрізках до 0,002–0,008 на нижньому. Така картина відображає різну природу гідрологічного режиму на ділянках: верхній Дунай зазнає інтенсивних коротких паводкових подій від альпійських приток, тоді як нижній Дунай інтегрує стоки великого басейну й має значно повільнішу динаміку зміни рівнів. Це також означає, що горизонт корисного прогнозу для нижніх постів (10–29 діб) значно перевищує типовий горизонт планування рейсу (5–10 діб), що робить AR-прогноз для нижнього Дунаю особливо ефективним.

Багаторічна динаміка рівнів води на ділянках різного гідрологічного режиму ілюстрована на рис. 3.7. На графіку чітко видно, як одне й те саме календарне явище – наприклад, повноводний 2010 р. або маловодний 2014 р. – по-різному виявляється на верхньому, середньому й нижньому Дунаї, що додатково обґрунтовує необхідність окремого калібрування AR(1) моделі для кожного поста.

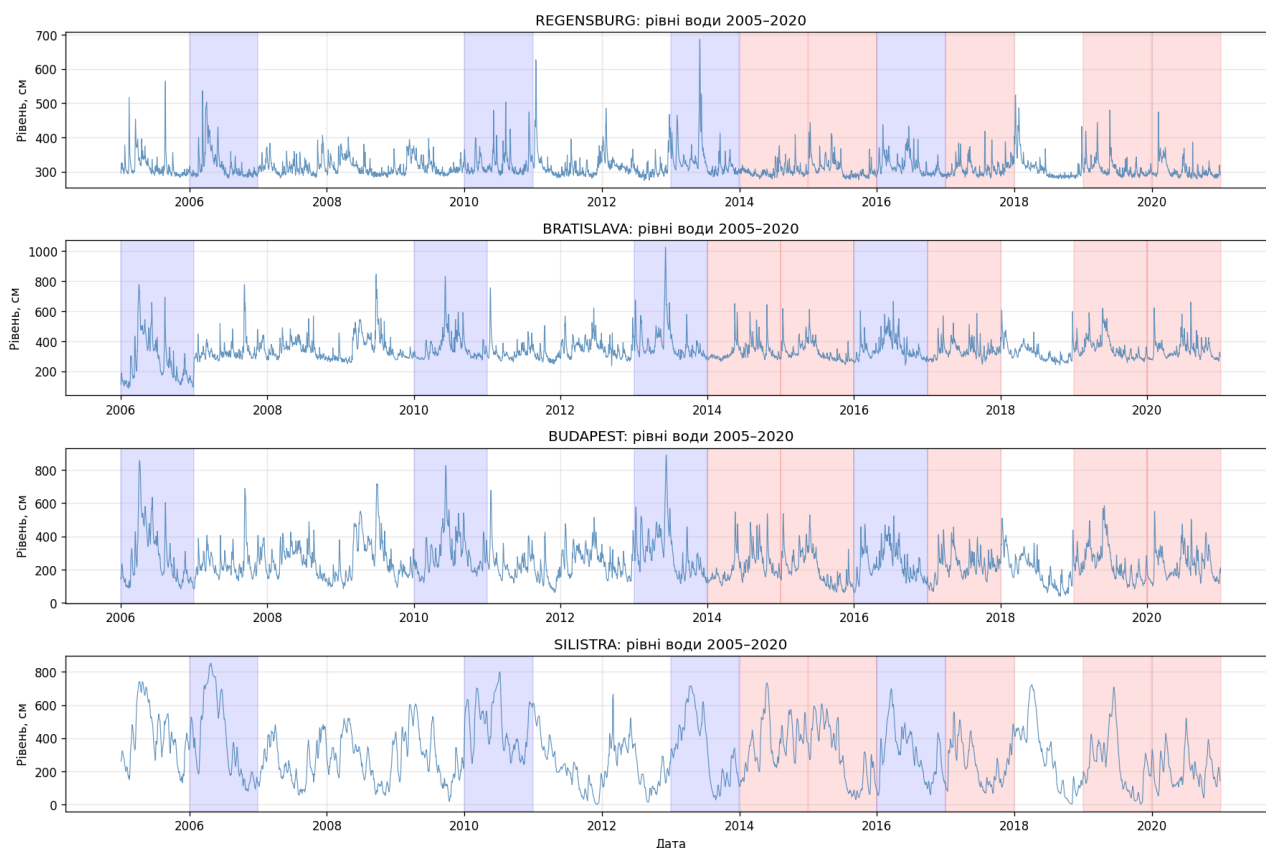


Рисунок 3.7 – Часові ряди добових рівнів води за період 2005–2020 рр. на чотирьох ключових постах Дунаю

На рис. 3.7 рожевим виділено маловодні роки, синім – повноводні (за класифікацією табл. 3.3).

Окрім просторової неоднорідності, часові ряди на рис. 3.7 виявляють і багаторічну тенденцію до зниження рівнів. Для її статистичної перевірки до середньорічних рівнів кожного поста застосовано непараметричний критерій Манна–Кендалла з оцінкою величини тренду нахилом Сена (методику й повні результати наведено в [Додатку Г](#), табл. Г.2). Значущий ($p < 0,05$) низхідний тренд виявлено на 12 (із 60 постів із достатнім рядом спостережень), тоді як значущого зростання не зафіксовано на жодному пості, а спадний напрямок переважає у 90 % постів; медіанний нахил Сена для постів зі значущим спадом становить $-1,6$ см/рік. Односпрямованість тренду (відсутність значущих зростань) свідчить про системний, а не випадковий характер зниження рівнів, найвиразніший на середньому й нижньому Дунаї – ділянках основного судноплавства. Це безпосередньо впливає на суднову задачу: зростання частоти лімітуючих глибин

знижує допустиме завантаження барж і збільшує питому витрату палива на 1 т·км, що додатково обґрунтовує перехід до прогностичного планування рейсу (п. 3.5.6–3.5.7).

3.5.4 Просторово-часова кореляційна структура постів уздовж Дунаю

Прогнозування у системі взаємопов'язаних постів вимагає врахування просторових кореляцій, які виникають через єдність гідрологічного режиму річки. У дунайських умовах ці кореляції мають дві природи: одночасну (рівні на близьких постах змінюються синхронно) та зсунуту в часі (паводкова хвиля з верхньої течії досягає нижніх постів із затримкою, що залежить від відстані та швидкості перенесення).

Для кількісного аналізу одночасних просторових кореляцій побудовано матрицю коефіцієнтів кореляції Пірсона (Додаток Е) добових рівнів води між усіма парами 61 водомірного поста, для яких у щорічнику Дунайської Комісії за 2020 рік міститься щонайменше 300 добових записів. Структура матриці, представлена у вигляді теплокарти на рис. 3.8 виявляє два виразні кореляційні мегакластери, що відповідають верхньо-середньому та нижньому Дунаю, з відокремленою позицією трьох постів зони впливу гідровузлів Залізні Ворота (Дренкова, Дробета) та гирлової зони (Сулина, Вилкове).

Матрицю побудовано за добовими рядами 2020 р., обраного як рік із найповнішим просторовим покриттям мережі постів (61 пост із наскрізним річним рядом – максимум за період 2005–2020 рр.). Окремо перевірено, чи є виявлена структура стійкою, а не випадковою особливістю одного року: для 13 опорних постів із наскрізним добовим покриттям за весь період 2005–2020 рр., що репрезентують усю довжину судноплавного Дунаю, медіана подібності річних кореляційних матриць становить $\approx 0,9$, причому рік до року змінюється рівень кореляцій, а не просторовий патерн кластерів. Детальний аналіз міжрічної мінливості (полірічні матриці за типами водності, бутстреп-оцінка стійкості кластерів) виходить за межі головної та допоміжних задач роботи і не наводиться.

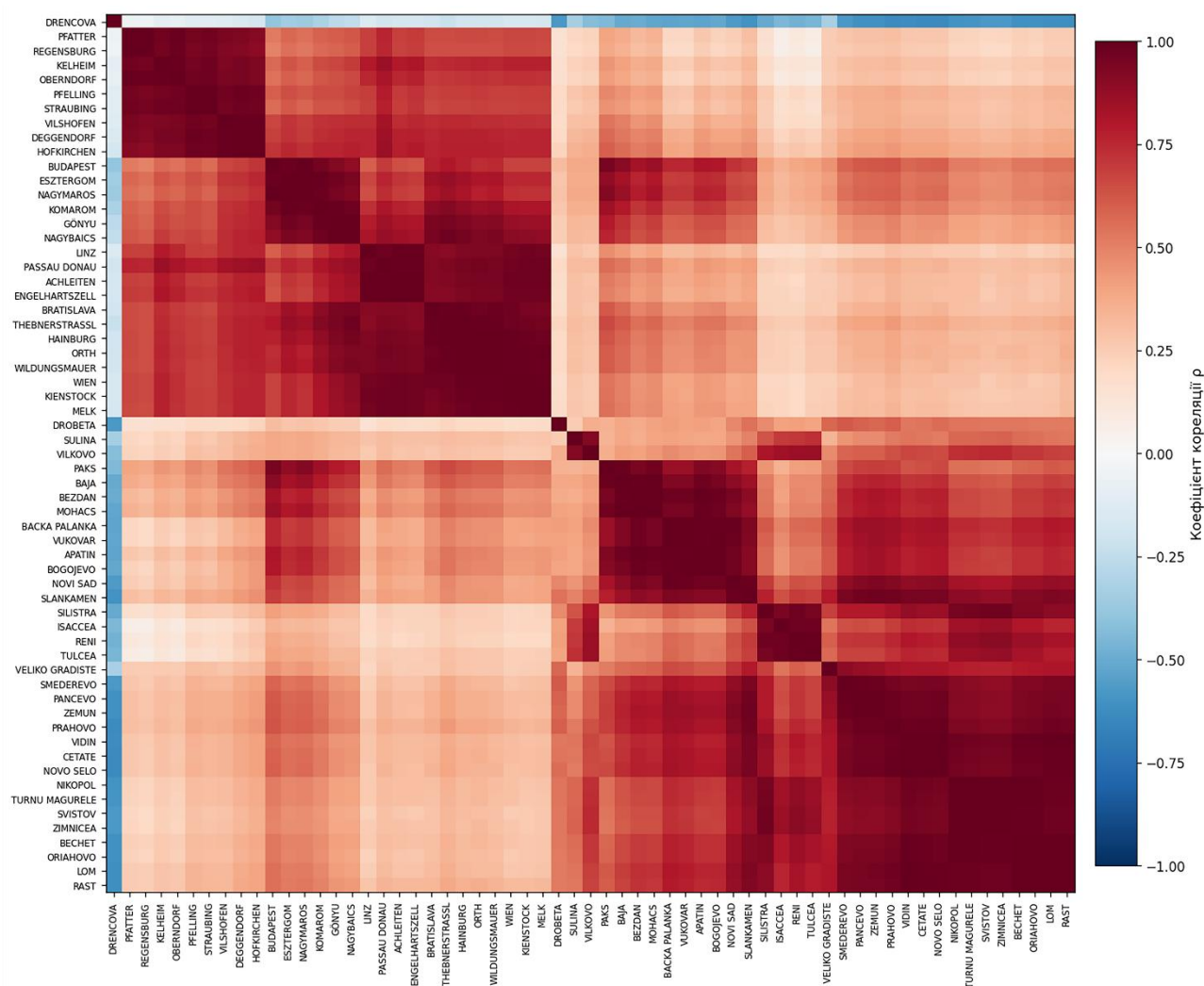


Рисунок 3.8 – Кореляційна матриця добових рівнів води 61 водомірного поста Дунаю за даними щорічника Дунайської Комісії 2020 р.

Для впорядкування водомірних постів у матриці застосовано ієрархічну кластеризацію за методом усередненого зв'язку (*UPGMA – Unweighted Pair-Group Method with Arithmetic averages*). Метод полягає у послідовному об'єднанні водомірних постів у кластери на основі відстаней між ними: на кожному кроці об'єднуються два кластери, для яких середнє арифметичне попарних відстаней між постами одного та постами іншого кластера є мінімальним; процес повторюється, поки всі пости не утворять єдину ієрархію. Як міра відстані між парою постів використано величину $d = 1 - \rho$, де ρ – коефіцієнт кореляції Пірсона добових рівнів. Така метрика інтерпретується природно: $d = 0$ для функціонально ідентичних постів ($\rho = 1$), $d = 1$ для

статистично незалежних ($\rho = 0$), $d > 1$ для постів з протилежно спрямованою динамікою ($\rho < 0$). Сусідні в матриці на рис. 3.8 водомірні пости – це пости з найбільш подібним гідрологічним режимом, тоді як віддалені у матриці водомірні пости мають істотно різну динаміку рівнів.

Результати ієрархічної кластеризації, відображені на рис. 3.8, частково розходяться з традиційним географічним поділом русла на Верхній, Середній та Нижній Дунай (п. 2.1.2). Зокрема, пости від Бази (Будапешт) до Гьонью, які географічно належать до Середнього Дунаю, статистично групуються разом з постами Верхнього Дунаю, формуючи єдиний верхньо-середньодунайський мегакластер. Це відображає той факт, що від Кельхайма до приблизно Будапешта Дунай має схожий за характером гідрологічний режим, у якому домінує альпійське живлення; тонкі відмінності між альпійським та паннонським режимами виявляються лише при подальшому віддаленні. Натомість гідровузли «Залізні ворота» формують природний статистичний бар'єр між верхньо-середнім і нижнім мегакластерами, що повністю узгоджується з межею між Середнім і Нижнім Дунаєм за п. 2.1.2 і має фізичне обґрунтування у вигляді штучного регулювання водотоку. Окремо виокремлюються три пости з нетиповим режимом: пости Дренкова та Дробета зони безпосереднього впливу гідровузлів «Залізні ворота», а також пости Сулина і Вилкове гирлової зони.

Незважаючи на цю розбіжність між емпіричними кластерами та географічним поділом, для зручності верифікації результатів і узгодженості з прийнятою у роботі термінологією у табл. 3.5 наведено статистичні характеристики попарних кореляцій з прив'язкою саме до географічного поділу п. 2.1.2.

Таблиця 3.5 – Розподіл коефіцієнтів попарної кореляції добових рівнів води у межах та між географічними кластерами постів Дунаю за поділом п. 2.1.2 (2020 р.)

Кластер / пара кластерів	Постів / пар	$\rho_{\min}$	$\rho_{\text{середнє}}$	$\rho_{\max}$
Верхній Дунай (Кельхайм – Гьонью)	23 / 253	0,58	0,84	1,00
Середній Дунай (Гьонью – Залізні ворота)*	19 / 171	0,40	0,81	1,00
Нижній Дунай (Залізні ворота – гирло)	19 / 171	0,25	0,83	1,00
Верхній – Середній	–	0,26	0,44	0,99
Верхній – Нижній	–	0,06	0,29	0,50
Середній – Нижній	–	0,15	0,58	0,98

* Без урахування поста Дренкова, розташованого у зоні безпосереднього регулювання гідровузлів «Залізні ворота» зі специфічним техногенним режимом. З урахуванням Дренкова статистика в межах Середнього Дунаю спотворюється до значень $\rho_{\min} = -0,605$, $\rho_{\text{середнє}} = 0,672$.

Дані табл. 3.5 виявляють кілька методологічно важливих особливостей. По-перше, всередині кожного географічного кластера домінують високі попарні кореляції (середні значення 0,81–0,84 за 2020 р.; рівень дещо змінюється рік до року, але співвідношення «високі всередині – низькі між віддаленими» зберігається стабільно, див. перевірку стабільності вище), що відображає синхронність відгуку рівнів на спільні метеорологічно-гідрологічні чинники в межах ділянки. По-друге, кореляції між суміжними кластерами (Верхній – Середній, Середній – Нижній) залишаються відносно високими (середні 0,44–0,58), тоді як між найвіддаленішими (Верхній – Нижній) – суттєво знижуються до 0,29 у середньому. Це підтверджує гіпотезу про різні провідні гідрологічні фактори у верхній (танення альпійських снігів) та нижній (надходження приток із Карпат і Балкан) частинах басейну. По-третє, особливу увагу привертає той факт, що результати ієрархічної кластеризації за рис. 3.8 включають пости від

Гьонью до Будапешта, які географічно входять у Середній Дунай, в єдиний статистичний кластер з постами Верхнього Дунаю – це відображає континуальність альпійського гідрологічного режиму від Кельхайма до Будапешта і свідчить про те, що меридіональна межа між Верхнім та Середнім Дунаєм за п. 2.1.2 є радше географічним, ніж гідрологічним рубежем. З методологічної точки зору, виявлена структура дозволяє істотно скоротити кількість незалежних модельованих величин: достатньо прогнозувати по 2–3 опорних постах у кожному географічному кластері, а решту значень виводити через регресію від опорних.

Зсунута в часі кореляція (*cross-correlation function*, *CCF*) дозволяє додатково використовувати інформацію з верхніх постів для прогнозу нижніх. Аналіз *CCF* між опорними постами на даних 2020 р. показав, що для пари Будапешт – Силистра коефіцієнт кореляції зростає монотонно від $\rho \approx 0,41$ при нульовому лагу до $\rho \approx 0,76$ при лагу 7 діб, що відповідає характерному часу розповсюдження гідрологічного сигналу від середнього до нижнього Дунаю. Це означає, що актуальний рівень у Будапешті містить інформацію про майбутній рівень у Силистрі через 5–7 діб з кореляцією, що перевищує безумовну автокореляцію Силистри на тому самому горизонті. У прогностичній моделі ця додаткова інформація включається через лінійну комбінацію локального AR-прогнозу та регресії від верхнього посту:

$$\hat{W}_{t+k}(\text{вп}_2) = \alpha \cdot \text{AR}_{\text{пр}}(\text{вп}_2, W_{0,2}, k) + (1 - \alpha) \cdot \text{Регр}(W_t(\text{вп}_1)), \quad (3.37)$$

де $\hat{W}_{t+k}(\text{вп}_2)$ – прогнозне значення рівня води на цільовому водомірному пості (вп₂, нижче за течією) на дату $\{t + k\}$;

t – поточна дата (момент початку прогнозу);

k – горизонт прогнозу в днях;

вп₁ – опорний пост, розташований вище за течією від вп₂ у тому самому або в суміжному кореляційному кластері, актуальний рівень якого використовується як додаткове джерело інформації про майбутній стан вп₂;

$\alpha \in [0, 1]$ – ваговий коефіцієнт, що визначає вклад локального AR(1)-прогнозу відносно регресійної компоненти;

$AR_{\text{пр}}(w_{p_2}, W_{0,2}, k)$ – функціональне позначення прогнозу за AR(1)-моделлю водомірного поста w_{p_2} , обчисленого за формулою (3.35) з вхідним актуальним значенням $W_{0,2}$ (тобто рівнем на пості w_{p_2} в день t) і горизонтом k ;

$\text{Регр}(W_t(w_{p_1}))$ – регресійна оцінка вигляду $a_{1,2} + b_{1,2} \cdot W_t(w_{p_1})$;

$a_{1,2}, b_{1,2}$ – калібрувальні коефіцієнти, що враховують характерний час перенесення гідрологічного сигналу між постами 1 і 2;

$W_t(w_{p_1})$ – актуальне значення рівня води на пості 1 у момент часу t .

Дисперсія гібридної оцінки як опуклої комбінації двох прогнозів становить $Var[W_{t+k}(w_{p_2})] = \alpha^2 Var(AR_{\text{пр}}) + (1 - \alpha)^2 Var(\text{Регр}) + 2\alpha(1 - \alpha)Cov(AR_{\text{пр}}, \text{Регр})$. У базовому варіанті прогнозу, застосованому в інтеграції з Монте-Карло (п. 3.5.6), використовується локальна AR(1)-модель ($\alpha = 1$), для якої дисперсія визначається формулою (3.36); врахування коваріаційного члена за активації регресійного розширення є напрямом подальшого розвитку.

Ваговий коефіцієнт α оптимізується методом найменших квадратів за крос-валідаційною помилкою прогнозу на історичних даних – для горизонтів, на яких міжпостовий регресійний прогноз дає нижчу помилку, ніж локальний AR(1) (зокрема, у нижньодунайському кластері при $k = 5-7$ діб), оптимальне значення α зменшується до 0,3–0,5; для коротких горизонтів $k = 1-2$ діб, де домінує AR-структура, оптимальне α наближається до 1. Така гібридна модель забезпечує точніший прогноз, ніж окремо взята AR-модель пункту призначення, оскільки використовує два незалежні джерела інформації про майбутній стан поста 2 – локальну AR-інерцію та зсунуту в часі кореляцію з вищерозташованим водомірним постом.

3.5.5 Трансляція прогнозованих рівнів у глибини фарватеру

Для застосування прогнозованих рівнів у моделі енергоефективності необхідна функціональна залежність глибини фарватеру H на ділянці Δ_i від рівня води W на найближчому водомірному пості. У межах однієї ділянки ця залежність визначається морфометрією русла, регулярними роботами з днопоглиблення та лімітуючими перекатами. Дунайська Комісія публікує

таблиці лімітуючих глибин у розділі IV.2.2 щорічників, де для кожного перекату наведено добові значення фактичної глибини на лімітуючих ділянках судноплавного шляху.

Порівнюючи добові ряди рівнів води з добовими рядами лімітуючих глибин на тих самих відрізках за один календарний рік, можна емпірично побудувати залежність $H_{\phi}(W_{\text{вп}})$ у вигляді кусково-лінійної регресії або степеневій функції:

$$H_{\phi,i} = a_i + b_i \cdot W_{\text{вп}(i)} + \varepsilon_{\phi,i}, \varepsilon_{\phi,i} \sim N(0, \sigma_{\phi,i}^2), \quad (3.38)$$

де a_i , b_i , $\sigma_{\phi,i}$ – коефіцієнти, що калібруються за історичними рядами для кожної ділянки маршруту окремо;

$\varepsilon_{\phi,i}$ – випадкова складова, що відображає наносні процеси, тимчасові зміни геометрії русла між роботами з днопоглиблення та похибки самих гідрологічних спостережень; додає до прогнозу глибини фарватеру додаткове джерело невизначеності, яке у моделі п. 3.4 інтегрується через відповідне розширення дисперсії розподілу $F(H_i)$.

Розподіл прогнозованої глибини фарватеру на день $(t + k)$ при актуальному рівні W_0 на пості, що обслуговує ділянку Δ_i , є нормальним розподілом з параметрами:

$$E[H_{\phi,i}|t + k, W_0] = a_i + b_i \cdot E[W_{t+k}|W_0]; \quad (3.39)$$

$$\text{Var}[H_{\phi,i}|t + k, W_0] = b_i^2 \cdot \text{Var}[W_{t+k}|W_0] + \sigma_{\phi,i}^2. \quad (3.40)$$

Формули (3.39)–(3.40) дають кінцевий результат прогностичного блоку – параметри умовного нормального розподілу глибини фарватеру для кожної ділянки маршруту на кожен день прогнозного періоду. Цей розподіл є вхідною інформацією для імовірнісної моделі енергоефективності рейсу.

3.5.6 Інтеграція з імовірнісною оцінкою енергоефективності рейсу

Прогнозний блок п. 3.5.3–3.5.5 інтегрується з Монте-Карло симуляцією, описаною у п. 3.4, через заміну безумовних розподілів $F(H_i)$ для глибин фарватеру на умовні $F(H_i|(t_0 + \Delta t_i), W_0)$, де Δt_i – очікуваний час прибуття штовхача на ділянку Δ_i , відлічуваний від дати виходу t_0 . Час Δt_i обчислюється

послідовним додаванням тривалостей переходу по ділянках, які у свою чергу залежать від планової швидкості руху та конфігурації каравану.

Алгоритм прогнозного розширення Монте-Карло симуляції має таку структуру:

Крок 1. За планованим маршрутом і складом каравану обчислюються прогнозовані тривалості переходу по кожній ділянці Δt_i та сумарний час T рейсу.

Крок 2. Для кожної ділянки і визначається прогнозний день рейсу $t_i = t_0 + \Delta t_i$, що буде використано для побудови умовного розподілу глибини.

Крок 3. Для кожного водомірного поста, що обслуговує ділянки маршруту, через формули (3.35)–(3.36) обчислюються параметри умовного розподілу прогнозованого рівня води W_{t_i} при відомому актуальному значенні W_0 .

Крок 4. Через залежність (3.39)–(3.40) рівні води транслюються в умовні розподіли глибин фарватеру $F(H_i|t_i, W_0)$ для кожної ділянки.

Крок 5. Для кожної реалізації Монте-Карло $k = 1, 2, \dots, N$ генеруються випадкові значення глибин H_i^k з умовних розподілів $F(H_i|t_i, W_0)$; інші компоненти вектора стану $(m_{\text{cargo}}, v_g, SFC, k_H)$ генеруються за безумовними розподілами, заданими у п. 3.4.

Крок 6. Обчислюються FC_i^k, TW_i^k та інтегральний показник EE^k за формулами п. 3.4.3.

Крок 7. За вибіркою $\{EE^k, k = 1, \dots, N\}$ визначаються характеристики прогнозного розподілу: очікуване значення $E[EE|t_0, W_0]$, квантілі для побудови довірчих інтервалів, ймовірність перевищення нормативу.

Принципова відмінність прогнозного результату від безумовного полягає у тому, що довірчий інтервал прогнозу EE звужується відносно безумовного, оскільки врахування актуального гідрологічного стану зменшує невизначеність вхідних параметрів. Кількісно це звуження найбільш виражене для рейсів з коротким горизонтом (1–3 доби), де домінує AR-структура, та поступово згасає до безумовного інтервалу при наближенні горизонту до 7–8 діб.

3.5.7 Застосування методики на етапі планування рейсу

Запропонована методика інтегрується в практику планування рейсу штовхача з караваном через виконання послідовності кроків, що поєднують вхідні дані оператора та автоматизовані обчислення прогнозного модуля. На вхід методика отримує: плановану дату виходу з порту, склад каравану та параметри головної енергетичної установки, перелік ділянок маршруту з прив'язками до водомірних постів Дунаю, актуальні рівні води W_0 на ключових опорних постах верхнього, середнього і нижнього Дунаю, виміряні безпосередньо перед виходом, та параметри AR(1) моделей цих постів, попередньо калібровані за добовими рядами щорічників ДК (п. 3.5.3, табл. 3.2–3.3).

Послідовність обчислень проходить через прогнозний блок (формули (3.34)–(3.37)), де AR(1) моделі генерують умовні розподіли рівнів $W_{\{t+k\}}$ для дат очікуваного перебування на кожній ділянці; через лінійні залежності (3.38)–(3.40) ці розподіли транслуються в умовні розподіли глибин фарватеру $F(H_i | t, W_0)$; далі – через Монте-Карло симуляцію (п. 3.4.3), у якій безумовні розподіли вхідних параметрів замінюються умовними, отримуються характеристики прогнозного розподілу інтегрального показника енергоефективності рейсу EE .

На виході методика забезпечує отримання таких підсумкових характеристик: очікуваного значення $E[EE|t_0, W_0]$, 95 %-го довірчого інтервалу $[Q_{0,025}; Q_{0,975}]$, ймовірності $P(EE > EE_{threshold}|t_0, W_0)$ перевищення нормативного або контрактного порогу, а також структури внеску кожної ділянки маршруту в загальну невизначеність прогнозу. Останнє має пряме практичне значення для планування: визначає ділянки рейсу, на яких очікується найбільший ризик відхилення від прогнозу і де доцільно враховувати оперативні корекції плану в ході рейсу.

Кількісна апробація методики на даних реальних рейсів штовхачів Українського Дунайського пароплавства, із зіставленням прогнозованих та фактичних значень EE та оцінкою практичної точності прогнозу, наведена у подальших розділах дисертаційної роботи.

Підсумовуючи результати розгляду імовірнісного підходу до прогнозування енергоефективності рейсу на Дунаї, можна зазначити наступне.

У даному підрозділі запропоновано прогностичне розширення імовірнісної моделі енергоефективності дунайського рейсу, орієнтоване на горизонт планування 5–10 діб і побудоване на основі відкритих гідрологічних даних Дунайської Комісії. Методика спирається на трирівневу базу: 90-річний довідник для оцінки кліматологічної бази, 16-річні щорічники з добовим розрізненням для калібрування авторегресійних моделей, нормативи НСРР/ВСР для класифікації навігаційних режимів.

Емпірично встановлено, що автокореляційна структура добових рівнів води на основних дунайських постах характеризується високим коефіцієнтом $AR(1)$, середнє значення якого зростає від 0,90 на верхньому Дунаї до 0,99 на нижньому. Значення $\varphi \rightarrow 0,99$ на нижньому Дунаї наближається до межі стаціонарності (одиничного кореня), тому застосовність стаціонарної $AR(1)$ -моделі для цих ділянок розглянуто окремо. Довірчий інтервал коефіцієнта ($\varphi \pm 1,96 \text{ std}(\varphi)$ за $\text{std}(\varphi)=0,002\text{--}0,0080$ для нижнього Дунаю) лежить у безпосередній близькості до одиниці, тобто гіпотезу одиничного кореня статистично відхилити впевнено не вдається. Проте для короткого операційного горизонту (5–10 діб, тривалість рейсу) це не порушує коректності прогнозу: на таких горизонтах передбачення моделі з $\varphi \rightarrow 0,99$ і випадкового блукання ($\varphi = 1$) практично збігаються, а фізична обмеженість рівнів виправдовує трактування процесу як стаціонарного з повільною реверсією на операційних масштабах. Горизонт корисного прогнозу за критерієм $\rho \geq 0,5$ становить 6–8 діб у нормальних гідрологічних умовах та 3–4 доби у маловодні роки на верхньому Дунаї, що добре узгоджується з типовою тривалістю дунайського рейсу. На нижньому Дунаї емпіричний горизонт значно більший (10–29 діб), що відображає високу інерційність рівнів і робить короткостроковий прогноз для цих ділянок особливо надійним. Стабільність параметра φ у багаторічній перспективі (2005–2020) – стандартне відхилення менше 4 % від середнього –

підтверджує методологічну обґрунтованість використання простої авторегресійної моделі AR(1) замість складніших стохастичних структур.

Просторова кореляційна структура постів уздовж Дунаю має кластерну природу з трьома виразними кластерами (верхньо-, середньо- і нижньодунайським), що дозволяє використовувати лише по 1–2 опорних постах для кожного кластера, а решту значень виводити через регресійні зв'язки. Це робить інструмент компактним і придатним для практичного застосування на рівні судноплавної компанії.

Інтеграція прогностичного блоку з Монте-Карло симуляцією п. 3.4 виконується через заміну безумовних розподілів вхідних параметрів на умовні, що дає звужений та зсунутий за центром розподіл прогнозованої енергоефективності рейсу. Звуження довірчих інтервалів відносно безумовних оцінок є кількісним показником інформаційної цінності оперативних гідрологічних даних для планування рейсу.

Запропонована методика створює методологічну основу для розробки програмного інструмента підтримки прийняття рішень на етапі планування рейсу штовхача з караваном на дунайському судноплавному шляху.

Висновки до третього розділу

У розділі 3 розроблено математичну модель способу оцінки енергоефективності рейсу самохідного судна з караваном на дунайському судноплавному шляху, що поєднує детермінований, параметричний, імовірнісний і прогностичний рівні опису рейсу. Модель ураховує специфіку дунайського басейну: значну гідрологічну невизначеність, роль шлюзувань і проводок у бюджеті часу рейсу, кусково-неоднорідні умови плавання та обмеженість прямого вимірювання потужності й опору. Кількісну перевірку моделі та її переваг над класичними індексами ($EEOI$) виконано в розділі 4. Основні результати формулюються так.

1. Запропоновано інтегральну математичну модель енергоефективності рейсу самохідного судна з караваном, побудовану на чотирикомпонентному векторі стану $x(t) = (x_{hydro}, x_{load}, x_{time}, x_{eng})$, що охоплює гідрологічні, навантажувальні, часові й технічні аспекти рейсу. На її основі сформульовано систему показників: фактичні (EE_{disc} , $EE_{CO_2, disc}$) і нормовані ($EE_{fuel, norm}$, $EE_{CO_2, norm}$ – через множник k_H). Наукова новизна полягає не в структурі індексу «паливо/транспортна робота» (розвиток $EEOI$), а в адаптації операційного показника до рейсу зі змінною конфігурацією каравану та гідрологічним нормуванням умов мілководдя й течії. Модель призначена для опису неусталеного багаторежимного рейсу; перевірку адекватності на реальних рейсах виконано в розділі 4.

2. Виконано дискретне наближення моделі за n ділянками з розділенням неперервних компонент (усереднюються) і ступінчастих (сталі на ділянці), що коректно враховує категоріальні змінні. Розмежовано фактичний індекс (реальна енергоефективність) і нормований (приведений до референтних умов для зіставлення); нормований не тлумачиться як фактична енергоефективність. Гідрологічний множник означено як відношення опорів $k_H = \frac{R_{shallow}}{R_{ref}}$ (параметризація – Додаток Є).

3. Сформовано структуру моделі гідродинамічного опору й потрібної потужності на основі тривимірної декомпозиції повного опору (модифікований формфактор мілководдя за [75; 78], корекції для караванів за [62; 79]), у якій мілководдя враховано аргументом H/d , а течія – через швидкість відносно води $v = v_g \pm U_c$, без виокремлення їх в окремі сили опору. Установлено послідовність потужностей $P_R \rightarrow P_D \rightarrow P_e \rightarrow P_i$ з однозначним розмежуванням ККД (η_{prop} , η_{shaft} , η_{mech}) без подвійного врахування втрат. Обґрунтовано використання параметричної діагностики робочого процесу як опосередкованого джерела даних про ефективну потужність P_e за умов, коли пряме вимірювання опору й потужності на досліджуваних суднах відсутнє через технічні й нормативні обмеження. Числові коефіцієнти й калібрування наведено в розділі 4.

4. Розроблено алгоритм імовірнісної оцінки енергоефективності, у якому компоненти вектора стану трактуються як випадкові величини з емпіричними (тип А) чи прийнятими (тип В за GUM) розподілами, а показник EE – як випадкова величина, для якої методом Монте-Карло визначаються сподівання, дисперсія, довірчі інтервали та ймовірність перевищення нормативу. Ранговий аналіз Спірмена застосовано як інструмент попереднього ранжування (скрінінг) факторів за силою монотонного зв'язку; для строгої декомпозиції дисперсії потрібні методи на основі дисперсії (індекси Соболя, *FAST*, внески Шеплі).

5. Пропульсивний ККД η_{prop} виокремлено як самостійну стохастичну компоненту. Для розрахунків прийнято трикутний розподіл η_{prop} на інтервалі $[0,52; 0,68]$ з модою 0,60 (тип В за GUM, проєктні й літературні дані), що відповідає коефіцієнту варіації близько 5 %; ця оцінка потребує уточнення за даними параметричної діагностики. Виокремлення η_{prop} розширює традиційну модель опору й потужності та обґрунтовує калібрування коефіцієнтів за діагностикою.

6. Запропоновано прогностичне розширення моделі на горизонт планування 5–10 діб на основі трирівневої бази гідрологічних даних Дунайської

Комісії. Прогнозний блок інтегровано з Монте-Карло заміною безумовних розподілів глибин на умовні; очікуване звуження довірчого інтервалу прогнозованої енергоефективності кількісно оцінено в розділі 4.

7. За результатами аналізу 265 798 валідованих добових записів рівнів води по 71 водомірному посту Дунаю за 16-річний період (2005–2020 рр.) встановлено закономірності, що визначають параметри прогностичної методики:

- коефіцієнт авторегресії AR(1) φ зростає вздовж течії від 0,90 на верхньому Дунаї (Регенсбург, Пфеллінг) до 0,99 на нижньому Дунаї (Силистра, Рені), при одночасному скороченні стандартного відхилення $std(\varphi)$ з 0,035–0,057 до 0,002–0,008. Висока стабільність φ у багаторічній перспективі (відносна варіація менше 4 %) обґрунтовує одноразове калібрування AR(1)-моделей для кожного водомірного поста; для $\varphi \rightarrow 0,99$ застосовність стаціонарної AR(1) перевірено окремо (п. 3.5.3);

- горизонт корисного прогнозу (за емпіричною ACF, критерій $\rho \geq 0,5$) становить 6–8 діб у нормальних гідрологічних умовах та 3–4 доби у маловодні роки на верхньому Дунаї, та більше на нижньому Дунаї, що добре узгоджується з типовою тривалістю дунайського рейсу 5–10 діб і робить AR(1)-прогноз методологічно адекватним для практичного планування; горизонт обчислено за емпіричною ACF, а не як прямий наслідок φ^k (для порівняння $k_{0,5} = \frac{\ln 0,5}{\ln \varphi}$); попри річні розбіжності, середній горизонт за обома способами практично збігається (≈ 8 діб), що підтверджує адекватність AR(1) як базової прогностичної моделі;

- просторово-кореляційна структура: високі внутрішньокластерні кореляції (0,84; 0,81; 0,83) і слабка між найвіддаленішими (0,29), що дозволяє прогнозувати 2–3 опорні пости на кластер, а решту виводити регресією;

- ієрархічна кластеризація (UPGMA) підтвердила природний статистичний бар'єр на гідровузлах «Залізні ворота»;

- значущий низхідний тренд середньорічних рівнів (Mann–Kendall, $p < 0,05$) на 12 водомірних постах (із 60 водомірних постів із достатнім рядом спостережень); при цьому на жодному пості не виявлено значущого зростання, а

напрямок тренду є спадним для 90 % постів, що свідчить про системну тенденцію; медіанний нахил Сена для постів зі значущим спадом становить $-1,6$ см/рік (Додаток Г). Це означає зростання частоти лімітуючих глибин, що для експлуатації штовхачів УДП проявляється як зниження допустимого завантаження барж і збільшення питомої витрати палива на 1 т·км, і обґрунтовує перехід до прогностичного планування рейсу.

8. Розроблено робочу інструментальну реалізацію методики в електронній таблиці (*MonteCarlo_EE_Danube_v2.xlsx*) у форматі семи логічно пов'язаних аркушів. Реалізація не використовує спеціалізованого програмного забезпечення, що полегшує впровадження у судноплавних компаніях, науково-дослідних установах та регуляторних органах басейну Дунаю. Відтворюваність забезпечується фіксацією результатів (опція *Paste-Values*).

9. Розроблений спосіб оцінки енергоефективності створює передумови для переходу від ретроспективної оцінки до проспективного інструмента підтримки рішень: вибір часу виходу з порту за прогнозом, раціональної конфігурації каравану, оцінки ймовірності перевищення нормативів і контрактних зобов'язань, пріоритетних напрямів підвищення ефективності за screening-аналізом чутливості. Розрахункова методика у складі способу спирається на офіційні відкриті дані Дунайської Комісії.

10. Розроблений спосіб оцінки енергоефективності створює основу для апробації на реальних рейсах штовхачів УДП (розділ 4): верифікація калібрувальних коефіцієнтів за рейсовими журналами, кількісна оцінка зменшення невизначеності *EE* при переході до прогнозного режиму, рекомендації з оптимізації рейсової діяльності та обґрунтування напрямів модернізації флоту.

11. Отримані в розділі результати забезпечують розв'язання другої головної наукової задачі (ГЗ-2) та істотну частину третьої головної задачі (ГЗ-3): ГЗ-2 реалізовано через побудову інтегральної та дискретної моделей енергоефективності рейсу штовхачів з караванами з урахуванням змінної конфігурації каравану, гідрологічних умов та структури часу рейсу; ГЗ-3 – через

розроблення фізично обґрунтованої моделі гідродинамічного опору й потрібної потужності, скоригованої за результатами параметричної діагностики, а також через імовірнісну постановку оцінки енергоефективності рейсу з урахуванням невизначеності гідрологічних умов та експлуатаційних факторів.

12. Окреслено межі застосування. Модель застосовна для штовханих караванів на ділянках з відношенням H/d у діапазоні, охопленому параметризацією k_H (Додаток Є); для режимів руху, проводок, маневрувань, шлюзувань і стоянок; за наявності рейсових даних для діагностики ефективної потужності. Модель не застосовна без додаткового калібрування для караванів і ділянок поза охопленим діапазоном H/d та для горизонтів прогнозу понад межу корисності AR(1) для відповідного поста. Тоннокілометровий індекс коректний за умови $\sum m_{cargo,i} D_i > 0$; для баластних перегонів застосовується допоміжний показник витрати на кілометр або годину.

Основні наукові результати по розділу наведені в працях здобувача [66–69; 72; 76; 85–87; 90–100].

РОЗДІЛ 4

СПОСІБ ОЦІНКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА АЛГОРИТМИ ОПТИМІЗАЦІЇ

У розділі 4 розв’язуються насамперед ГЗ-3 і ГЗ-4 технологічної карти, пов’язані з розробленням способу оцінки енергоефективності та практичними алгоритмами його застосування. У підрозділі 4.1 формується завершена система показників енергоефективності для самохідних суден з караваном на дунайському судноплавному шляху, побудована на основі інтегральної та дискретної моделей розділу 3 і адаптована до змінної конфігурації каравану, гідрологічних умов та структури часу рейсу. У підрозділі 4.2 ці показники об’єднуються в формалізований спосіб оцінки: задаються вхідні дані, розрахункові схеми, критерії та правила врахування основних груп факторів, що забезпечує практичне вирішення ГЗ-3. У підрозділі 4.3 розробляються алгоритми обґрунтування експлуатаційних рішень (вибір швидкості, конфігурації каравану, режимів роботи головних енергетичних установок, планування рейсу). У підрозділі 4.4 подано програмну реалізацію способу як інструмент підтримки прийняття рішень, побудований на основі електронних таблиць як приклад універсальної реалізації, доступної без спеціалізованого програмного забезпечення; описано призначення інструменту і користувацькі сценарії (4.4.1), його архітектуру (4.4.2), інформаційну модель та структуру функціональних аркушів (4.4.3), зв’язок обчислювального ядра з моделлю розділу 3 (4.4.4) та робочий цикл користувача з апробацією на масиві з 14 реальних рейсів ПрАТ «Українське Дунайське пароплавство» (4.4.5), що завершує реалізацію ГЗ-4 у частині детермінованої оцінки енергоефективності.

4.1 Система показників енергоефективності для самохідних суден з караваном на судноплавному шляху Дунай

У цьому підрозділі формується система показників енергоефективності для оцінки рейсів самохідних суден з караванами несамохідних барж на

дунайському судноплавному шляху. Об'єктом оцінки є самохідне судно (штовхач або вантажне самохідне судно), яке виконує рейс з караваном; поодинокий рейс без барж розглядається як вироджений випадок із нульовою масою караванного складника, що дозволяє застосовувати запропонований спосіб до всього спектра рейсової діяльності операторів дунайського флоту. На основі інтегральної та дискретної моделей, розроблених у розділі 3, вводяться базові та нормовані індекси енергоефективності рейсу, а також допоміжні показники, які відображають вплив трьох ключових груп факторів – конфігурації каравану, гідрологічних умов фарватеру та структури часу рейсу – на енергоспоживання. Для зручності практичного застосування всі показники узагальнено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Основні показники енергоефективності рейсу та їх призначення

Позначення	Посилання на формулу	Одиниці виміру	Короткий зміст / роль
EE	(3.9)	т палива / (т·км)	Базовий інтегральний паливний індекс рейсу; характеризує сумарну витрату палива на одиницю транспортної роботи за весь рейс.
EE_{CO_2}	(3.10)	т CO ₂ / (т·км)	Індекс питомих викидів CO ₂ на 1 т·км; аналог EE з урахуванням конверсійного фактора палива у викиди CO ₂ .
EE_{disc}	(3.17)	т палива / (т·км)	Дискретний паливний індекс за ділянками рейсу; основний робочий показник для аналізу реальних рейсів.
$EE_{CO_2, disc}$	(3.18)	т CO ₂ / (т·км)	Дискретний варіант індексу за викидами CO ₂ ; використовується для оцінки вуглецевої інтенсивності рейсів.
$EE_{CO_2, norm}$	(3.19)	т CO ₂ / (т·км)	Нормований індекс за викидами CO ₂ ; застосовується для порівняння сценаріїв за різних гідрологічних умов.
$EE_{fuel, norm}$	(3.20)	т палива / (т·км)	Гідрологічно нормований паливний індекс; дозволяє порівнювати рейси, виконані за різних глибин і течій.

C_{var}	(3.23)	грош. од. / (т·км)	Паливна складова питомих змінних експлуатаційних витрат; пов'язує енергетичні індекси з економічною оцінкою.

У табл. 4.1 нормовані індекси відображають витрати палива на одиницю транспортної роботи, приведеної до референтних гідрологічних умов. Узагальнення основних показників у табл. 4.1 дозволяє чітко розмежувати їхню роль у подальшому викладі: інтегральні форми (3.9)–(3.11) використовуються переважно для теоретичного обґрунтування та аналізу чутливості, тоді як дискретні та гідрологічно нормовані індекси слугують основою практичного способу оцінки енергоефективності рейсу й застосовуються в алгоритмах обґрунтування експлуатаційних рішень та числовій апробації методики у підрозділах 4.2–4.5.

4.2 Формалізація способу оцінки енергоефективності

4.2.1 Вхідні дані та джерела інформації

Вхідні дані для розрахунку показників енергоефективності рейсу за запропонованим способом поділяються на три групи залежно від джерела та ступеня обов'язковості (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Структура вхідних даних для розрахунку показників енергоефективності рейсу

Група	Параметр	Позначення	Джерело інформації	Обов'язковість
І. Рейсові експлуатаційні дані	Довжина ділянок маршруту	D_i	Рейсовий журнал, лоція	Обов'язково
	Витрата палива на ділянці	FC_i	Рейсовий журнал, параметрична діагностика ГЕУ	Обов'язково
	Маса вантажу в каравані	$m_{\text{cargo},i}$	Вантажні документи, журнал	Обов'язково

	Конфігурація каравану	$shape_i$	Судновий журнал	Обов'язково
	Структура часу рейсу	$\tau_{mode,i}$	Рейсовий журнал	Обов'язково
II. Гідрологічні дані	Глибина фарватеру / відношення H/d	$H_i/d_{eq,i}$	Гідрологічний пост, адміністрація шляху	Для нормованих індексів
	Швидкість течії	$U_{c,i}$	Гідрологічний пост, спостереження	Для нормованих індексів
	Клас водного шляху	AGN	Технічна документація маршруту	Для нормованих індексів
III. Техніко-економічні характеристики	Питома витрата палива ГЕУ	SFC	Паспортна характеристика, діагностика	Для C_{var} та оптимізації
	Ціна палива	C_f	Оператор, ринкові дані	Для C_{var} та оптимізації
	Конверсійний фактор	CF	IMO, регіональні нормативи	Для індексів CO_2

Перша група – рейсові експлуатаційні дані – є обов'язковою для розрахунку будь-якого з індексів системи показників (табл. 4.1). До неї належать: маршрут рейсу з розбивкою на характерні ділянки та їх довжини D_i (км); фактична витрата палива на кожній ділянці FC_i (т або кг), отримана з рейсових журналів або за результатами параметричної діагностики головних двигунів; маса корисного вантажу в каравані $m_{cargo,i}$ (т) на кожній ділянці з урахуванням точок завантаження, розвантаження та розчеплення барж; конфігурація каравану $shape_i$ на кожній ділянці (кількість барж, їх розміщення, осадки); структура часу рейсу за ділянками (частки часу повного ходу, проводок, маневрувань, стоянок, шлюзування).

Друга група – гідрологічні дані – є обов'язковою для розрахунку нормованих індексів $EE_{fuel,norm}$ та $EE_{CO_2,norm}$ і бажаною для базових дискретних форм. До неї входять: середня глибина фарватеру H_i (м) на ділянці або відношення $H_i/d_{eq,i}$, де $d_{eq,i}$ – еквівалентна осадка каравану; середня швидкість

течії $U_{c,i}$ (км/год); клас водного шляху за AGN для кожної ділянки. Основними джерелами є дані гідрологічних постів адміністрацій водних шляхів окремих ділянок Дунаю, власні спостереження судноводія та базові гідрологічні характеристики ділянок дунайського маршруту, систематизовані в розділі 2. За відсутності точних гідрологічних даних по окремих ділянках допускається використання таблиць типових значень $k_{H,i}$ для характерних класів умов (п. 4.2.4) або консервативна оцінка $k_{H,i} = 1$, що відповідає відмові від нормування та переходу до базового дискретного індексу.

Третя група – техніко-економічні характеристики – використовується для розрахунку показника C_{var} та при виборі оптимального сценарію в алгоритмах підрозділу 4.3. До неї належать: питома витрата палива головних двигунів SFC як функція режиму навантаження (або фактичні дані параметричної діагностики); ціна палива C_f (грош. од./т); конверсійний фактор палива у викиди CO_2 – CF (т CO_2 /т палива), прийнятий відповідно до чинних рекомендацій IMO або регіональних нормативних документів щодо внутрішнього водного транспорту.

Узагальнену структуру вхідних даних із зазначенням джерел інформації, ступеня обов'язковості та відповідних рівнів застосування способу наведено на рис. 4.1.

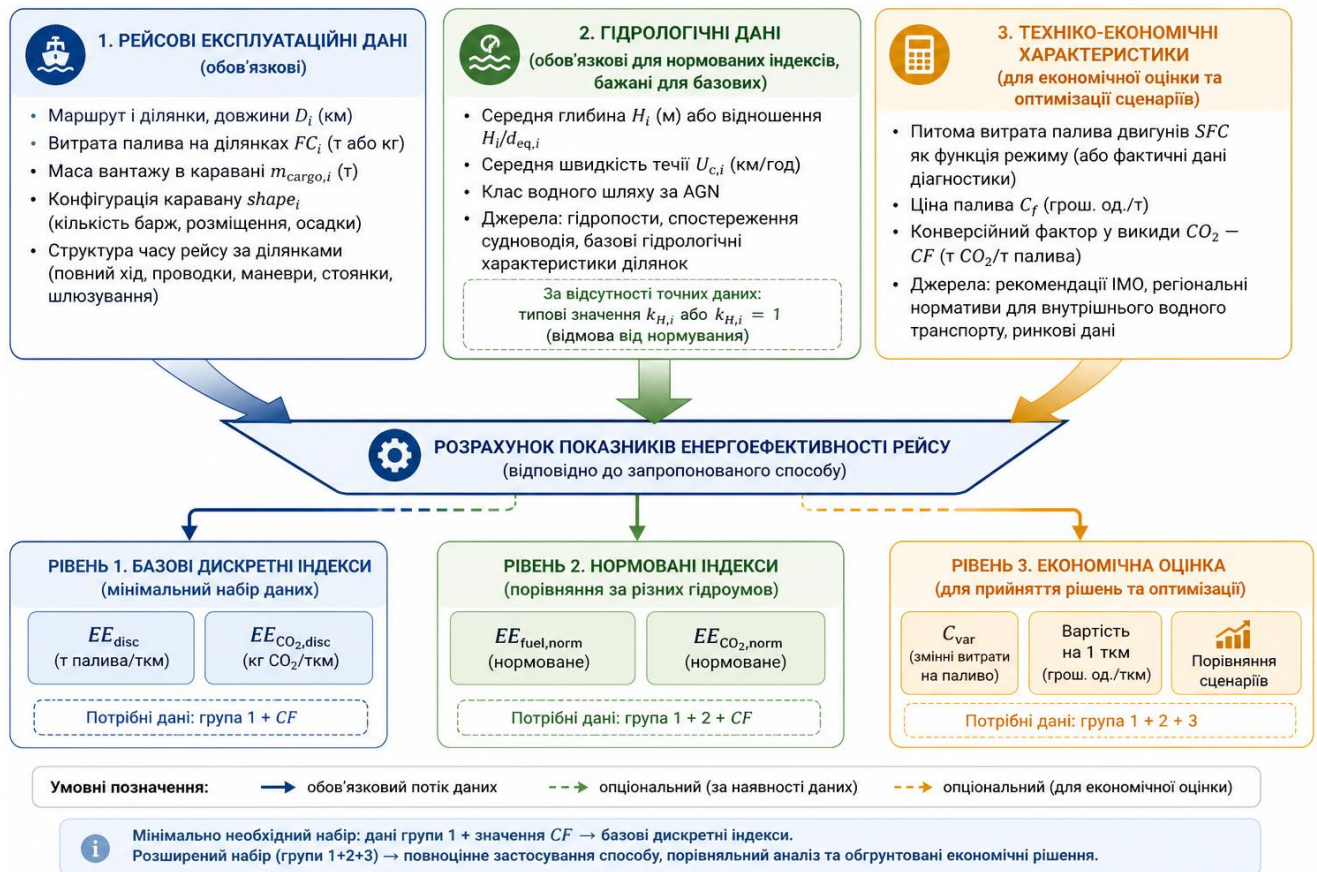


Рисунок 4.1 – Структура вхідних даних і рівні застосування способу оцінки енергоефективності рейсу

Як видно з рис. 4.1, спосіб передбачає три рівні застосування залежно від складу доступних вхідних даних. На першому рівні – за наявності лише рейсових експлуатаційних даних (Група 1) та конверсійного фактора CF – розраховуються базові дискретні індекси EE_{disc} та $EE_{CO_2, disc}$. Залучення гідрологічних даних (Група 2) дозволяє перейти до другого рівня – нормованих індексів $EE_{fuel, norm}$ та $EE_{CO_2, norm}$, придатних для коректного порівняння рейсів за різних гідрологічних умов. Повний склад даних усіх трьох груп забезпечує третій рівень – економічну оцінку та підтримку прийняття рішень щодо оптимізації рейсу.

Такий підхід дозволяє гнучко застосовувати запропонований спосіб залежно від реальної доступності інформації на борту або в операційному центрі судновласника, не обмежуючи сферу застосування виключно повним набором

даних. Розрахункові схеми для кожного рівня та правила формування дискретного вектора стану рейсу розглянуто в підрозділах 4.2.2 та 4.2.3.

4.2.2 Поділ рейсу на ділянки та формування вектора стану

Практичне застосування способу оцінки енергоефективності починається з поділу повного рейсу на квазісталі ділянки Δ_i ($i = 1, \dots, n$), в межах яких гідрологічні умови, конфігурація каравану та режим роботи ГЕУ можна вважати постійними. Такий поділ є необхідною умовою переходу від безперервної інтегральної постановки задачі (п. 3.1) до дискретного наближення (п. 3.2), яке дозволяє використовувати реальні рейсові дані.

Перехід між ділянками визначається за будь-яким з наведених нижче критеріїв:

- зміна конфігурації каравану – точки розчеплення або зчеплення барж, де ступінчасто змінюються N_i та $shape_i$;
- зміна гідрологічної зони – переходи між ділянками з суттєво різними значеннями глибини H_i або класу водного шляху за AGN (наприклад, межі між верхнім, середнім і нижнім Дунаєм, зони мілководних відтинків);
- зміна режиму руху – початок і кінець проводки, шлюзування, маневрування або тривалої стоянки;
- порти завантаження та розвантаження – точки зміни маси вантажу $m_{cargo,i}$.

На практиці деякі критерії можуть збігатися в часі й просторі (наприклад, розчеплення частини барж перед мілководною ділянкою), тому межі ділянок доцільно визначати за найбільш значущою з одночасних змін.

Для кожної ділянки Δ_i формується усереднений вектор стану $x^{(i)}$, що включає:

- гідродинамічний підвектор: $H_i, U_{c,i}, d_{eq,i}, shape_i, k_{hull,i}$;
- експлуатаційно-часовий підвектор: $\tau_{mode,i}$ (частки часу за режимами на ділянці), $v_{g,i}$;
- метеорологічний підвектор: $U_{w,i}, \omega_i$ (за наявності даних).

Ступінчасті компоненти вектора стану (shape_i , N_i) на кожній квазісталій ділянці беруться як константа – усереднення для них не має фізичного сенсу. Для безперервних компонент (H_i , $U_{c,i}$) використовуються середні по ділянці значення, отримані з даних гідрологічних постів або безпосередніх спостережень.

Мінімально необхідний обсяг інформації для коректного поділу рейсу на ділянки відповідає даним Групи I (п. 4.2.1): рейсовий журнал із зазначенням точок зміни конфігурації каравану, режимів руху та протяжності відтинків. Залучення даних Групи II дозволяє уточнити межі гідрологічних зон і сформувати гідрологічний підвектор для розрахунку нормованих індексів.

4.2.3 Розрахункові схеми для основних і нормованих індексів

Залежно від складу доступних вхідних даних запропонований спосіб реалізується за однією з трьох розрахункових схем, що відповідають рівням застосування, визначеним у п. 4.2.1 (рис. 4.1). Кожна наступна схема включає всі кроки попередньої та розширює її додатковими розрахунковими блоками. Розгалужений алгоритм вибору та реалізації розрахункових схем наведено на рис. 4.2.

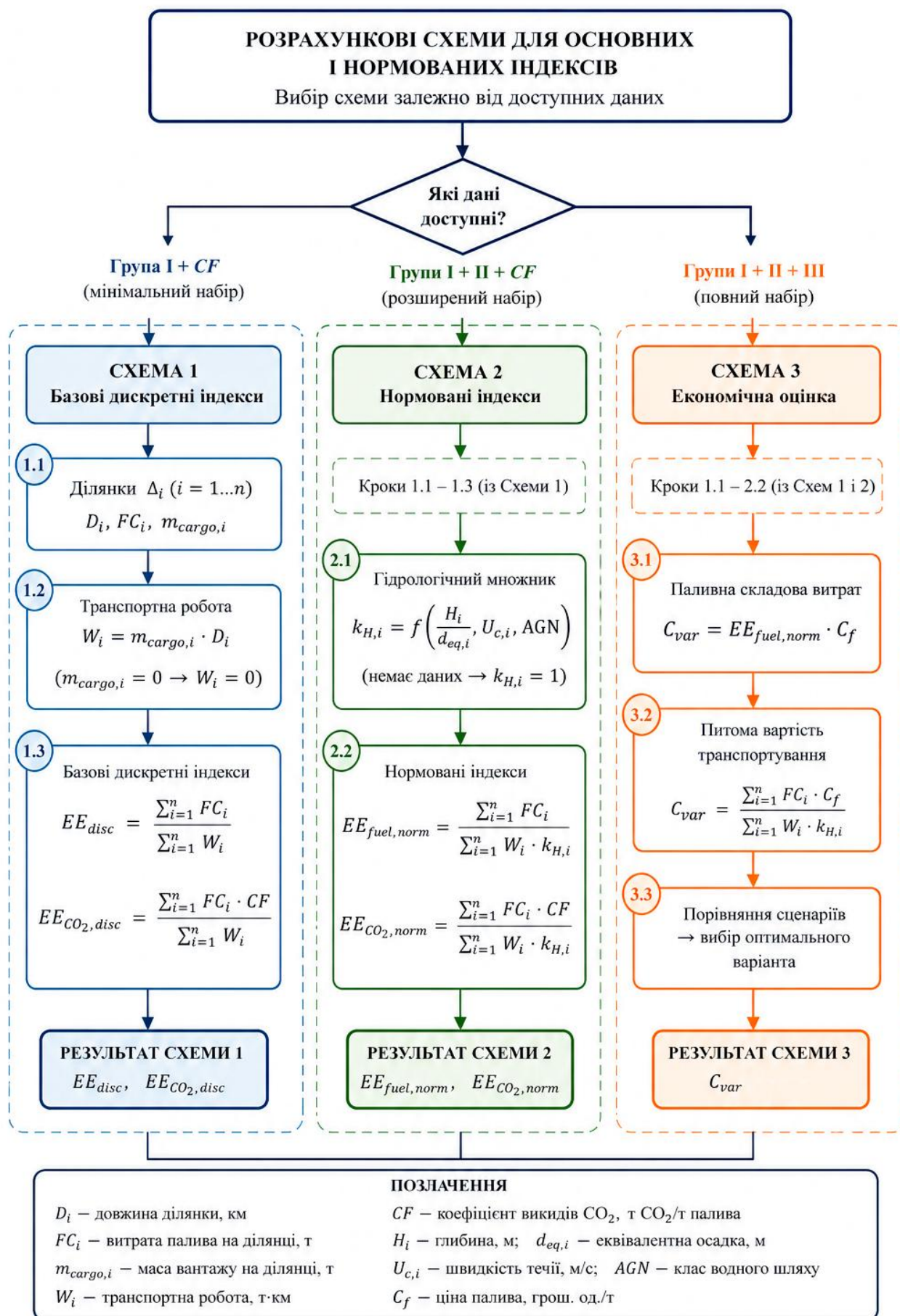


Рисунок 4.2 – Розгалужений алгоритм вибору та реалізації розрахункових схем

Схема 1. Базові дискретні індекси (мінімальний набір даних: Група I + CF).

Крок 1.1. Поділ рейсу на n ділянок Δ_i за критеріями п. 4.2.2. Для кожної ділянки фіксуються: довжина D_i , витрата палива FC_i , маса вантажу $m_{\text{cargo},i}$.

Крок 1.2. Розрахунок $W_i = m_{\text{cargo},i} \cdot D_i$ виконується для кожної ділянки за формулою (3.16). При підсумовуванні по всіх n ділянках, формули (3.17), (3.18), враховуються всі ділянки, навіть з $W_i = 0$ – їхній внесок у знаменник нульовий, але вони беруть участь у нумерації для коректного підрахунку транспортної роботи рейсу.

Крок 1.3. Розрахунок базових дискретних індексів EE_{disc} , $EE_{CO_2,\text{disc}}$ виконується за формулами (3.17) та (3.18) відповідно.

Результат Схеми 1 придатний для оцінки та моніторингу рейсів в межах одного маршруту за незмінних умов. Порівняння рейсів за різних гідрологічних умов на підставі цих індексів може давати хибні результати через відсутність нормування.

Схема 2. Нормовані індекси (розширений набір даних: Групи I + II + CF).
Схема 2 включає всі кроки Схеми 1 та доповнюється двома кроками.

Крок 2.1. Визначення гідрологічного множника $k_{H,i}$ для кожної ділянки. На основі відношення $H_i/d_{\text{eq},i}$, швидкості течії $U_{c,i}$ та класу водного шляху за AGN визначається $k_{H,i}$ відповідно до моделі, обґрунтованої в розділі 3. За відсутності гідрологічних даних приймається $k_{H,i} = 1$.

Крок 2.2. Розрахунок нормованих індексів $EE_{\text{fuel,norm}}$ та $EE_{CO_2,\text{norm}}$ виконується за формулами (3.19) та (3.20). Знаменник $\sum W_i \cdot k_{H,i}$ інтерпретується як транспортна робота, приведена до референтних гідрологічних умов. Нормовані індекси є коректними для порівняння рейсів за різних рівнів води та різних ділянок маршруту.

Схема 3. Економічна оцінка (повний набір даних: Групи I + II + III).
Схема 3 включає всі кроки Схем 1 і 2 та доповнюється розрахунком економічних показників.

Крок 3.1. Визначення паливної складової питомих змінних витрат C_{var} за формулою (3.23).

Крок 3.2. Порівняння сценаріїв. На основі отриманих значень C_{var} виконується зіставлення альтернативних варіантів рейсу (різна конфігурація каравану, різний маршрут, різний режим руху) з метою вибору економічно оптимального сценарію.

Наведені три схеми реалізують принцип поступового нарощування складності розрахунку залежно від доступності даних. Графічне подання всіх трьох схем у вигляді розгалуженого алгоритму наведено на рис. 4.2.

4.2.4 Правила врахування особливих випадків

Наведені нижче правила регламентують застосування розрахункових схем п. 4.2.3 у ситуаціях, що відхиляються від еталонного рейсу з повним і незмінним складом каравану. Дотримання цих правил забезпечує коректність розрахунку індексів енергоефективності в реальних умовах експлуатації.

Правило 1. Ділянки з нульовим або нескоригованим завантаженням. До знаменника формул (3.17)–(3.20) включається лише та транспортна робота, яка відповідає корисному просуванню вантажу у напрямку рейсу. Цей принцип визначає два підвипадки.

1а. Ділянки з нульовим завантаженням ($m_{cargo,i} = 0$).

Ділянки рейсу, на яких вантаж відсутній (подача порожніх барж під завантаження, повернення після вивантаження тощо), включаються до чисельника розрахункових формул (3.17)–(3.20) шляхом врахування витрати палива, оскільки витрата палива на цих ділянках є реальною складовою загальних витрат рейсу. У знаменнику такі ділянки не додають транспортної роботи, оскільки транспортна робота під час проходження ділянки з нульовою масою вантажу ($m_{cargo,i} = 0$) дорівнює нулю: $W_i = m_{cargo,i} \cdot D_i = 0$.

1б. Ділянки зворотного ходу при човниковій проводці.

Якщо самохідне вантажне судно здійснює кілька зворотних ходів при поетапному проведенні барж через мілководну ділянку, ділянки зворотного ходу включаються до чисельника у частині витрати палива FC_i , але не включаються

до знаменника, оскільки переміщення власного вантажу у напрямку, протилежному до рейсу, не є корисною транспортною роботою в межах даного рейсу. Критерій віднесення ділянки до зворотного ходу – від’ємний знак проекції переміщення на вісь маршруту рейсу.

Правило 2. Проводки та шлюзування.

Проводка каравану буксиром або допоміжним судном, а також проходження шлюзу виділяються в окремі ділянки Δ_i з відповідним режимом $mode_i$ (маневровий або шлюзування). Для кожної такої ділянки фіксується фактична витрата палива FC_i штовхача (та/або допоміжних двигунів) за час операції. Довжина ділянки D_i відповідає фактичній відстані переміщення каравану в межах операції; для шлюзу це може бути умовна довжина камери або нульова відстань – у такому разі ділянка обробляється за підвипадком 1а Правил 1.

Правило 3. Неповні або відсутні гідрологічні дані.

За відсутності виміряних значень глибини H_i або швидкості течії $U_{c,i}$ для розрахунку гідрологічного множника $k_{H,i}$ використовується одна з двох альтернатив:

- розрахункова оцінка $k_{H,i}$ на основі моделі опору (п. 3.2.3) за відомими або нормативними характеристиками водного шляху (клас AGN , типові глибини для відповідного сезону та гідрологічного року) або з використанням побудованої автором довідкової таблиці рекомендованих значень k_H , наведеної у Додатку Є – рекомендована за наявності хоча б узагальнених гідрологічних характеристик ділянки;

- консервативна оцінка $k_{H,i} = 1$ – застосовується за повної відсутності будь-яких гідрологічних даних; у цьому випадку нормовані індекси (3.19)–(3.20) чисельно збігаються з базовими дискретними (3.17)–(3.18), тобто фактично виконується розрахунок за Схемою 1.

У звіті або базі даних рейсів обов’язково зазначається, яка з альтернатив була застосована для кожної ділянки.

Правило 4. Порожній перехід штовхача без барж ($N = 0$).

Якщо штовхач здійснює перехід без барж, рейс є виродженим: $m_{\text{cargo},i} = 0$ на всіх ділянках, знаменник формул (3.17)–(3.20) дорівнює нулю, і розрахунок індексів енергоефективності не виконується.

У цьому випадку рейс характеризується лише витратною характеристикою переходу $FC_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n FC_i$ (т або кг), яка може використовуватися для нормування витрат на перегін і планування логістики, але не є показником транспортної ефективності у розумінні запропонованого способу.

Такі рейси виключаються з вибірки при формуванні порівняльних орієнтирів (бенчмарків) – еталонних значень індексів EE_{disc} та $EE_{\text{fuel,norm}}$, що характеризують типовий рівень енергоефективності для суден і маршрутів певного класу. Включення порожніх переходів до такої вибірки призвело б до систематичного заниження знаменника і спотворення еталонних значень.

Правило 5. Самохідне вантажне судно при поетапній проводці складу.

Якщо самохідне вантажне судно здійснює кілька проходів ділянки при поетапному проведенні барж, власний вантаж у трюмі враховується у знаменнику формул (3.17)–(3.20) лише один раз – для першого проходу ділянки у напрямку рейсу. На всіх наступних проходах тієї самої ділянки (як у прямому, так і у зворотному напрямку) власний вантаж прирівнюється до нуля: $m_{\text{cargo.власний}} = 0$. Витрата палива FC_i включається до чисельника на всіх ділянках без винятку.

Примітка. Еквівалентний результат досягається, якщо власний вантаж враховується на кожній ділянці зі знаком відповідно до напрямку руху («+» при русі у напрямку рейсу, «-» при зворотному ході) – алгебраїчна сума переміщень збігається з підсумком за основним варіантом. Але такий варіант обчислення за правилом 5 є складнішим, має ризик помилки у визначенні знаку, додатково ускладнює аудит обчислень (підсумовування з різними знаками перевірити важче).

Сукупність п'яти правил забезпечує однозначну інтерпретацію вхідних даних у нестандартних експлуатаційних ситуаціях і виключає можливість некоректного застосування розрахункових схем через неповноту або специфіку

рейсових даних. Зазначена у Правилі 3 довідкова таблиця рекомендованих значень $k_{H,i}$ (Додаток Є) є оригінальним авторським результатом дисертаційного дослідження: вона побудована шляхом статистичної обробки 16-річної бази гідрологічних спостережень (2005–2020 рр.) [17] по 30 водомірних постах Дунаю відповідно до НСРР / ВСР і містить рекомендовані значення $k_{H,i}$ у розрізі ділянок Дунаю та діапазонів $\frac{H_i}{d_{eq,i}}$.

4.2.5 Критерії та шкала оцінювання результатів

Запропонований спосіб дає змогу розраховувати для кожного рейсу декілька індексів енергоефективності (базові й нормовані), проте для практичного використання самих числових значень недостатньо. Потрібно визначити, за якими значеннями індексів рейс може вважатися ефективним, прийнятним чи неефективним, а також як коректно порівнювати між собою рейси різних типів і сценаріїв. У цьому підпункті сформульовано критерії, шкалу оцінювання та підхід до побудови бенчмарків.

Для оцінювання ефективності одного окремого рейсу використовується відносна оцінка нормованого індексу паливної енергоефективності рейсу $EE_{\text{fuel,norm}}^{(r)}$ відносно еталонного значення $EE_{\text{fuel,norm}}^{\text{bench}}$, побудованого для відповідного типу рейсу та конфігурації каравану:

$$\eta^{(r)} = \frac{EE_{\text{fuel,norm}}^{(r)}}{EE_{\text{fuel,norm}}^{\text{bench}}}. \quad (4.1)$$

Значення $\eta^{(r)}$ інтерпретується за такою шкалою:

- $\eta^{(r)} \leq 0,9$ – висока ефективність: рейс кращий за еталонний рівень, доцільно розглядати як «кращу практику» для відповідної групи умов;
- $0,9 < \eta^{(r)} \leq 1,1$ – прийнятна (нормальна) ефективність: рейс перебуває в типовому діапазоні для суден даного класу, маршруту та конфігурації каравану;
- $1,1 < \eta^{(r)} \leq 1,3$ – задовільна ефективність з резервами: потрібний додатковий аналіз режимів руху, конфігурації каравану та гідрологічних умов для виявлення потенціалу покращення;

– $\eta^{(r)} > 1,3$ – неефективний рейс: індекс суттєво гірший за еталонний рівень, рекомендується аналіз причин (несприятлива гідрологія, перевищення швидкості, нераціональна конфігурація каравану, технічний стан ГЕУ) та розробка коригувальних заходів.

Наведені межові значення коефіцієнта $\eta^{(r)}$ є попередніми і ґрунтуються на результатах апробації, наведених у п. 4.4.5. У міру накопичення репрезентативної бази рейсових даних для конкретного флоту та маршрутів вони можуть бути уточнені.

Аналогічна шкала може застосовуватися для вуглецевого індексу $EE_{CO_2, \text{norm}}$, оскільки він пропорційний $EE_{\text{fuel, norm}}$ через конверсійний фактор CF .

Для порівняння двох рейсів A і B використовується різниця та відносна зміна нормованого індексу:

$$\Delta EE_{\text{fuel, norm}} = EE_{\text{fuel, norm}}^{(B)} - EE_{\text{fuel, norm}}^{(A)}, \quad (4.2)$$

$$\delta EE_{\text{fuel, norm}} = \frac{EE_{\text{fuel, norm}}^{(B)} - EE_{\text{fuel, norm}}^{(A)}}{EE_{\text{fuel, norm}}^{(A)}} \cdot 100 \%. \quad (4.3)$$

При цьому:

- якщо $|\delta EE_{\text{fuel, norm}}| \leq 5 \%$, різниця вважається несуттєвою з урахуванням природної варіабельності режимів плавання та похибок вимірювань;
- $5 \% < |\delta EE_{\text{fuel, norm}}| \leq 15 \%$ – помірна відмінність, яка потребує аналізу умов рейсу (різні гідрологічні роки, завантаження, конфігурація каравану);
- $|\delta EE_{\text{fuel, norm}}| > 15 \%$ – суттєва відмінність, що, як правило, свідчить про зміну конфігурації каравану, режимів руху або технічного стану ГЕУ й може бути підставою для управлінських рішень (коригування швидкісної політики, складу каравану, графіка ремонту тощо).

Порогові значення 5 % та 15 % обрані як інженерно обґрунтовані орієнтири, що відповідають типовому рівню варіабельності індексу за результатами апробації. За наявності розширеної статистики для конкретного судна або парку суден ці пороги можуть бути скориговані відповідно до фактичної дисперсії показників.

Для оцінювання економічної доцільності альтернативних сценаріїв (зміна конфігурації каравану, швидкісних режимів, варіантів модернізації) використовується показник C_{var} , визначений у п. 4.2.3. Сценарій з меншим значенням C_{var} вважається економічно кращим за інших за умови дотримання заданих експлуатаційних обмежень (час рейсу, пропускна спроможність, навігаційні обмеження).

Бенчмарки формуються на основі вибірки рейсів, для яких доступні повні дані Груп I–II (а для економічної оцінки – також Групи III). Для кожного типу рейсу (маршрут, клас водного шляху за *AGN*, конфігурація каравану, діапазон завантаження) визначаються:

- медіанні значення індексів EE_{disc} , $EE_{fuel,norm}$, $EE_{CO_2,norm}$;
- квантілі 0,05, 0,50, 0,95, які задають типові та граничні рівні ефективності для відповідної групи умов.

На практиці як еталонне значення $EE_{fuel,norm}^{bench}$ доцільно використовувати медіану (0,50-квантиль) для групи рейсів із близькими характеристиками (маршрут, клас водного шляху, тип і потужність штовхача, конфігурація каравану). Квантілі 0,05 та 0,95 можуть застосовуватися як орієнтири «кращої практики» та верхньої допустимої межі відповідно: рейси з $\eta^{(r)} < EE_{0,05}/EE_{bench}$ відповідають рівню найкращих 5 % спостережень, а рейси з $\eta^{(r)} > EE_{0,95}/EE_{bench}$ потребують детального аналізу причин.

Приклад побудови таких бенчмарків для дунайського маршруту, а також числові значення для окремих конфігурацій каравану наведено в п. 4.4.5. Зі зростанням обсягу доступних даних відповідні еталонні значення можуть періодично переглядатися, відображаючи фактичний прогрес у підвищенні енергоефективності флоту.

4.3 Алгоритми обґрунтування експлуатаційних рішень

У цьому підрозділі поєднано алгоритми обґрунтування експлуатаційних рішень з їх випробуванням на реальних рейсах. Спочатку формулюються алгоритми/правила вибору швидкості, конфігурації каравану, режимів роботи

ГЕУ та структури часу рейсу на основі запропонованих індексів (наприклад, мінімізація нормованого EE за обмежень по часу рейсу). Далі показується, як ці алгоритми працюють на даних конкретних рейсів: порівнення сценаріїв, демонстрація виграшу у енергоефективності, формулювання на цій основі перших практичних рекомендацій.

4.3.1 Мета та місце алгоритмів у запропонованому способі

Запропонований у розділах 3–4 спосіб оцінювання енергоефективності рейсів самохідних суден з караваном формує систему індексів EE_{disc} , $EE_{fuel,norm}$, $EE_{CO_2,norm}$ та критеріїв їх інтерпретації (п. 4.2.5). Проте числові значення індексів самі по собі не є рішенням – вони є діагностичним сигналом, який потребує інтерпретації та перетворення на конкретні дії судновласника або судноводія. Цю функцію виконують алгоритми обґрунтування експлуатаційних рішень, що розглядаються у цьому підпункті.

Під експлуатаційним рішенням у контексті даного способу розуміється будь-яке свідоме управлінське або технічне рішення, що безпосередньо впливає на значення індексів ефективності майбутніх рейсів: вибір швидкісного профілю за ділянками, вибір конфігурації та завантаження каравану, перехід у економічний режим руху на критичних мілководних ділянках, а також призначення строків або обсягів технічного обслуговування головного двигуна.

Алгоритми реалізуються у двох режимах, що відповідають двом різним горизонтам планування.

Ретроспективний режим (після рейсу): аналіз завершеного рейсу або серії рейсів з метою виявлення неефективних ділянок і режимів, декомпозиції причин відхилень від бенчмарку та формування рекомендацій для корекції політики експлуатації на майбутні рейси. Вхідні дані – фактичні записи рейсу, результати діагностики ГД, гідрологічні дані за фактичний період. Цьому режиму відповідає алгоритм ретроспективного аналізу, описаний у п. 4.3.4.

Перспективний режим (до або під час рейсу): підтримка рішень при плануванні рейсу або оперативне коригування плану в ході рейсу з урахуванням прогнозу гідрологічних умов (п. 3.5) та поточного стану ГД. Вхідні дані –

прогнозні значення глибин і течій, нормативні або фактичні характеристики двигуна і каравану. Цьому режиму відповідають алгоритми підтримки рішень при плануванні (п. 4.3.5) і оперативної корекції (п. 4.3.6.)

Обидва режими використовують спільну інформаційну базу, що включає чотири групи даних (детально – п. 4.3.2), і спираються на розрахункові схеми п. 4.2.3 та шкалу оцінювання п. 4.2.5. Зв'язок між складовими запропонованого способу і алгоритмами схематично відображено на структурній схемі (рис. 4.3.)

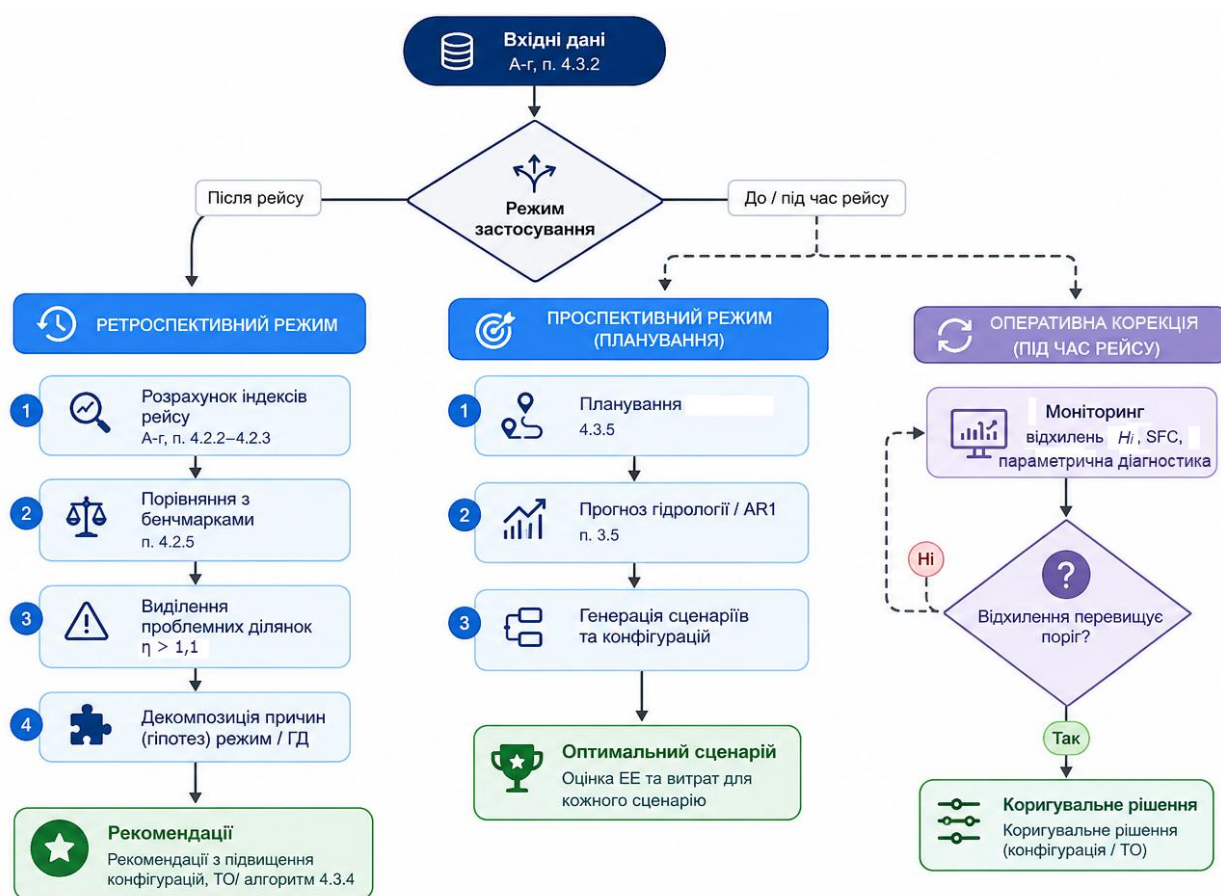


Рисунок 4.3 – Структура алгоритмів обґрунтування експлуатаційних рішень

На рис. 4.3 виділено три функціональні блоки. Ретроспективний режим (ліворуч) реалізується алгоритмом 4.3.4 і охоплює чотири послідовні кроки: розрахунок індексів рейсу за групами даних А–Г (пп. 4.2.2–4.2.3), порівняння з бенчмарками (п. 4.2.5), виділення проблемних ділянок за критерієм $\eta > 1,1$ (категорія «задовільна з резервами» або гірше за шкалою п. 4.2.5), декомпозицію причин відхилень (гідрологія / режим / технічний стан ГД) – з формуванням рекомендацій з підвищення ефективності. Проспективний режим планування (в

центрі) реалізується алгоритмом 4.3.5 і включає прогноз гідрологічних умов за моделлю $AR(1)$ (п. 3.5), генерацію кандидатних сценаріїв (швидкість $\times$ конфігурація каравану) та вибір оптимального сценарію за критерієм мінімуму $EE_{\text{fuel, norm}}$ і витрат C_{var} . *Rolling*-корекція (праворуч) реалізується алгоритмом 4.3.6 і передбачає неперервний моніторинг відхилень параметрів H_i , SFC та сигналів системи моніторингу з формуванням коригувального рішення (конфігурація каравану / обмеження потужності / позачергове ТО) при перевищенні встановлених порогів.

4.3.2 Вихідні дані та індикатори для прийняття рішень

Коректне функціонування алгоритмів п. 4.3.4–4.3.6 потребує структурованої інформаційної бази, що охоплює всі чинники, які визначають енергетичну ефективність рейсу. Відповідно до моделі рейсу (п. 3.1) та розрахункових схем (п. 4.2.3), вихідні дані розподіляються на чотири групи.

Група А. Розраховані індекси енергоефективності та похідні показники. Для кожного рейсу і кожної ділянки $i = 1, \dots, n$ визначаються: дискретний індекс EE_{disc} та вуглецевий індекс $EE_{CO_2, \text{disc}}$, формули (3.17), (3.18), нормований індекс $EE_{\text{fuel, norm}}$ і нормований вуглецевий індекс $EE_{CO_2, \text{norm}}$, формули (3.19), (3.20), відносне відхилення δEE від бенчмарку, а також коефіцієнт $\eta^{(r)}$ (4.1) з п. 4.2.5. Перераховані показники є безпосередніми вхідними сигналами для кроків 2–3 алгоритму 4.3.4 та для оцінювання сценаріїв в алгоритмах 4.3.5–4.3.6.

Група Б. Гідрологічні та навігаційні параметри. Для кожної ділянки маршруту визначаються: глибина H_i та еквівалентна осадка $d_{\text{eq}, i}$, швидкість течії $U_{c, i}$, клас водного шляху за AGN , а також коефіцієнт гідрологічного обмеження $k_{H, i}$. У ретроспективному режимі ці параметри беруться з бортових записів або баз даних адміністрацій водних шляхів (*viadonau*, *AFDJ*, *ARN* тощо) та оперативних *RIS*-даних. У проспективному режимі використовується прогноз рівнів води на горизонт 6–8 діб, побудований на основі моделі $AR(1)$ з п. 3.5, або оперативні *RIS*-дані.

Група В. Параметри технічного стану головного двигуна. Ця група включає: фактичне значення питомої витрати палива SFC_{fact} та його відхилення від еталонного SFC_{ref} (з характеристики ГД п. 3.3.3), індикаторні параметри (тиск впорску, максимальний тиск згоряння p_z , температура відпрацьованих газів по циліндрах) – за результатами штатного моніторингу або діагностики портативними засобами, а також індикатор балансу циліндрів і рівень вібрації ГД. Відхилення $SFC_{\text{fact}}/SFC_{\text{ref}} > 1,10$ є порогом, що запускає гілку «технічна причина» у кроці 4 алгоритму 4.3.4 та тригером коригувального рішення в алгоритмі 4.3.6.

Група Г. Економічні параметри. Для розрахунку показника C_{var} (п. 4.2.3, схема 3) необхідні: питома ціна палива C_f (грн/т або USD/т на дату рейсу), фрахтова ставка або питома транспортне тарифне навантаження C_T (грн/(т·км)), а також вартість простою каравану в очікуванні шлюзування або за перевищення нормативного часу рейсу – якщо таке обмеження є актуальним для конкретного маршруту. При оцінюванні кандидатних сценаріїв в алгоритмі 4.3.5 параметри групи Г використовуються для вибору між конкуруючими сценаріями з близькими значеннями $EE_{\text{fuel,norm}}$.

Зведена характеристика груп вихідних даних, джерел їх отримання та відповідних алгоритмів наведена в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Групи вихідних даних для алгоритмів, описаних у пп. 4.3.4–4.3.6

Група	Склад	Джерело даних	Алгоритм описано у підпунктах
А – Індекси EE	$EE_{\text{disc}}, EE_{\text{fuel,norm}}, \eta^{(r)}, \delta EE$	Розрахунок за п. 4.2	4.3.4, 4.3.5, 4.3.6
Б – Гідрологія	$H_i, U_{c,i}, k_{H,i}$, клас AGN	$viadonau, RIS, AR(1)$	4.3.4, 4.3.5, 4.3.6
В – Стан ГД	SFC, p_z , параметрична діагностика, вібрація	Бортовий моніторинг	4.3.4, 4.3.6
Г – Економіка	C_f, C_T , вартість простою	Договірні / ринкові	4.3.5

4.3.3 Класифікація типових експлуатаційних рішень

Алгоритми, описані у п. 4.3.4–4.3.6 орієнтовані на підтримку чотирьох класів експлуатаційних рішень, які охоплюють основні важелі управління енергоефективністю рейсів самохідних суден з караваном. Кожен клас рішень характеризується власним набором індикаторів (група даних, що ініціює рішення), критерієм вибору та типовим горизонтом реалізації. При цьому класи не є взаємовиключними – на одному рейсі можуть бути рекомендації відразу декількох класів.

Клас 1. Вибір швидкісного профілю за ділянками маршруту. Швидкість є основним операційним важелем, що безпосередньо визначає як потужність ГД (через кубічну залежність опору від швидкості), так і тривалість рейсу. На мілководних ділянках (клас AGN IV–Va, $H/d_{eq} < 2,0$) вплив швидкості на $EE_{fuel, norm}$ суттєво посилюється через зростання мілководного опору $R_{shallow}$. Рішення про зниження швидкості на таких ділянках (перехід у режим eco-speed) ініціюється за умови $\eta^{(r)} > 1,1$ або $Fr_h > 0,6$ і оцінюється через порівняння розрахункових значень $EE_{fuel, norm}$ для альтернативних швидкостей при незмінній конфігурації каравану.

Клас 2. Вибір конфігурації та завантаження каравану. Конфігурація каравану (*shape*: кількість барж у поздовжньому та поперечному рядах) визначає сумарну вантажопідйомність, опір і питомий індекс ефективності. При незмінному вантажопотоці вибір між схемами, наприклад 3×2 та 2×2 , впливає на EE_{disc} через зміну добутку $m_{cargo, i} \cdot D_i$ у знаменнику. Рішення щодо конфігурації ухвалюється на етапі планування рейсу (алгоритм 4.3.5) і оцінюється через C_{var} при кількох альтернативних схемах із урахуванням навігаційних обмежень по осадці та ширині шляху на конкретних ділянках.

Клас 3. Перехід у режим економного ходу. Цей клас є окремим випадком рішення класу 1, виділеним через специфічний тригер: рішення приймається не лише за критерієм ефективності, але й за сигналом прогнозу гідрологічних умов або фактичного моніторингу глибин. При прогнозованому або фактичному

зниженні глибини нижче за критичний рівень ($H_i/d_{eq,i} < 1,5$) алгоритм 4.3.6 автоматично формує рекомендацію щодо зниження частоти обертання ГД до рівня, що відповідає $Fr_h \leq 0,55$, навіть якщо загальний індекс $\eta^{(r)}$ рейсу ще не перевищив поріг 1,1.

Клас 4. Рішення щодо технічного обслуговування та корекції режиму ГД. Цей клас рішень ініціюється виключно параметрами групи В (п. 4.3.2) і є єдиним класом, єдиним класом, що безпосередньо ініціюється технічним станом і викликає технічне втручання на судні (інші класи призводять до експлуатаційних рішень – швидкість, конфігурація). Критерієм є систематичне перевищення фактичного SFC еталонного значення ($SFC_{fact}/SFC_{ref} > 1,1$ протягом двох і більше рейсів підряд) при незмінних або незначно змінених гідрологічних умовах, що вказує на деградацію паливної апаратури, ГТН або механічного ступеня ГД. Рішення може включати: позачергове регулювання ТНВД, перевірку і очищення ГТН, або обмеження навантаження ГД до планового ТО.

На відміну від класів 1, 3 і 4, які мають однозначні кількісні критерії активації за результатами оцінки одного рейсу, Клас 2 за своєю природою є стратегічним: рішення про конфігурацію та політику завантаження каравану не може бути обґрунтоване даними одного рейсу, бо потребує порівняльного аналізу енергоефективності різних конфігурацій за історією експлуатації флоту. Тому Клас 2 активується через експертний аналіз накопичених даних, що включає такі формалізовані кроки:

- накопичення в журналі рейсів вибірки оцінок рейсів з різними конфігураціями каравану (не менше 2–3 рейсів кожної конфігурації);
- відносне порівняння нормованої енергоефективності $EE_{fuel,norm}$ пар «рейс з конфігурацією А – рейс з конфігурацією В» за критерієм δ з [підпункту 4.2.5](#); при $|\delta| > 15 \%$ різниця вважається суттєвою;
- інтерпретація суттєвої різниці у контексті інших факторів (ділянка Дунаю, сезон, ступінь завантаження), що дозволяє оцінити, чи зумовлена різниця саме конфігурацією каравану, чи іншими обставинами;

– формування управлінської рекомендації для оператора флоту – корекція політики формування каравану, перегляд складу барж, реорганізація рейсів за ділянками Дунаю.

Зв'язок між класами рішень, індикаторами-тригерами та відповідними алгоритмами узагальнено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Класифікація типових експлуатаційних рішень

Клас	Рішення	Показник	Горизонт	Алгоритм
1	Швидкісний профіль	$\eta^{(r)} > 1,1;$ $Fr_h > 0,6$	Планування / рейс	4.3.4, 4.3.5, 4.3.6
2	Конфігурація каравану	EE_{disc}, C_{var}	Планування	4.3.4, 4.3.5
3	Економічна швидкість	$H_i/d_{eq} < 1,5;$ $Fr_h > 0,55$	Рейс (оперативно)	4.3.6
4	ТО / корекція режиму ГД	$\frac{SFC_{fact}}{SFC_{ref}} > 1,10$ протягом 2+ рейсів при незмінних умовах	Міжрейсовий	4.3.4, 4.3.6

Узагальнені блок-схеми алгоритмів, що відповідають класам рішень 1–4, наведені у [Додатку Ж](#) (рис. Ж.1–Ж.3).

4.3.4 Алгоритм ретроспективного аналізу та корекції політики експлуатації

Алгоритм реалізує ретроспективний режим роботи запропонованого способу (п. 4.3.1) і призначений для аналізу завершеного рейсу або серії рейсів одного судна на одному напрямку з метою виявлення резервів енергоефективності, декомпозиції причин відхилень від бенчмарку та формування обґрунтованих рекомендацій щодо корекції політики експлуатації. Вхідними даними є повний набір груп А–Г (п. 4.3.2) для кожної ділянки $i = 1, \dots, n$ маршруту; розрахункові процедури відповідають схемам п. 4.2.3, критерії оцінювання – шкалі п. 4.2.5. Блок-схема алгоритму представлена на рис. 4.4.

Крок 1. Формування вибірки та розрахунок індексів. Для кожного рейсу вибірки та кожної ділянки i розраховуються: дискретний індекс EE_{disc} і вуглецевий індекс $EE_{CO_2, disc}$ за формулами (3.17)–(3.18); нормований індекс

$EE_{\text{fuel, norm}}$ і нормований вуглецевий індекс $EE_{CO_2, \text{ norm}}$ за формулами (3.19)–(3.20); відносне відхилення δEE від бенчмарку та зведений коефіцієнт $\eta^{(r)}$ рейсу за формулою (4.1). Результати зводяться в таблицю ділянок із усіма індексами – ця таблиця є вхідним масивом для кроків 2–4. За наявності серії рейсів розрахунки виконуються для кожного рейсу окремо, після чого масиви об’єднуються для кроку 5.

Крок 2. Порівняння з бенчмарками та виділення проблемних ділянок. Зведений коефіцієнт $\eta^{(r)}$ порівнюється з пороговими рівнями шкали п. 4.2.5. При $\eta^{(r)} > 1,1$ рейс кваліфікується як такий, що потребує аналізу причин і корегувальних дій. Додатково для кожної ділянки перевіряється умова $\delta EE_i > 0$: ділянки з позитивним відхиленням від бенчмарку утворюють перелік «проблемних» з фіксацією абсолютної та відносної величини відхилення. Ділянки з $Fr_{h,i} > 0,6$ або $H_i/d_{\text{eq},i} < 1,5$ виокремлюються додатково як потенційно критичні за гідрологічним фактором незалежно від значення δEE_i .

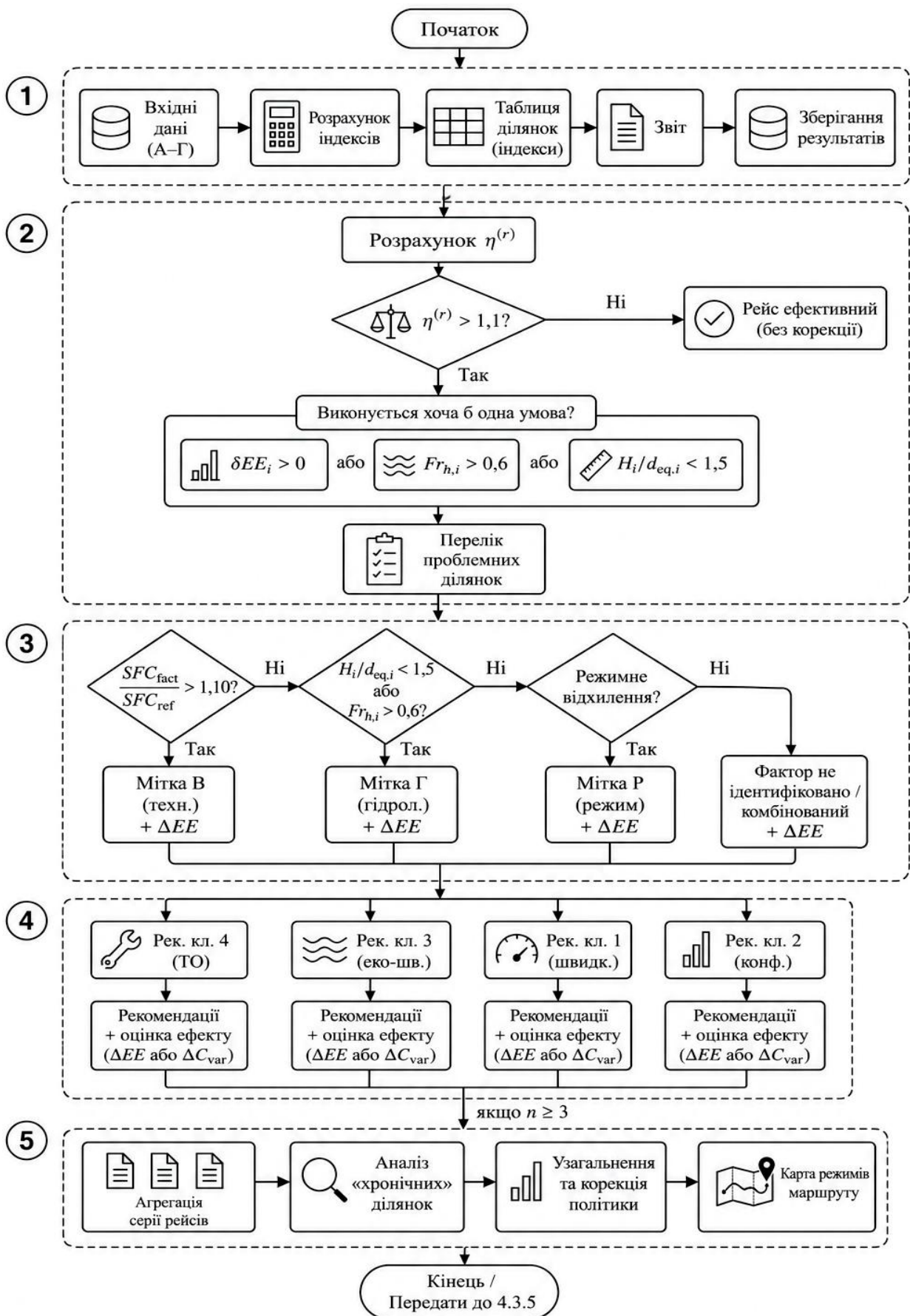


Рисунок 4.4 – Блок-схема алгоритму ретроспективного аналізу

Крок 3. Декомпозиція причин відхилень. Для кожної проблемної ділянки встановлюється домінуюча причина відхилення за такою ієрархією.

– *Технічний фактор (B)* – якщо $SFC_{\text{fact}}/SFC_{\text{ref}} > 1,10$ (п. 4.3.2, група B) спостерігається на більшості ділянок при незмінних або незначно змінених гідрологічних умовах. Ця умова перевіряється першою, оскільки її хибне ігнорування призводить до некоректної інтерпретації режимних і гідрологічних відхилень.

– *Гідрологічний фактор (B)* – якщо $H_i/d_{\text{eq},i} < 1,5$ або $Fr_{h,i} > 0,6$, а $SFC_{\text{fact}}/SFC_{\text{ref}} \leq 1,10$. Перевищення нормованого індексу пояснюється зростанням мілководного опору R_{shallow} або несприятливим вектором течії.

– *Режимний фактор (A)* – якщо жодна з попередніх умов не виконується, але швидкість на ділянці перевищує економічно обґрунтований рівень, або конфігурація каравану призводить до субоптимального EE_{disc} при наявних обмеженнях водного шляху.

– *Комбінований фактор (A+B, A+B)* – якщо одночасно зафіксовано ознаки двох і більше факторів; у такому разі кожен із них фіксується окремо з оцінкою відносного внеску.

Результатом кроку 3 є «мітка причини» для кожної проблемної ділянки та кількісна оцінка ΔEE – розрахований або оцінений потенціал зниження $EE_{\text{fuel, norm}}$ при усуненні ідентифікованої причини.

Крок 4. Формування рекомендацій за класами рішень.

На підставі міток кроку 3 формуються рекомендації відповідно до класифікації п. 4.3.3:

- технічний фактор $\rightarrow$ рекомендації класу 4: наприклад, позачергове регулювання ТНВД, перевірка і очищення ГТН, або обмеження навантаження ГД до планового ТО;

- гідрологічний фактор $\rightarrow$ рекомендації класу 3: зниження частоти обертання ГД на відповідних ділянках до рівня $Fr_h \leq 0,55$ при прогнозованому збереженні низьких глибин;

- режимний фактор, пов'язаний зі швидкісним профілем → рекомендації класу 1: перегляд швидкості на проблемних ділянках із розрахунком нового $EE_{\text{fuel, norm}}$ за альтернативними сценаріями (п. 4.3.5);

- режимний фактор, пов'язаний з конфігурацією каравану → рекомендації класу 2: аналіз альтернативних схем « $length \times width$ » із урахуванням навігаційних обмежень на відповідних ділянках і порівнянням C_{var} та EE_{disc} для кожної схеми.

Кожна рекомендація формулюється з прив'язкою до конкретної ділянки (або групи ділянок) маршруту та супроводжується розрахунковою оцінкою очікуваного ефекту ΔEE або ΔC_{var} .

Крок 5. Узагальнення для серії рейсів і корекція політики експлуатації (виконується при $n_{\text{рейсів}} \geq 3$). При аналізі серії рейсів результати кроків 2–4 підсумовуються у розрізі ділянок маршруту з метою виявлення «хронічних» вузьких місць – тобто ділянок, що систематично потрапляють до категорії проблемних незалежно від конкретного рейсу. Якщо одна і та сама ділянка отримує мітку «гідрологічний фактор» у 50 % рейсах вибірки та більше, це є підставою для внесення структурної зміни до швидкісного профілю за маршрутом у вигляді постійного обмеження швидкості на цій ділянці. Систематичне перевищення $SFC_{\text{fact}}/SFC_{\text{ref}} > 1,10$ протягом двох і більше рейсів підряд при стабільних гідрологічних умовах є підставою для ініціювання позачергового технічного обслуговування (клас 4). Підсумком кроку 5 є скоригована «карта режимів» маршруту – розподіл рекомендованих швидкостей і конфігурацій каравану за ділянками, що може безпосередньо використовуватися як вхідні дані для алгоритму перспективного планування (п. 4.3.5).

Отримані за алгоритмом ретроспективного аналізу (п. 4.3.4) діагностичні висновки та рекомендації слугують вхідними даними для проспективних алгоритмів – планування рейсу (п. 4.3.5) та оперативної корекції в ході рейсу (п. 4.3.6), – забезпечуючи тим самим замкнутий контур управління енергоефективністю руху самохідних суден з караванами.

Схематичне подання алгоритму ретроспективного аналізу та корекції політики експлуатації наведено на рис. Ж.1 [Додатку Ж](#).

4.3.5 Алгоритм підтримки рішень при плануванні рейсу

Алгоритм реалізує проспективний режим (п. 4.3.1) і призначений для підтримки рішень на етапі підготовки рейсу: вибору оптимального швидкісного профілю за ділянками та конфігурації каравану на основі прогнозних гідрологічних умов, поточного стану ГД і економічних параметрів рейсу. Вхідними даними є прогнозні значення груп Б–Г (п. 4.3.2); група А формується не на основі фактичних даних, а розрахунково – для кандидатних сценаріїв. Якщо алгоритм 4.3.4 вже виконувався для попередніх рейсів на цьому маршруті, скоригована «карта режимів» (крок 5 алгоритму ретроспективного аналізу, п. 4.3.4) використовується як вхідний пріоритетний орієнтир. Блок-схема алгоритму проспективного аналізу підтримки рішень при плануванні рейсу наведено на рис. 4.5.

Крок 1. Прогноз гідрологічних умов. Для кожної ділянки $i = 1, \dots, n$ маршруту формується прогноз глибини $\hat{H}_i$ та швидкості течії $\hat{U}_{c,i}$ на розрахунковий горизонт рейсу (6–8 діб) на основі:

- моделі AR(1) ([п. 3.5](#)) – якщо доступні часові ряди рівнів по водомірних постах;
- оперативних RIS-даних (*viadonau*, *AFDJ*, *ARN* тощо) – за наявності актуальних прогнозів рівнів;
- нормативних типових глибин для класу *AGN* і відповідного гідрологічного сезону (маловодний / середній / багатоводний рік) з авторської довідкової таблиці рекомендованих значень $k_{H,i}$ ([Додаток Є](#)) – як резервний варіант за відсутності оперативних даних.

На основі $\hat{H}_i$ та нормативної або прогнозної осадки каравану $d_{eq,i}$ розраховується прогнозний коефіцієнт $\hat{k}_{H,i}$ та числа Фруда $\widehat{Fr}_{n,i}$ для кожної ділянки.

Крок 2. Генерація кандидатних сценаріїв. Формується матриця сценаріїв «швидкість × конфігурація каравану» за такими правилами:

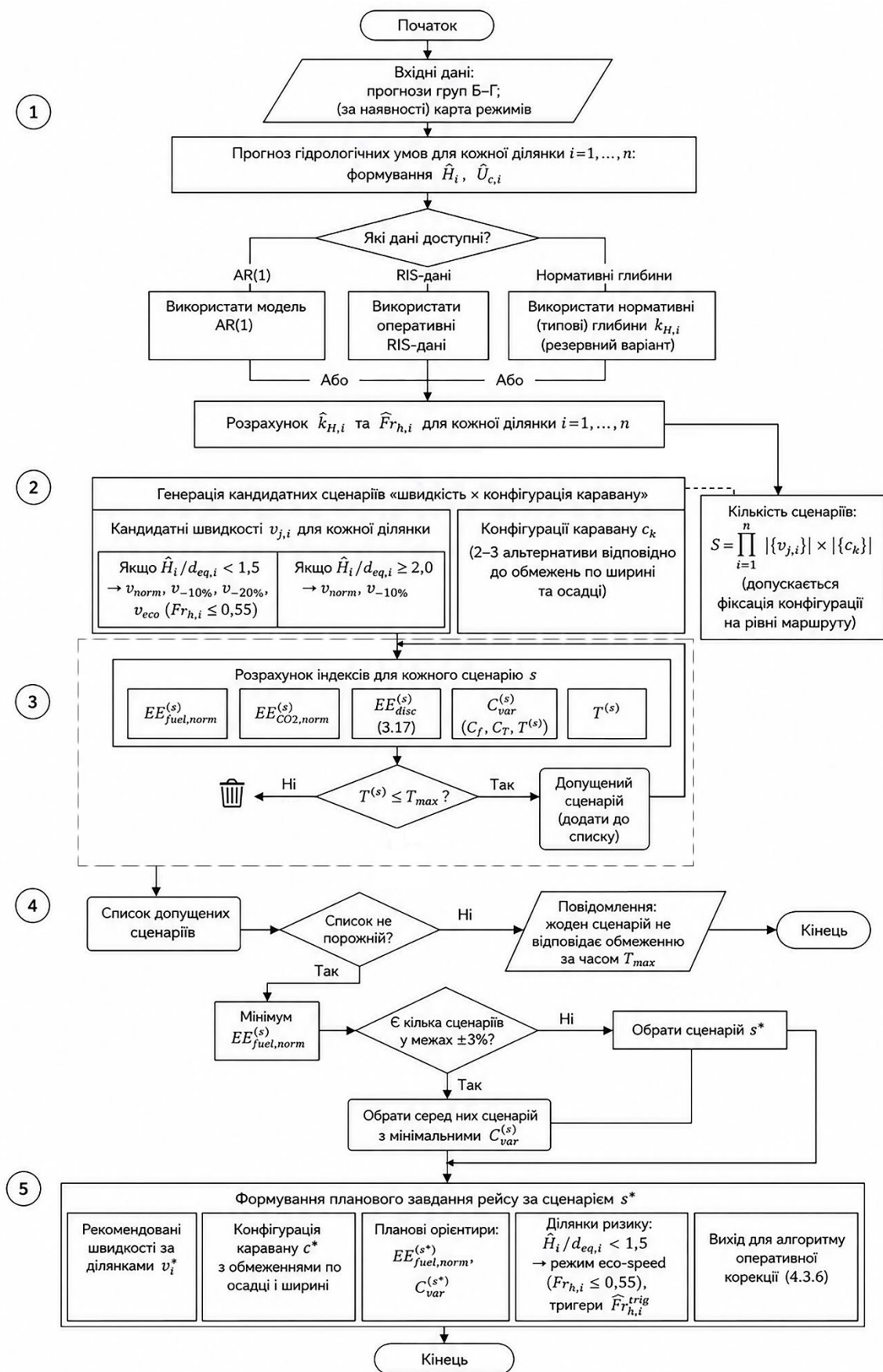


Рисунок 4.5 – Алгоритм проспективного аналізу підтримки рішень при плануванні рейсу

- для кожної ділянки задається набір кандидатних швидкостей $v_{j,i}$, що включає: нормативну (контрактну) швидкість, знижену на 10% і знижену на 20% від нормативної, а також швидкість eco-speed, що відповідає $Fr_{h,i} \leq 0,55$, якщо для ділянки прогнозується $\hat{H}_i/d_{eq,i} < 1,5$;

- для ділянок без критичних гідрологічних обмежень ($\hat{H}_i/d_{eq,i} \geq 2,0$) альтернативи швидкості скорочуються до двох: нормативна та знижена;

- конфігурації каравану c_k задаються відповідно до навігаційних обмежень по ширині шляху та осадці для кожного класу AGN на маршруті – зазвичай 2–3 альтернативи.

Загальна кількість сценаріїв: $S = \prod_{i=1}^n |\{v_{j,i}\}| \times |\{c_k\}|$. Для скорочення комбінаторики допускається фіксація конфігурації каравану на рівні всього маршруту (одна конфігурація для всіх ділянок), а швидкість варіюється поділянково.

Крок 3. Розрахунок індексів для кожного сценарію. Для кожного сценарію s розраховуються:

- $EE_{fuel,norm}^{(s)}$ та $EE_{CO_2,norm}^{(s)}$ за розрахунковими схемами п. 4.2.3 з використанням прогнозних $\hat{k}_{H,i}$, $\hat{U}_{c,i}$ та характеристик ГД з групи В;
- $EE_{disc}^{(s)}$ за формулою (3.17) для оцінки питомої транспортної роботи;
- $C_{var}^{(s)}$ за схемою 3 п. 4.2.3 з урахуванням C_f , C_T та прогнозного часу рейсу $T^{(s)}$.

Якщо рейс має жорстке часове обмеження (наприклад, контрактний термін доставки), сценарії, що перевищують допустимий час T_{max} , виключаються з подальшого розгляду.

Крок 4. Обґрунтований вибір та фіксація робочого сценарію. На основі результатів кроку 3 виконується порівняння кандидатних сценаріїв за показниками $EE_{fuel,norm}^{(s)}$, $C_{var}^{(s)}$ та часом рейсу $T^{(s)}$. Спочатку відсіюються сценарії, що не задовольняють обмеженням за часом рейсу $T^{(s)} > T_{max}$. Серед решти

сценаріїв як робочий обирається сценарій, який забезпечує найменше значення $EE_{\text{fuel, norm}}^{(s)}$. Якщо декілька сценаріїв мають близькі (у межах $\pm 3\%$) значення $EE_{\text{fuel, norm}}^{(s)}$, перевага надається сценарію з мінімальними змінними витратами $C_{\text{var}}^{(s)}$. Обраний таким чином сценарій далі вважається плановим і позначається як s^* ; його параметри використовуються при формуванні планового завдання рейсу (крок 5) та як базові орієнтири для алгоритму оперативної корекції в ході рейсу (п. 4.3.6).

Крок 5. Формування планового завдання рейсу. За результатами вибору сценарію s^* формується планове завдання у вигляді:

- розподілу рекомендованих швидкостей за ділянками v_i^* ;
- рекомендованої конфігурації каравану s^* із зазначенням обмежень по осадці та ширині шляху;
- розрахункових значень $EE_{\text{fuel, norm}}^{(s^*)}$ і $C_{\text{var}}^{(s^*)}$ – як планових орієнтирів для контролю в ході рейсу (алгоритм оперативної корекції, п. 4.3.6);
- переліку ділянок підвищеного гідрологічного ризику ($\hat{H}_i/d_{\text{eq},i} < 1,5$) з рекомендованим режимом економічної швидкості та тригерними значеннями $Fr_{h,i}$ для переходу до оперативної корекції.

Результати алгоритму перспективного планування, п. 4.3.5, є вхідними орієнтирами для алгоритму оперативної корекції, п. 4.3.6, що здійснює оперативне коригування прийнятих планових рішень безпосередньо в ході рейсу.

Схематичн алгоритм перспективного аналізу та підтримки рішень при плануванні рейсу наведено на рис. Ж.2 [Додатку Ж](#).

4.3.6 Алгоритм оперативної корекції в ході рейсу

Алгоритм реалізує оперативний режим управління енергоефективністю безпосередньо в ході рейсу і є логічним продовженням алгоритму перспективного планування, п. 4.3.5: планові орієнтири $EE_{\text{fuel, norm}}^{(s^*)}$, $C_{\text{var}}^{(s^*)}$, розподіл v_i^* та перелік ділянок підвищеного гідрологічного ризику, сформовані на кроці 5 алгоритму перспективного планування, п. 4.3.5, є вхідними базовими

значеннями для поточного моніторингу. Алгоритм оперативної корекції реалізується за принципом «*rolling*», що означає не одноразове коригування, а неперервне – щоразу при переході каравану на нову ділянку маршруту або при надходженні нових вимірювальних даних, що суттєво відрізняються від прогнозних.

Крок 1. Неперервний моніторинг параметрів у ході рейсу. На кожній ділянці i в режимі реального часу або з дискретністю, що відповідає штатному журналу вахти, фіксуються:

- фактична глибина H_i^{fact} та швидкість течії $U_{c,i}^{\text{fact}}$ – з *RIS*-даних або бортових вимірювань;
- фактична швидкість каравану v_i^{fact} та частота обертання ГД $n_{\text{ГД}}$;
- фактичне питоме витрачання палива SFC_{fact} – з витратоміра або за штатною методикою обліку;
- сигнали системи моніторингу стану ГД (у разі встановлення): температура відпрацьованих газів по циліндрах, максимальний тиск згоряння p_z , рівень вібрації.

Зафіксовані параметри порівнюються з плановими орієнтирами s^* та прогнозними значеннями кроку 1 алгоритму проспективного планування, п. 4.3.5.

Крок 2. Перевірка умов спрацювання коригувальних дій. Після фіксації параметрів для ділянки i послідовно перевіряються три групи умов, за яких доцільно застосовувати коригувальні дії.

– Гідрологічні умови (група Г): якщо виконується нерівність $H_i^{\text{fact}}/d_{\text{eq},i} < 1,5$ або $Fr_{h,i}^{\text{fact}} > 0,55$ – це означає, що фактичні глибини є нижчими за критичний рівень або режим руху наближається до небажаної області за числом Фруда. У такому разі необхідно розглядати зниження швидкості та корекцію режиму руху.

– Технічні умови (група В): якщо відношення $SFC_{\text{fact}}/SFC_{\text{ref}} > 1,10$ спостерігається на двох і більше послідовних ділянках, це свідчить про можливу деградацію паливної апаратури або газотурбінного наддуву та потребу в зміні

режиму навантаження ГД і плануванні позачергового технічного обслуговування.

– Режимні умови (група Р): якщо відхилення фактичного значення відхилення $EE_{\text{fuel,norm}}^{\text{fact}}$ від планового орієнтиру $EE_{\text{fuel,norm}}^{(s^*)}$ перевищує + 10 % за відсутності пояснень з боку гідрологічних або технічних факторів, це свідчить про систематичне перевищення рекомендованої швидкості або відхилення від запланованої конфігурації каравану.

Якщо жодна з наведених умов не виконується, рейс продовжується за раніше прийнятим плановим сценарієм s^* без коригування.

Крок 3. Формування коригувальних рішень. Для кожної з груп умов, що виконалися на кроці 2, формуються відповідні коригувальні дії за класами рішень (п. 4.3.3).

- За гідрологічними умовами (група Г) застосовується рішення класу 3: здійснюється зниження частоти обертання ГД до рівня, що забезпечує $Fr_{h,i} \leq 0,55$, з одночасним перерахунком прогнозного часу прибуття та очікуваних значень $EE_{\text{fuel,norm}}$ для решти маршруту. Якщо погіршені гідрологічні умови прогнозуються для кількох наступних ділянок, виконується локальне повторне застосування алгоритму перспективного планування (п. 4.3.5, кроки 2–4) з урахуванням оновлених даних.

- За технічними умовами (група В) застосовується рішення класу 4: обмежується навантаження ГД до безпечного рівня, приймається рішення щодо подальшої експлуатації до кінця рейсу (з урахуванням надійності та безпеки), а судновласнику передається інформація про необхідність позачергового технічного обслуговування або діагностики після завершення рейсу. У випадку виявлення критичних ознак погіршення стану ГД розглядається можливість дострокового заходу в порт.

- За режимними умовами (група Р) застосовуються рішення класу 1: коригується рекомендована швидкість на поточній та, за потреби, на наступних

ділянках, з повторним розрахунком $EE_{\text{fuel, norm}}$ та C_{var} для оновленого швидкісного профілю.

У разі одночасного виконання кількох груп умов пріоритет надається, по-перше, забезпеченню технічної безпеки (умови групи В), по-друге, безпеці плавання в гідрологічно складних умовах (група Г), і вже в третю чергу – режимній оптимізації за показниками енергоефективності та витрат (група Р).

Крок 4. Оновлення планового завдання та продовження моніторингу. Після застосування коригувальних дій оновлюються планові орієнтири v_i^* , $EE_{\text{fuel, norm}}^{(s^*)}$ і $C_{\text{var}}^{(s^*)}$ для частини маршруту, що залишилася до проходження. Далі алгоритм повертається до кроку 1 для наступної ділянки, тобто цикл «моніторинг → перевірка умов → коригувальні дії → оновлення плану» повторюється послідовно вздовж усього маршруту, що й забезпечує неперервний характер корекції.

Крок 5. Формування журналу коригувань для ретроспективного аналізу. Усі виявлені відхилення від планових орієнтирів, відповідні умови їх виникнення та прийняті коригувальні рішення фіксуються в журналі рейсу у структурованому вигляді. Після завершення рейсу цей журнал використовується як додаткове вхідне джерело для алгоритму ретроспективного аналізу, п. 4.3.4 (крок 1), що дозволяє підвищити точність ретроспективного аналізу причин відхилень і уточнити рекомендації щодо подальшої корекції політики експлуатації.

Схематичне зображення алгоритму оперативної корекції під час рейсу наведено на рис. Ж.3 [Додатку Ж](#). Блок-схема алгоритму наведена на рис. 4.6.

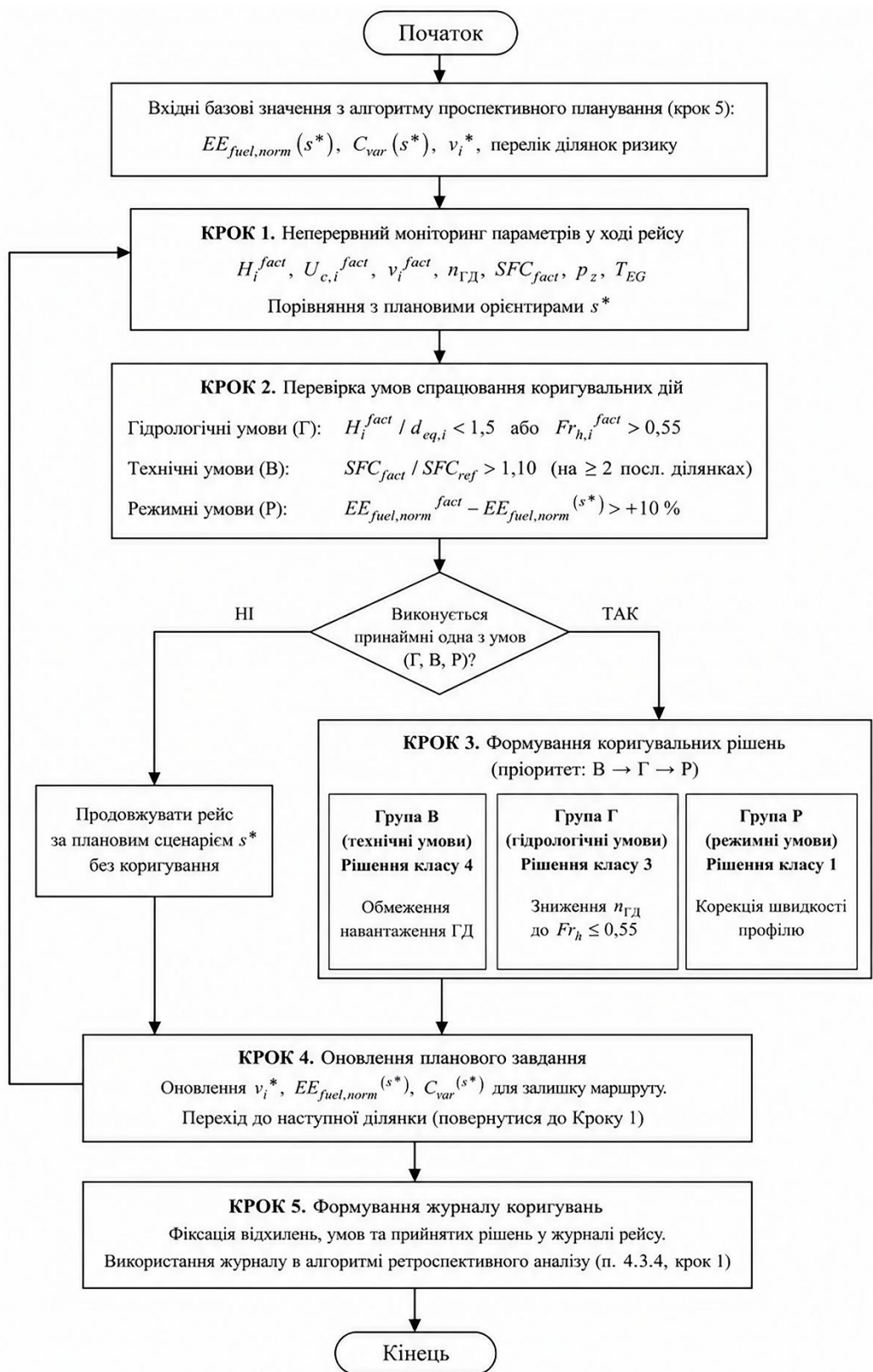


Рисунок 4.6 – Алгоритм оперативної корекції під час рейсу

Таким чином, алгоритми обґрунтування експлуатаційних рішень, описані у підпунктах 4.3.4, 4.3.5 і 4.3.6, утворюють замкнутий контур управління:

ретроспективний аналіз → перспективне планування → оперативна неперервна корекція → оновлений ретроспективний аналіз.

4.4 Програмна реалізація способу як інструмент підтримки прийняття рішень

Запропонований у попередніх підрозділах спосіб оцінки енергоефективності руху каравану на Дунаї потребує програмної реалізації, яка дозволяла б практичне застосування способу в умовах експлуатації флоту. У цьому підрозділі описано таку реалізацію у вигляді інструменту підтримки прийняття управлінських рішень для берегових служб судноплавних компаній – операторів дунайського флоту. Викладено призначення інструменту і користувацькі сценарії (підпункт 4.4.1), архітектуру та обґрунтування вибору технологічної платформи (підпункт 4.4.2), інформаційну модель і структуру функціональних аркушів (підпункт 4.4.3), зв'язок обчислювального ядра з методикою розділів 3 і 4 (підпункт 4.4.4) та робочий цикл користувача з демонстраційним прикладом (підпункт 4.4.5).

4.4.1 Призначення інструменту і користувацькі сценарії

Розроблений інструмент призначений для кількісної оцінки енергоефективності рейсу самохідного судна з караваном барж на судноплавному Дунаї та обґрунтування експлуатаційних рішень на основі цієї оцінки. Він забезпечує реалізацію трирівневої системи показників – детермінованого індексу EE_{disc} , нормованого за гідрологічними умовами індексу $EE_{fuel,norm}$ та похідного від нього показника викидів $EE_{CO2,norm}$ – у поєднанні з економічною складовою C_{var} і чотирирівневою шкалою оцінювання за критерієм η з підпункту 4.2.5. Результати, отримані за допомогою інструменту, призначені для використання як обґрунтування для управлінських рішень, що належать до чотирьох класів, визначених у підпункті 4.3.3.

Інструмент позиціонується як засіб підтримки прийняття рішень, а не як автоматизована система прийняття рішень. Він не замінює судноводія або менеджмент судноплавної компанії в процесі ухвалення експлуатаційних

рішень, а надає кількісну основу для такого ухвалення у вигляді числових показників, графічних залежностей та діагностичних рекомендацій.

Категорії користувачів. Інструмент розрахований передусім на дві категорії фахівців берегових підрозділів судноплавної компанії або іншого оператора флоту:

- експлуатаційна служба (диспетчер) – здійснює оцінку завершених рейсів за даними рейсових журналів, формує накопичувальну статистику по флоту, готує рекомендації для майбутніх рейсів і повідомляє їх судноводіям;

- технічна служба (технічний директор, головний інженер, суперінтендант, або інший фахівець відповідного рівня менеджменту) – використовує результати оцінки як обґрунтування управлінських рішень стратегічного рівня щодо швидкісної політики, графіків технічного обслуговування головних двигунів, перегляду конфігурації караванів та оновлення флоту.

Судноводій (капітан самохідного судна) у запропонованій схемі є виконавцем рішень, погоджених між диспетчером та технічним директором, а не прямим користувачем інструменту. Така схема відповідає традиційній організаційній структурі судноплавних компаній – операторів дунайського флоту, в якій управлінські та аналітичні функції зосереджені на берегових службах, а судноводій реалізує отримані рекомендації в умовах рейсу. Водночас простота інтерфейсу інструменту та відсутність вимог до спеціалізованого програмного забезпечення не виключають можливості його використання безпосередньо на борту судна – рішення щодо такого варіанта впровадження залишається на розсуд менеджменту судноплавної компанії з огляду на її організаційні особливості та технічну оснащеність флоту.

Режими роботи інструменту. Інструмент підтримує три режими роботи, що відповідають трьом часовим горизонтам застосування способу оцінки енергоефективності, визначеним у [підпункті 4.3.1](#):

- ретроспективний режим – оцінка завершеного рейсу за фактичними даними рейсового журналу. У цьому режимі користувач заносить до інструменту

параметри відпрацьованого рейсу (склад каравану, маршрут, фактичну витрату палива, тривалість, гідрологічні умови) та отримує оцінку фактичної енергоефективності з прив'язкою до шкали оцінювання. Результат використовується для верифікації відповідності рейсу плановим показникам, накопичення статистики та виявлення відхилень, що потребують подальшого аналізу;

- перспективний (планувальний) режим – оцінка майбутнього рейсу за прогнозованими умовами. Користувач задає очікувані параметри запланованого рейсу – у тому числі прогнозні значення глибин фарватеру і швидкостей течії на сегментах маршруту – та отримує очікувані значення показників енергоефективності. На основі цих результатів формуються рекомендації щодо швидкісного режиму, складу каравану та режимів роботи головних двигунів, що передаються капітану перед початком рейсу;

- оперативний режим – коригування параметрів рейсу під час руху на основі поточних умов плавання. Цей режим використовується для коригування рекомендацій, виданих у плановому режимі, при суттєвих відхиленнях фактичних умов від прогнозних – наприклад, при різкій зміні рівня води в результаті паводка або скидів з водосховищ верхньої та середньої частин Дунаю.

На думку автора, оперативний режим також доцільно реалізовувати силами берегових служб судноплавної компанії: диспетчер на основі оперативних даних здійснює перерахунок показників і повідомляє судноводія про коригувальні рекомендації засобами зв'язку. Така схема забезпечує єдність методологічного підходу для всіх трьох режимів та зберігає за судноводієм роль виконавця погоджених рішень. Разом з тим, як уже зазначено вище, проста структура інструменту дозволяє (за рішенням менеджменту судноплавної компанії) передати його для безпосереднього використання на борту судна, що особливо актуально для випадків тривалої відсутності стійкого зв'язку між берегом і судном у віддалених районах судноплавства.

Обмеження інструменту та поза обсягом дослідження. У межах поточної реалізації інструмент має такі функціональні обмеження, які важливо враховувати при його застосуванні:

- інструмент не виконує автоматичного імпорту даних з бортових систем збору інформації (*SCADA*, *IoT*-датчиків, систем моніторингу витрати палива) – вхідні дані заносяться оператором вручну з рейсових журналів або інших первинних документів;

- інструмент реалізує детермінований розрахунок показників енергоефективності та не містить імовірнісного прогнозного блоку на основі моделі $AR(1)$, розгляд якого винесено за межі підрозділу 4.4;

- інструмент не моделює гідродинаміку каравану в явному вигляді – вплив мілководдя на енергоефективність враховується через параметризовану функцію k_H , побудовану за результатами аналізу літературних джерел і узагальнення гідрологічних умов дунайських ділянок (Додаток Є);

- інструмент не враховує метеорологічних факторів (вітер, опади, видимість), вплив яких на енергоефективність руху на внутрішньому водному шляху вважається другорядним порівняно з гідрологічними умовами;

- інструмент не враховує метеорологічних факторів (вітер, опади, видимість), вплив яких на енергоефективність руху на внутрішньому водному шляху вважається другорядним порівняно з гідрологічними умовами;

- інструмент не призначений для безпосереднього використання на борту судна в режимі реального часу під час рейсу – результати оцінки у вигляді конкретних рекомендацій передаються судноводію береговим диспетчером засобами регулярного зв'язку, як зазначено вище;

- інструмент не замінює судноводія в ухваленні рішень, що стосуються безпеки судноплавства, виконання правил руху на внутрішніх водних шляхах та інших аспектів управління судном, які виходять за межі енергоефективності.

Перелічені обмеження не зменшують прикладної цінності інструменту в контексті основного завдання – оцінки енергоефективності рейсу та обґрунтування експлуатаційних рішень на її основі. Перспективи подальшого

розширення функціональності інструменту (зокрема, інтеграція з прогнозним блоком на основі AR(1) та автоматизованим імпортом даних) розглянуто в [підрозділі 5.5](#) та у висновках до дисертації.

4.4.2 Архітектура програмної реалізації

У підпункті обґрунтовано вибір технологічної платформи для реалізації запропонованого способу оцінки енергоефективності, наведено загальну архітектуру отриманого інструменту у вигляді сукупності функціональних аркушів та схему потоку даних між ними. Окремо розглянуто принцип відсутності макропрограм та його наслідки для портативності й безпечності використання інструменту.

Обґрунтування вибору технологічної платформи. Технологічна платформа для реалізації способу обиралася з урахуванням таких функціональних вимог, що впливають з аналізу користувацьких сценаріїв (підпункт 4.4.1):

- повсюдна доступність на робочих місцях диспетчерів і фахівців менеджменту судноплавних компаній, операторів флоту, без потреби в установленні спеціалізованого програмного забезпечення;
- низька або нульова вартість впровадження, що знижує економічний бар'єр для практичного використання інструменту операторами флоту різного масштабу;
- прозорість обчислень – можливість для користувача переглянути формули і простежити логіку отримання кожного результату, що особливо важливо для академічної верифікації та для довіри з боку експлуатаційного персоналу;
- відкритість формату файлу і можливість роботи з ним у різних програмних середовищах для незалежності від конкретного програмного продукту;
- простота інтерфейсу і знайомість користувачам, що скорочує період освоєння інструменту до мінімуму.

Розглянуто чотири основні класи технологічних рішень, які могли б бути використані для реалізації способу:

- спеціалізоване *desktop*-програмне забезпечення власної розробки (наприклад, на мовах *Python* з графічними бібліотеками *PyQt* або *Tkinter*, на *C#* з середовищем *WinForms* або аналогічних). Перевагою такого рішення є повний контроль над функціональністю та можливість оптимізації інтерфейсу під специфічні задачі. Недоліками є необхідність створення дистрибутиву і його супроводу, забезпечення сумісності з різними версіями операційних систем, потреба у механізмі оновлень, а також значна вартість розробки і подальшої технічної підтримки;

- *web*-сервіс з клієнт-серверною архітектурою і браузерним інтерфейсом. Переваги – централізоване оновлення, доступ з будь-якого пристрою, підключеного до мережі, можливість одночасної роботи кількох користувачів. Недоліки – необхідність хостингу і адміністрування серверної частини, постійна залежність від інтернет-з'єднання, додаткові вимоги до захисту корпоративних даних при їх передачі через мережу;

- інженерні математичні пакети (*MATLAB*, *Mathcad*, *GNU Octave* та аналогічні). Переваги – потужний апарат для чисельних обчислень і візуалізації, наявність бібліотек для розв'язування широкого кола інженерних задач. Недоліки – висока вартість ліцензії на комерційні продукти (зокрема *MATLAB*), потреба у фаховій підготовці користувача для самостійної роботи з пакетом, обмежена поширеність таких продуктів у судноплавних компаніях, де переважає робота з типовими офісними застосунками;

- електронні таблиці (*Microsoft Excel*, *LibreOffice Calc*, *Google Sheets* та інші сумісні з форматом *OOXML/.xlsx* продукти). Переваги – повсюдна доступність на робочих місцях, відкритий і стандартизований формат файлу, нульова вартість впровадження за умови наявності типового офісного пакета, відомий користувачам інтерфейс, прозорість формул і можливість їх безпосереднього перегляду. Недоліки – обмежена можливість створення складних інтерактивних інтерфейсів, відсутність вбудованих засобів прогнозової аналітики високого рівня, можливі обмеження продуктивності при дуже великих обсягах даних.

Зіставлення переваг і недоліків зазначених класів рішень з функціональними вимогами до інструменту показує, що для задачі підтримки прийняття рішень у судноплавній компанії середнього розміру оптимальним є вибір платформи електронних таблиць. Спеціалізоване desktop-програмне забезпечення вимагає невиправдано великих витрат на розробку і супровід для одного інструменту; web-сервіс потребує організаційного забезпечення серверної інфраструктури, що не завжди можливо для компаній невеликого масштабу; інженерні математичні пакети не відповідають критерію повсюдної доступності і знайомості користувачам. Електронні таблиці водночас задовольняють усім п'яти функціональним вимогам, переліченим вище.

У межах класу електронних таблиць як референсна реалізація використовується середовище *Microsoft Excel* у форматі файлу *.xlsx*, що відповідає стандарту *OOXML (ISO/IEC 29500)*. Завдяки відкритості формату отриманий файл інструменту коректно відкривається і функціонує також у середовищах *LibreOffice Calc*, *Apache OpenOffice Calc*, *Google Sheets* та інших сумісних продуктах. Таким чином, методологічна цінність інструменту не прив'язана до конкретного програмного продукту, а вибір середовища *Microsoft Excel* для реалізації пояснюється його найбільшим поширенням у корпоративній практиці.

Загальна архітектура інструменту. Інструмент має модульну структуру, в якій кожен функціональний компонент реалізовано у вигляді окремого аркуша робочої книги *.xlsx*. Розподіл функціональності за аркушами здійснено за принципом одного призначення на один аркуш, що забезпечує прозорість архітектури і полегшує супровід та модифікацію інструменту в майбутньому. Сукупно інструмент містить десять функціональних аркушів, які можна об'єднати в чотири логічні рівні:

- рівень введення – аркуш «Вхідні дані рейсу», на якому користувач (диспетчер) заносить параметри рейсу, що оцінюється;
- обчислювальний рівень – аркуш «Розрахунки», на якому за формулами розділу 3 виконуються посегментні та інтегральні розрахунки показників

енергоефективності, та аркуш «Довідкові k_H », що містить таблицю значень гідрологічного множника з [Додатку Є](#) для трьох ділянок Дунаю і двох сезонів;

- рівень результатів – аркуш «Результати» з трьома блоками подання числових результатів, оцінки за критерієм η зі шкалою з підпункту 4.2.5 та діагностичних рекомендацій за класами рішень з підпункту 4.3.3, а також аркуш «Графіки» з візуалізацією показників поточного рейсу за сегментами;

- рівень накопичення та аналізу історії – аркуш «Журнал рейсів», який зберігає підсумкові показники усіх раніше оцінених рейсів, аркуш «Графіки журналу» з візуалізацією динаміки показників по всіх рейсах та аркуш «Порівняння рейсів» для вибіркового зіставлення показників обраних рейсів, аркуш «Буфер сегментів», що формує живу проєкцію посегментних показників активного рейсу в «довгому» форматі (*long-формат*), та аркуш «Архів сегментів», у якому накопичується посегментна історія всіх зафіксованих рейсів для деталізованого ретроспективного аналізу.

Принциповою особливістю архітектури є чіткий розподіл відповідальностей між аркушами: користувач здійснює введення даних виключно на аркуші «Вхідні дані рейсу», тоді як решта аркушів є обчислювальними або презентаційними і не передбачають прямого редагування з боку користувача. Це знижує ризик випадкового пошкодження формул і забезпечує однозначну прив'язку отриманих результатів до введених вхідних даних. Виняток складає аркуш «Журнал рейсів», на якому користувач після кожного оціненого рейсу виконує дію фіксації результатів – деталі цього механізму викладено в [підпункті 4.4.5](#).

Загальну схему потоку даних між аркушами інструменту наведено на [рис. 4.7](#).

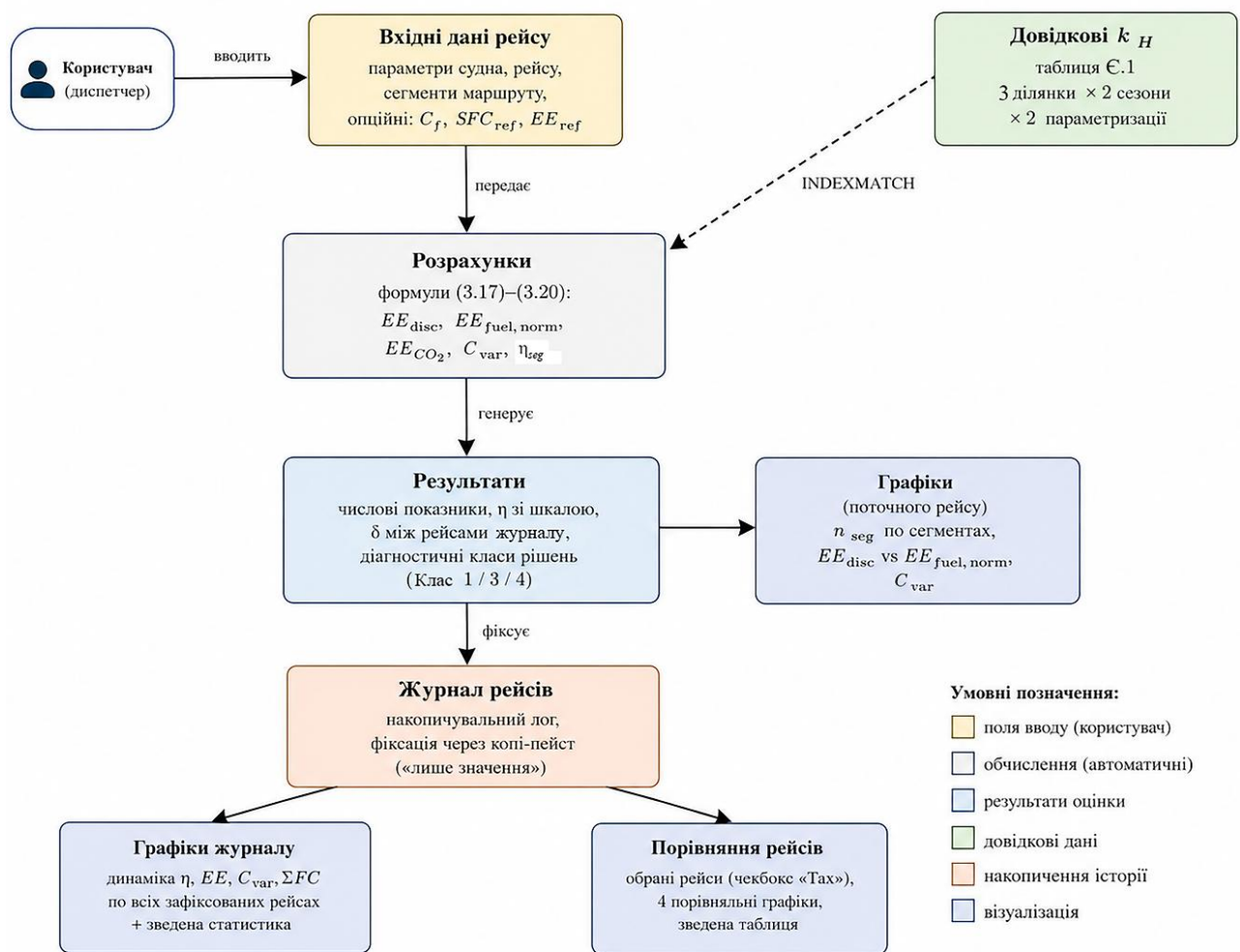


Рисунок 4.7 – Схема потоку даних між функціональними аркушами інструменту

Схема відображає взаємозв'язки між аркушами і напрям передачі даних: суцільні стрілки позначають передачу значень показників між аркушами в межах оцінки одного рейсу, пунктирна стрілка з підписом *INDEX/MATCH* – звернення до довідкової таблиці k_H за двома ключами (ділянка Дунаю, сезон). Користувач (диспетчер) показаний як зовнішній актор системи, який торкається лише аркуша «Вхідні дані рейсу» та виконує дію фіксації результатів на аркуші «Журнал рейсів».

Відсутність макропрограм та її обґрунтування. Принциповим архітектурним рішенням є реалізація всієї функціональності інструменту виключно засобами формул електронних таблиць, без використання

макропрограм мовою *VBA* (*Visual Basic for Applications*) або іншими програмними засобами розширення функціональності. Файл інструменту має стандартне розширення *.xlsx*, а не *.xlsb*, яке передбачає вмісткість макропрограм. Це рішення обґрунтовано трьома основними аргументами:

- портативність – файл *.xlsx* без макропрограм коректно відкривається у різних середовищах, що підтримують стандарт *OOXML*, тоді як файли *.xlsb* з макропрограмами *VBA* на інших платформах (*LibreOffice Calc*, *Google Sheets*) працюють обмежено або не працюють взагалі через несумісність реалізацій макромови;

- безпечність – макропрограми становлять потенційний канал поширення шкідливого коду, тому корпоративні політики безпеки інформації у багатьох судноплавних компаніях передбачають обмеження або повну заборону використання макропрограм у документах. Файли *.xlsx* без макропрограм не потрапляють під такі обмеження;

- прозорість і верифікованість – уся обчислювальна логіка інструменту виражена формулами, які користувач може переглянути в будь-якій клітинці і простежити логіку отримання результату. Це принципово важливо для академічної верифікації способу та для довіри з боку експлуатаційного персоналу, який має можливість самостійно переконатися у коректності обчислень.

Відсутність макропрограм накладає певні обмеження на функціональні можливості інструменту – зокрема, неможлива реалізація автоматичних дій за подіями (наприклад, автоматичне збереження результатів рейсу до журналу при зміні вхідних даних). Такі обмеження враховано при проектуванні інтерфейсу: дії користувача, які могли б бути автоматизовані за допомогою макропрограм, замінено на еквівалентні ручні операції за допомогою стандартних засобів електронних таблиць (зокрема, операція спеціальної вставки «лише значення» для фіксації результатів рейсу до журналу – деталі в [підпункті 4.4.5](#)). Такий компроміс прийнято як обґрунтований з огляду на перевагу, яку дає портативність і безпечність файлу без макропрограм.

Кількісна характеристика отриманого інструменту: робоча книга містить 10 функціональних аркушів, у яких розміщено 7796 формул, об'єднаних у 11 функціональних блоків посилань через систему іменованих діапазонів. Загальний розмір файлу – близько 90 кБ. Деталізований опис вмісту кожного аркуша наведено в підпункті 4.4.3.

4.4.3 Інформаційна модель та структура аркушів

У цьому підпункті наведено детальний опис структури та призначення кожного з функціональних аркушів інструменту, виділених у підпункті 4.4.2 та зображених на рис. 4.7. Для аркушів зі складною структурою наведено таблиці із зазначенням колонок, їх типів та призначення; для допоміжних аркушів – стислий опис у вигляді тексту. Реалізація конкретних формул і їх зв'язок з моделлю розділу 3 розглянуто окремо в підпункті 4.4.4; робота користувача з аркушами на демонстраційному прикладі – у підпункті 4.4.5.

Аркуш «Вхідні дані рейсу» є єдиним аркушем інструменту, призначеним для прямого введення даних користувачем. Він містить два функціональні блоки: блок заголовка рейсу та таблицю сегментів маршруту.

Блок заголовка рейсу розташований у верхній частині аркуша і містить одинадцять полів для введення загальних параметрів рейсу:

- ідентифікатор рейсу (Trip_ID) – текстове поле для унікального позначення рейсу, що включає, як правило, дату рейсу, назву судна та маршрут;
- дата рейсу – поле формату ДД.ММ.РРРР, що дублює дату з ідентифікатора рейсу і використовується для подальшого сортування записів у журналі; для рейсів з реконструкцією гідрологічних даних до цього поля занесено дата періоду реконструкції значення гідрологічного множника k_H ;
- тип самохідного судна – поле випадаючого списку зі значеннями «Штовхач», «Буксир», «Вантажне». Зберігається в іменованому діапазоні Ship_Type і використовується для коректного відображення інформації про рейс у Буфері та Архіві сегментів;
- власний вантаж m_{ship} , т – числове поле для ручного введення маси вантажу самохідного судна (релевантне для самохідних суховантажних суден;

для штовхачів і буксирів зазвичай дорівнює нулю). Зберігається в іменованому діапазоні Ship_Cargo;

- кількість барж у каравані N_{barges} – числове поле з кількістю барж, що входять до каравану. Зберігається в іменованому діапазоні N_Barges і використовується (у комбінації з полем «Тип руху» на сегменті, див. табл. 4.5 нижче) для розрахунку коефіцієнта $(2N - 1)$ на сегментах-проводках;

- кількість сегментів n – поле автоматичного підрахунку через формулу COUNTA, що визначає число заповнених рядків у таблиці сегментів. Користувач його не редагує;

- загальна маса вантажу каравану M_{total} , т – числове поле з обов’язковим заповненням, що використовується як значення за замовчуванням для маси вантажу на кожному сегменті;

- осадка каравану d , м – числове поле, що використовується при перевірці критерію мілководдя $H/d < 1,5$ для активації Класу 3 діагностики ([підпункт 4.3.3](#));

- ціна палива C_f , грн/т – необов’язкове числове поле, необхідне лише для розрахунку показника C_{var} . У разі відсутності значення C_{var} не обчислюється, а на аркуші «Результати» відображається відповідне повідомлення;

- опорна питома витрата SFC_{ref} , г/(кВт·год) – необов’язкове поле, що використовується для обчислення відношення $\delta_{SFC} = SFC_{act}/SFC_{ref}$ при діагностиці технічного стану головних двигунів (Клас 4);

- опорна енергоефективність EE_{ref} , кг/(т·км) – необов’язкове поле, що визначає базове значення для розрахунку показника $\eta = EE_{fuel,norm}/EE_{ref}$ та оцінки рейсу за чотирирівневою шкалою з [підпункту 4.2.5](#);

- параметризація k_H – поле випадального списку зі значеннями «А» або «В», що визначає, яка з двох параметризацій множника k_H з таблиці Є.1 використовується в розрахунках. За замовчуванням обрано параметризацію А.

Нижче блоку заголовка розташована таблиця сегментів маршруту, в якій користувач заносить параметри окремих ділянок рейсу. Таблиця має місткість 30

рядків, що є достатнім для типових рейсів на Дунаї (зазвичай 5–15 сегментів) із запасом для деталізованих рейсів з частою зміною умов плавання. Структура колонок таблиці сегментів наведена у табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Структура таблиці сегментів аркуша «Вхідні дані рейсу»

Колонка	Назва	Обо-в'язко-ва	Призначення
A	№	Так	Порядковий номер сегмента у рейсі. Використовується як ключ для подальшого посилання та як категорія на діаграмах
B	Назва ділянки	Так	Текстове позначення сегмента (наприклад, «км 97–101» або «Ізмаїл – Рені»). Виводиться як підпис у діагностичних повідомленнях
C	Довжина D_i , км	Так	Довжина сегмента за рекою. Використовується для розрахунку транспортної роботи W_i
D	Тривалість t_i , год	Так	Тривалість проходження сегмента. Разом з витратою палива визначає годинну витрату
E	Оберти ГД n , об/хв	Ні	Інформативне поле. Використовується для діагностики режиму роботи головних двигунів
F	Витрата палива FC_i , кг	Так	Фактична або планова витрата палива на сегменті. Базовий показник для всіх розрахунків енергоефективності
G	Маса вантажу m_i , т	Так	За замовчуванням заповнюється значенням M_{total} із блоку заголовка. Може бути зменшена для рейсів з частковою перевалкою
H	Глибина H_i , м	Ні	Глибина фарватеру на сегменті. Використовується для перевірки критерію мілководдя $H/d < 1,5$
I	Швидкість течії U_c , км/год	Ні	Інформативне поле. Може використовуватися для верифікації відповідності рейсу гідрологічним умовам
J	Ділянка Дунаю	Так	Поле випадального списку: «Верхній Дунай», «Середній Дунай», «Нижній Дунай». Використовується як перший ключ для пошуку k_H у довідковій таблиці
K	Сезон	Так	Поле випадального списку: «Зимово-весняний», «Літньо-осінній». Другий ключ для пошуку k_H
L	Факт. k_H	Ні	Опційне поле для введення фактичного значення k_H , отриманого з натурних вимірів. Якщо заповнене, має пріоритет над довідковим значенням

Колонка	Назва	Обо- в'язко- ва	Призначення
М	Інд. потужн. N_i , кВт	Ні	Індикаторна потужність головних двигунів. Використовується для розрахунку SFC_{act} , який порівнюється з SFC_{ref} для діагностики Класу 4
N	Коментар	Ні	Текстове поле для додаткових нотаток про сегмент (наприклад, особливі умови плавання, нештатні ситуації)
О	Тип руху	Так	Поле випадаючого списку з опціями «Сталий», «Проводка», «Очікування». Визначає характер руху на сегменті: «Сталий» – звичайне поступальне проходження; «Проводка» – багаторазове проходження самохідним судном з частиною каравану та поодиноким повернення у режимі $(2N - 1)$ на ділянках критичного мілководдя; «Очікування» – сегмент без руху (шлюзування, простій). Тип руху безпосередньо впливає на розрахунок FC_{eff} у колонці N аркуша «Розрахунки»
P	Конфігурація	Ні	Поле випадаючого списку з опціями вибору конфігурації каравану на сегменті у форматі «X:Y» (X – кількість рядів барж у поперечному напрямку, Y – кількість барж у ряді вздовж руху). Передається до Буфера та Архіву сегментів для збереження разом з іншими даними сегмента

Поля, призначені для введення користувачем, виділено світло-жовтим кольором; поля автоматичного обчислення – світло-сірим. Випадаючі списки в колонках J і K забезпечують узгодженість значень з довідковою таблицею k_H та запобігають введенню помилкових значень. Числові поля мають заданий формат відображення (наприклад, дві значущі цифри для глибини, тисячі через пробіл для маси вантажу), що покращує читабельність даних.

Аркуш «Розрахунки» є основним обчислювальним аркушем інструменту. Він не призначений для редагування користувачем – усі його клітинки містять формули, що автоматично перераховуються при зміні даних на аркуші «Вхідні дані рейсу». Аркуш складається з двох функціональних блоків: посегментної таблиці розрахунків та блоку інтегральних показників рейсу.

Посегментна таблиця розрахунків розташована у верхній частині аркуша і містить по одному рядку для кожного сегмента, заведеного на аркуші «Вхідні дані рейсу». Структура колонок таблиці наведена у табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Структура посегментної таблиці аркуша «Розрахунки»

Колонка	Назва	Що обчислюється	Посилання
A	№	Порядковий номер сегмента (копія з «Вхідні дані»)	—
B	Назва ділянки	Назва сегмента (копія з «Вхідні дані»)	—
C	k_H (з довідника)	Значення k_H з таблиці Є.1, отримане через INDEX/MATCH за ключами «ділянка Дунаю» і «сезон»	Додаток Є
D	k_H (застосований)	Фактичне значення k_H , що використовується в розрахунках: пріоритет надано полю «Факт. k_H » з вхідних даних, у разі його відсутності використовується довідкове значення	—
E	W_i , т·км	Транспортна робота на сегменті: добуток маси вантажу і довжини сегмента $W_i = m_{cargo,i} \cdot D_i$	Формула (3.17)
F	$W_{i_{norm}}$, т·км	Нормована транспортна робота на сегменті: W_i , помножена на застосоване значення k_H	Формула (3.18)
G	$CO_{2,i}$, т	Маса викидів вуглекислого газу на сегменті: витрата палива, помножена на коефіцієнт $CF = 3,114$ для дизельного палива [33]	ІМО МЕРС.245(66)
H	v_i , км/год	Середня швидкість судна на сегменті: довжина, поділена на тривалість	—
I	H/d	Відношення глибини фарватеру до осадки каравану. Використовується для перевірки критерію мілководдя	підпункт 4.3.3
J	η_{seg}	Параметр ефективності окремого сегмента: $\eta_{seg} = EE_{seg}/EE_{ref}$. Дозволяє виявити найкращий і найгірший сегменти рейсу	підпункт 4.2.5
K	SFC_{act} , г/(кВт·год)	Фактична питома витрата палива на сегменті: витрата, поділена на добуток індикаторної потужності і тривалості	—
L	δ_{SFC}	Відношення SFC_{act}/SFC_{ref} . Якщо перевищує 1,1 – активується Клас 4 діагностики	підпункт 4.3.3

Колонка	Назва	Що обчислюється	Посилання
М	Коментар діагностики	Автоматично згенерований текст з переліком активованих класів діагностики для сегмента	—
Н	FC_{eff} , кг	Ефективна витрата палива на сегменті з урахуванням типу руху: для сегмента типу «Сталий» $FC_{eff} = FC_i$; для сегмента типу «Проводка» $FC_{eff} = FC_i \cdot (2N - 1)$, де N – кількість барж у каравані (з поля N_{barges} заголовка рейсу); для сегмента типу «Очікування» $FC_{eff} = FC_i$ (паливо споживається на холостому ході). FC_{eff} використовується в усіх агрегатних розрахунках ($\sum FC$, η , SFC_{act} , CO_2)	підпункт 4.4.3
О	$N_i \cdot t$, кВт·год	Добуток індикаторної потужності і тривалості сегмента, що використовується для розрахунку середньозваженого SFC_{act} баластного рейсу в Блоці 4 аркуша «Результати» (іменований діапазон Sum_NiT)	—

Колонки С, D, Е, F виконують ядро моделі, описаної в [розділі 3](#), для окремих сегментів. Колонки G–M реалізують допоміжні і діагностичні обчислення, необхідні для повноти оцінки.

Блок інтегральних показників рейсу розташований під посегментною таблицею і містить агреговані за усіма сегментами значення:

- сумарна витрата палива $\sum FC$, кг – сума колонки F аркуша «Вхідні дані рейсу»;
- сумарна транспортна робота $\sum W$, т·км – сума колонки Е аркуша «Розрахунки»;
- сумарна нормована транспортна робота $\sum W_{norm}$, т·км – сума колонки F аркуша «Розрахунки»;
- сумарні викиди $\sum CO_2$, т – сума колонки G аркуша «Розрахунки»;
- загальна відстань $\sum D$, км – сума довжин сегментів;
- загальний час руху $\sum t$, год – сума тривалостей сегментів;

- детермінований індекс EE_{disc} , кг/(т·км) – обчислюється за формулою (3.17);
- нормований індекс $EE_{fuel,norm}$, кг/(т·км) – обчислюється за формулою (3.18);
- детермінований індекс викидів $EE_{CO2,disc}$, кг_{CO2}/(т·км) – обчислюється за формулою (3.19);
- нормований індекс викидів $EE_{CO2,norm}$, кг_{CO2}/(т·км) – обчислюється за формулою (3.20);
- економічний показник C_{var} , грн/(т·км) – добуток $EE_{fuel,norm}$ на ціну палива C_f з відповідним перерахунком одиниць виміру;
- критерій ефективності рейсу η – відношення $EE_{fuel,norm}$ до EE_{ref} ;
- найкращий і найгірший сегмент рейсу – текстове повідомлення з номером і назвою сегмента з мінімальним та максимальним значенням η_{seg} відповідно.

Усі підсумкові показники мають відповідні іменовані діапазони (EE_{disc} , EE_{fnorm} , Eta_{Trip} , C_{var} , Sum_{FC} та інші), через які вони доступні з інших аркушів інструменту без використання абсолютних адрес клітинок. Це робить структуру стійкою до можливих змін розташування блоків при подальшому розвитку інструменту.

Аркуш «Результати» є основним виходом інструменту для користувача. Він призначений для перегляду оцінки рейсу та містить чотири функціональні блоки (з них три – для вантажних рейсів та один додатковий – для рейсів без транспортної роботи).

Перший блок – числові показники енергоефективності – наводить значення дев'яти ключових показників рейсу разом з одиницями виміру: п'ять індексів енергоефективності (EE_{disc} , $EE_{CO2,disc}$, $EE_{fuel,norm}$, $EE_{CO2,norm}$, C_{var}) та чотири інтегральні величини (загальна відстань, загальний час, сумарна витрата палива, сумарні викиди CO₂). Кожен показник супроводжується коротким записом формули, за якою він обчислюється. У разі відсутності опційних вхідних

даних, необхідних для розрахунку, відповідна клітинка містить текстове повідомлення з підказкою (наприклад, «Введіть ціну палива C_f на «Вхідних даних», щоб побачити C_{var} »).

Другий блок – оцінка ефективності за критерієм η – містить числове значення η рейсу та його словесну інтерпретацію за чотирирівневою шкалою з [підпункту 4.2.5](#). Колірне кодування інтерпретації візуалізує оцінку: зелений колір для високої ефективності ($\eta \leq 0,90$), синій для прийнятної ($0,90 < \eta \leq 1,10$), жовтий для задовільної з резервами ($1,10 < \eta \leq 1,30$) та червоний для неефективного рейсу ($\eta > 1,30$). Кольори активуються через умовне форматування за пороговими значеннями. Конструктивно блок 2 розділений на дві частини: основну (значення η та інтерпретація поточного рейсу) та підблок порівняння двох рейсів з журналу за $\delta EE_{fuel,norm}$: користувач обирає два рейси (Рейс А – база, Рейс В – порівнюваний) з випадających списків, формованих з ідентифікаторів зафіксованих рейсів у журналі через VLOOKUP по діапазону Журнал рейсів!\$B\$5:\$M\$45. Після вибору рейсів автоматично виводяться їх значення $EE_{fuel,norm}$ та обчислюється відносна різниця $\delta = (EE\_B - EE\_A) / EE\_A \cdot 100\%$. Інтерпретація різниці виконується за трирівневою шкалою з порогами 5 % і 15 % ([підпункт 4.2.5](#)): «несуттєва різниця», «помірна – потрібен аналіз умов», «суттєва – потрібні управлінські рішення». Цей підблок автоматично активується лише при наявності у журналі двох або більше зафіксованих рейсів, інакше виводиться повідомлення «Додайте ще один рейс до Журналу для порівняння».

Третій блок – діагностика сегментів і рекомендації – наводить текстові повідомлення про найкращий і найгірший сегменти рейсу (з номером, назвою і значенням η_{seg}) та підблок активних класів рішень. У підблоці для кожного з трьох класів діагностики (Клас 1, Клас 3, Клас 4 з [підпункту 4.3.3](#)) автоматично виводиться повідомлення про активацію: або «тригер не активований», або кількість сегментів, на яких спрацював тригер, разом з текстовою рекомендацією щодо коригувальних дій. Активовані повідомлення виділяються кольоровою заливкою для привернення уваги користувача. Клас 2 (вибір каравану) у

поточній реалізації не активується автоматично – він розглядається як предмет управлінського рішення на основі сукупної оцінки кількох рейсів і деталізується на аркуші «Журнал рейсів» через відносне порівняння $\delta EE_{fuel,norm}$.

Четвертий блок – діагностика баластного рейсу – активується автоматично за умовою $IsBallast = TRUE$, що відповідає рейсу без транспортної роботи ($\sum FC > 0$ і $\sum TW = 0$). У цьому стані індекси енергоефективності EE_{disc} , $EE_{CO2,disc}$, $EE_{fuel,norm}$, $EE_{CO2,norm}$, C_{var} та критерій η не визначені (ділення на нуль), тому у клітинках Блоку 1 і в інтерпретації Блоку 2 виводиться повідомлення «Баластний рейс – EE не визначена». Натомість Блок 4 виводить п'ять показників, що зберігають фізичний сенс для баластного рейсу: середньозважений за потужно-часом фактичний питомий рівень витрати палива $SFC_{act} = \sum FC \cdot 1000 / \sum (P_i \cdot t_i)$ у г/(кВт·год); відношення $\delta_{SFC} = SFC_{act} / SFC_{ref}$; активний клас діагностики (Клас 4 активується за умовою $\delta_{SFC} > 1,1$); сумарна витрата палива $\sum FC$ та сумарні викиди $\sum CO_2$. Логіка визначення $IsBallast$ реалізована через однойменний іменований діапазон на аркуші «Розрахунки» ($=AND(Sum\_FC>0,Sum\_TW=0)$). Блок 4 дозволяє використовувати інструмент для діагностики технічного стану головних двигунів у технологічних рейсах штовхача без вантажу, що детально розглянуто у [підпункті 4.4.5](#) на прикладі рейсу УДП Р 14 «Борис Макаров».

Аркуш «Графіки» забезпечує графічну візуалізацію результатів поточного рейсу для оперативного аналізу. Він містить три діаграми та допоміжну економічну таблицю.

Перша діаграма відображає значення η_{seg} по сегментах рейсу у вигляді стовпчикової діаграми. Вона дозволяє візуально виявити сегменти з найгіршою ефективністю, які потребують подальшого аналізу. Друга діаграма зіставляє детермінований індекс EE_{disc} та нормований $EE_{fuel,norm}$ рейсу у вигляді двох сусідніх стовпчиків, що візуалізує внесок гідрологічної нормалізації у підсумкову оцінку. Третя діаграма у вигляді горизонтальної смуги наводить значення C_{var} разом з масштабом грошової одиниці на тонно-кілометр.

Допоміжна економічна таблиця, розташована поряд з третьою діаграмою, містить розгорнутий розрахунок економічної складової: ціну палива C_f , питому витрату палива у грамах на тонно-кілометр (для зручності читання – у тому самому масштабі, що використовується у міжнародній практиці), розрахунок C_{var} та загальну вартість палива за рейс. Останній показник, на відміну від C_{var} , виражений в абсолютних одиницях грошової валюти і дозволяє оцінити повну економічну вартість палива конкретного рейсу.

Аркуш «Довідкові k_H » містить довідкову таблицю значень гідрологічного множника, отриману у [Додатку Є](#) дисертації. Структура аркуша відповідає вигляду табл. Є.1: шість рядків даних (комбінації трьох ділянок Дунаю – Верхній, Середній, Нижній – та двох сезонів – зимово-весняний, літньо-осінній), у яких наведено середнє значення відношення H/d з відповідним стандартним відхиленням та значення множника k_H для двох параметризацій (А та В) з невизначеностями типу В ([п. 3.4.1](#), [37]).

Поряд з основною [табл. Є.1](#) на аркуші розташовано окремий допоміжний блок з трьох колонок, призначений для виконання операцій пошуку через стандартну функцію VLOOKUP. У першій колонці цього блоку розміщено об'єднаний ключ виду «ділянка Дунаю | сезон», у другій та третій – відповідні значення k_H для параметризацій А та В. Такий допоміжний блок використовується формулами аркуша «Розрахунки» для пошуку k_H за двома ключами одночасно. Перемикання між параметризаціями здійснюється на аркуші «Вхідні дані рейсу» через поле випадаючого списку – від обраного значення (А або В) залежить, з якої колонки допоміжного блоку береться значення k_H .

Окремо на аркуші розміщено константу коефіцієнта вуглекислотного перерахунку $CF = 3,114 \text{ т}_{\text{CO}_2}/\text{т}$ палива для дизельного палива, що відповідає рекомендації ІМО МЕРС.328(76) [33]. Ця константа використовується формулами аркуша «Розрахунки» при обчисленні викидів CO_2 .

Аркуш «Журнал рейсів» забезпечує накопичення підсумкових показників усіх оцінених рейсів у вигляді кумулятивного логу. На відміну від інших

аркушів, які перераховуються щоразу при зміні вхідних даних, журнал зберігає історію рейсів незалежно від поточного стану інструменту. Це досягається за рахунок гібридного механізму: попередньо заповнені у журналі рядки містять автоматично згенеровані формули, які зчитують поточний стан інструменту, але після фіксації рядка користувачем формули замінюються на статичні значення.

Структура журналу включає п'ять логічних груп стовпчиків: ідентифікаційну групу (стовпчики A–D з порядковим номером, ідентифікатором, датою та маршрутом рейсу), показникову (стовпчики E–L з усіма підсумковими показниками енергоефективності рейсу), параметричну (стовпчики M–O з конфігурацією каравану – кількість барж, маса вантажу, кількість сегментів – та стовпчик P зі службовим лічильником проводок), діагностичну (стовпчики Q–W зі статистикою активацій класів рішень – кількість сегментів кожного активованого класу, середні значення δ_{SFC} і η_{seg} , мінімальне H/d) та службову з керувальною (стовпчики X–Y з датою фіксації та індикатором статусу рядка; стовпчики Z–AB з полем вибору рейсу для порівняння і двома допоміжними стовпчиками рангів). Така організація дозволяє користувачу не лише орієнтуватися у вмісті журналу, але й одразу бачити підсумкову діагностичну картину кожного рейсу (без необхідності повертатися на аркуш «Результати»), а також однозначно відрізняти зафіксовані рядки історії від поточного (незафіксованого) рядка з підтягнутими формулами. Структура журналу наведена в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Структура аркуша «Журнал рейсів»

Колонка	Назва	Тип	Призначення
A	№	Формула	Порядковий номер рейсу через функцію COUNTA. Використовується як підпис на діаграмах
B	ID рейсу	Формула / статика	Ідентифікатор рейсу. Формула дублює значення Trip_ID з аркуша «Вхідні дані рейсу» з умовою активації
C	Дата рейсу	Формула / статика	Дата рейсу через посилання на іменований діапазон Trip_Date

Колонка	Назва	Тип	Призначення
D	Маршрут / примітка	Формула / статика	Текстова характеристика рейсу (як правило, копія Trip_ID)
E	EE_{disc} , кг/(т·км)	Формула / статика	Підсумкове значення EE_{disc} через іменований діапазон EE_disc
F	$EE_{fuel,norm}$, кг/(т·км)	Формула / статика	Підсумкове значення $EE_{fuel,norm}$ через іменований діапазон EE_fnorm
G	$EE_{CO2,disc}$, кг/(т·км)	Формула / статика	Підсумкове значення детермінованого індексу викидів
H	$EE_{CO2,norm}$, кг/(т·км)	Формула / статика	Підсумкове значення нормованого індексу викидів
I	C_{var} , грн/(т·км)	Формула / статика	Економічний показник через іменований діапазон C_var
J	η	Формула / статика	Критерій ефективності рейсу через іменований діапазон Eta_Trip
K	$\sum FC$, кг	Формула / статика	Сумарна витрата палива через іменований діапазон Sum_FC
L	$\sum CO_2$, т	Формула / статика	Сумарні викиди CO ₂ через іменований діапазон Sum_CO2
M	Кількість барж	Формула / статика	Кількість барж у каравані через іменований діапазон N_Barges. Дозволяє аналізувати залежність енергоефективності від конфігурації каравану
N	M_{total} , т	Формула / статика	Загальна маса вантажу каравану з заголовка рейсу. Використовується для δ-порівнянь рейсів схожого тоннажу
O	n сегментів	Формула / статика	Кількість сегментів рейсу. Використовується для оцінки масштабу рейсу при перегляді журналу
P	Проводок	Формула / статика	Кількість сегментів типу «Проводка» у рейсі (COUNTIF за діапазоном Seg_MoveType). Дозволяє швидко ідентифікувати рейси з проводками без аналізу окремих сегментів
Q	Сегментів Класу 1	Формула / статика	Кількість сегментів з $\eta_{seg} > 1,3$ (індикатор Класу 1). Дублює діагностичну інформацію з блоку 3 аркуша «Результати» на рівні журналу
R	Сегментів Класу 3 (H/d)	Формула / статика	Кількість сегментів з $H/d < 1,5$ (індикатор Класу 3 «мілководдя»)
S	Сегментів Класу 3 (проводка)	Формула / статика	Кількість сегментів типу «Проводка» – підклас Класу 3 «проводка» (фактично

Колонка	Назва	Тип	Призначення
			дублює колонку Р, але з акцентом на діагностичній природі активації класу)
T	Сегментів Класу 4	Формула / статика	Кількість сегментів з $\delta_{SFC} > 1,1$ (тригер Класу 4)
U	δ_{SFC} середнє	Формула / статика	Середнє за всіма сегментами рейсу значення δ_{SFC} . Дозволяє оцінювати тенденції зміни технічного стану головних двигунів за історією рейсів
V	η середнє	Формула / статика	Середнє за всіма сегментами рейсу значення η_{seg} . На відміну від інтегрального η (колонка J), що враховує транспортну роботу, η середнє – це звичайне арифметичне середнє по сегментах і використовується для виявлення рейсів з нерівномірною ефективністю
W	$(H/d)_{min}$	Формула / статика	Мінімальне за рейсом значення H/d . Дозволяє ідентифікувати найбільш мілководні сегменти рейсу за єдиним числовим показником
X	Дата запису	Формула / статика	Дата фіксації запису до журналу через функцію TODAY
Y	Статус	Формула	Візуальний індикатор стану рядка. Формула на основі ISFORMULA: повертає «✓» для зафіксованих рядків (статичні значення), «○» для поточних/незафіксованих (формули), порожньо – для пустих рядків. Слугує разом з кольоровим підсвічуванням рядка для швидкої візуальної ідентифікації стану кожного запису журналу
Z	Обрати	Ввід	Поле випадального списку («Так»/«Ні») для позначення рейсів, які беруть участь у порівнянні на аркуші «Порівняння рейсів»
AA	Ранг обраного	Формула	Порядковий номер у вибірці обраних рейсів (для тих, у кого в колонці O стоїть «Так»). Використовується формулами на аркуші «Порівняння рейсів» для побудови зведеної таблиці й діаграм без використання масивних формул
AB	Ранг (всі)	Формула	Порядковий номер серед усіх зафіксованих рейсів. Використовується формулами на аркуші «Графіки журналу» для формування компактного блоку-джерела даних діаграм

Стовпчик Y («Статус») є реалізацією візуального індикатора стану рядка журналу, що автоматично оновлюється при будь-якій зміні даних. Логіка індикатора базується на тому, що зафіксований рядок принципово відрізняється від незафіксованого наявністю формул у клітинках з показниками: до фіксації клітинки E–X містять формули, які зчитують поточний стан інструменту, а після фіксації – статичні значення, що не змінюються при подальшій роботі. Перевірка наявності формули виконується вбудованою функцією ISFORMULA, що повертає істину для клітинки з формулою та хибу для клітинки зі статичним значенням. Відповідно, формула стовпчика «Статус» повертає символ «✓» для зафіксованих рядків та символ «☹» для поточних (незафіксованих), що містять формули. Для порожніх рядків журналу (де ідентифікатор у стовпчику D відсутній) індикатор виводить порожній рядок.

Додатково візуальна ідентифікація стану рядка посилюється засобами умовного форматування: для всіх зафіксованих рядків автоматично застосовується світло-зелена заливка стовпчиків A–Y, що дозволяє швидко відрізнити історичні записи від поточного навіть при значній кількості рядків у журналі. Поточний рядок з формулами (підтягнутий з аркуша «Розрахунки») залишається без заливки, що візуально виокремлює його як «чорнетку», що потребує фіксації.

Стовпчик B (ідентифікатор рейсу) є ключем механізму автозаповнення. Логіка роботи така: у першому вільному (порожньому) рядку журналу формули автоматично підставляють поточне значення Trip_ID та інші підсумкові показники активного рейсу через систему іменованих діапазонів. Якщо рядок раніше не був зафіксований, у клітинці «Статус» (колонка Y) відображається індикатор «☹». Для фіксації рейсу користувач виділяє цей рядок (колонки A:Y), копіює його та виконує спеціальну вставку «лише значення» у той самий рядок – формули замінюються статичними значеннями, індикатор статусу автоматично змінюється на «✓», а сам рядок виділяється світло-зеленою заливкою через умовне форматування. Після фіксації наступний рейс, введений на аркуші

«Вхідні дані», автоматично підтягується вже у наступний порожній рядок журналу. Деталі робочого циклу фіксації наведено в [підпункті 4.4.5](#).

Стовпчик Z («Обрати») є самостійним полем введення з випадającym списком «Так»/«Ні», незалежним від механізму автозаповнення. Він використовується винятково на аркуші «Порівняння рейсів» для формування вибірки рейсів, що порівнюються. Колірне кодування виділяє рядки з «Так» зеленим фоном для зручності перегляду.

Допоміжні стовпчики «Ранг обраного» та «Ранг (всі)» (стовпчики AA та AB), розташовані праворуч від основних, обчислюють порядкові номери рейсів у двох вибірках: серед обраних для порівняння та серед усіх зафіксованих. Вони використовуються формулами на аркушах «Порівняння рейсів» та «Графіки журналу» для коректної побудови графіків і зведених таблиць.

Аркуш «Графіки журналу» забезпечує графічну візуалізацію динаміки показників енергоефективності по всіх зафіксованих рейсах журналу. Він містить чотири діаграми, зведений компактний блок-джерело даних та підсумкову статистику.

Перша діаграма відображає значення η для кожного зафіксованого рейсу у вигляді стовпчикової діаграми. Друга діаграма зіставляє детермінований і нормований індекси енергоефективності (EE_{disc} та $EE_{fuel,norm}$) для кожного рейсу. Третя діаграма відображає динаміку економічного показника C_{var} . Четверта діаграма відображає сумарні витрати палива по кожному рейсу. Як підписи горизонтальної осі на всіх чотирьох діаграмах використовуються порядкові номери рейсів у журналі (стовпчик A), а не текстові ідентифікатори, що забезпечує читабельність діаграм при значній кількості рейсів.

Зведений компактний блок-джерело даних розташований у середній частині аркуша і містить значення показників усіх зафіксованих рейсів без проміжків (на відміну від основного журналу, в якому між заповненими рядками можуть бути порожні). Цей блок будується через формули INDEX/MATCH за допоміжним рангом усіх рейсів і служить безпосереднім джерелом даних для всіх чотирьох діаграм.

Підсумкова статистика, розміщена нижче діаграм, містить сім інтегральних показників по всіх зафіксованих рейсах: кількість рейсів, середнє значення η , мінімальне (найкращий рейс) і максимальне (найгірший рейс) значення η , середнє значення $EE_{fuel,norm}$, сумарну витрату палива та сумарні викиди CO_2 .

Аркуш «Порівняння рейсів» дозволяє виконувати вибіркове зіставлення показників обраних рейсів з журналу. На відміну від аркуша «Графіки журналу», який візуалізує всі зафіксовані рейси, цей аркуш будує графіки лише для тих рейсів, які користувач явно обрав у стовпчику «Обрати» (стовпчик N) журналу.

Принцип роботи аркуша такий: формули INDEX/MATCH за рангом обраних рейсів (стовпчик O журналу) формують зведену таблицю обраних рейсів безпосередньо на аркуші «Порівняння рейсів». Структура зведеної таблиці повторює структуру журналу, наведену в табл. 4.7, за винятком стовпчика «Обрати». На основі цієї зведеної таблиці будуються чотири порівняльні діаграми, аналогічні діаграмам аркуша «Графіки журналу»: η обраних рейсів, EE_{disc} проти $EE_{fuel,norm}$, C_{var} , $\sum FC$. Підсумкова статистика по обраних рейсах містить сім аналогічних показників – кількість обраних, середнє/мінімальне/максимальне η , середнє $EE_{fuel,norm}$, сумарну витрату палива і сумарні викиди CO_2 по вибірці.

Механізм фільтрації через стовпчик «Обрати» дозволяє формувати вибірки за довільними критеріями, прийнятними для аналітика: рейси одного судна, рейси одного маршруту, рейси одного сезону, рейси з певним діапазоном значень η тощо. Перевагою такого підходу є гнучкість – вибірка може формуватися без зміни структури журналу і повертатися до повного перегляду в один клік (зняттям усіх позначок «Так»). Це робить аркуш універсальним інструментом для проведення порівняльного аналізу енергоефективності в різних розрізах.

Описана в цьому підпункті структура функціональних аркушів реалізує модульну архітектуру інструменту, наведену у [підпункті 4.4.2](#): користувач взаємодіє виключно з аркушем «Вхідні дані рейсу» та виконує обмежене коло операцій на аркуші «Журнал рейсів»; усі інші аркуші є обчислювальними або

презентаційними і автоматично оновлюються при зміні вхідних даних. Зв'язок між аркушами реалізовано через систему іменованих діапазонів, що забезпечує стійкість структури до її подальшого розвитку. У наступному підпункті 4.4.4 розглянуто зв'язок обчислювального ядра інструменту з методикою, викладеною в розділах 3 і 4 дисертації.

4.4.4 Обчислювальне ядро та зв'язок з методологією розділів 3 і 4

Розроблений інструмент реалізує спосіб оцінки енергоефективності, викладений у розділах 3 та 4 дисертації. У цьому підпункті наведено формальну прив'язку кожного елементу методики до конкретної реалізації в інструменті – у вигляді формул, посилань на іменовані діапазони, механізмів умовного форматування та алгоритмів автоматичних тригерів. Така прив'язка має на меті продемонструвати, що запропонований інструмент є не самостійним розв'язком, а програмною реалізацією верифікованого наукового апарату, а також забезпечити відстеженість результатів оцінки до конкретних формул і шкал, обґрунтованих у попередніх розділах.

Реалізація формул енергоефективності з розділу 3. Чотири основні формули обчислення індексів енергоефективності, виведені у підпунктах 3.2.3 та 3.2.4 розділу 3, реалізовані в інструменті у блоку інтегральних показників рейсу аркуша «Розрахунки». Реалізація виконана через систему іменованих діапазонів, що забезпечує однозначну відповідність між формулою з тексту дисертації та відповідним обчисленням в інструменті, незалежно від конкретного розміщення клітинок на аркуші.

Перед обчисленням підсумкових індексів інструмент виконує посегментну агрегацію вихідних даних: сумарну витрату палива $\sum FC$ за формулою суми колонки F аркуша «Вхідні дані рейсу», сумарну транспортну роботу $\sum TW = \sum(m_i \cdot D_i)$ як суму колонки E аркуша «Розрахунки», сумарну нормовану транспортну роботу $\sum W_{norm} = \sum(m_i \cdot D_i \cdot k_{H,i})$ як суму колонки F того ж аркуша та сумарну масу викидів $\sum CO_2 = \sum\left(FC_i \cdot \frac{CF}{1000}\right)$, де $CF = 3,114$ –

коефіцієнт перерахунку маси палива у масу вуглекислого газу, прийнятий згідно з Резолюцією ІМО МЕРС.328(76) [33] для дизельного палива.

На цих агрегованих величинах будуються чотири інтегральні індекси, що відповідають формулам (3.17), (3.18), (3.19) та (3.20) розділу 3. Прив'язку формул до конкретних іменованих діапазонів інструменту наведено в табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Прив'язка формул методики до обчислювального ядра інструменту

Елемент методології	Іменованій діапазон	Реалізація в електронних таблицях
Формула (3.17): детермінований індекс енергоефективності	EE_disc	=Sum_FC / Sum_W
Формула (3.18): детермінований індекс інтенсивності викидів	EE_disc_CO2	=Sum_CO2·1000/Sum_W
Формула (3.19): нормований індекс інтенсивності викидів	EE_fnorm_CO2	=Sum_CO2·1000/Sum_Wnorm
Формула (3.20): нормований індекс енергоефективності	EE_fnorm	=Sum_FC/Sum_Wnorm
Гідрологічний множник k_H (Додаток Є) – нормалізація транспортної роботи за гідрологічними умовами	обчислюється в колонці С аркуша «Розрахунки»	=INDEX('Довідкові k_H !',..., MATCH(...))
Перемикач параметризації А/В – вибір з двох параметризацій [62; 78]	KH_Param	=IF(KH_Param="А", k_{H_A} , k_{H_B})
Критерій ефективності η (підпункт 4.2.5)	Eta_Trip	=EE_fnorm / EE_Ref
δ -порівняння двох рейсів, % (підпункт 4.2.5)	– (Блок 2 аркуша «Результати»)	=(EE_B – EE_A) / EE_A · 100
Економічний показник C_{var} (підпункт 4.2.5)	C_var	=EE_fnorm · C_Fuel / 1000
Критерій активації Класу 1 рішень: $\eta > 1,3$ (підпункт 4.3.3)	– (Блок 3 аркуша «Результати»)	=COUNTIF(η_{seg} діапазон, ">1.3")

Критерій активації Класу 3 (мілководдя) $H/d < 1,5$ (підпункт 4.3.3)	– (Блок 3 аркуша «Результати»)	=COUNTIFS(H_i / Draft_d, "<1.5")
Критерій активації Класу 3 (проводка)	– (Блок 3 аркуша «Результати»)	=COUNTIF(Seg_MoveType, "Проводка")
Критерій активації Класу 4 рішень: $\delta_{SFC} > 1,1$ (підпункт 4.3.3)	– (Блок 3 аркуша «Результати»)	=COUNTIF(SFC_act/SFC_ref, ">1.1")
Логіка проводок: $FC_{eff} = FC_i \cdot (2N - 1)$ для типу «Проводка», $FC_{eff} = FC_i$ для інших типів (підпункт 4.4.3)	FC_Eff_Col	=IF(LOWER(TRIM (Seg_MoveType))=«проводка», FC_i·(2·N_Barges–1), FC_i)
Визначення баластного рейсу: $\sum FC > 0$ і $\sum TW = 0$	IsBallast	=AND(Sum_FC>0,Sum_W=0)
Середньозважений $SFC_{act} = \sum FC \cdot 1000 / \sum (N_i \cdot t_i)$ для баластного рейсу	– (Блок 4 аркуша «Результати»)	=Sum_FC·1000/Sum_NiT
Активация Класу 4 на баластному рейсі: $\delta_{SFC} > 1,1$ за середньозваженим SFC_{act}	– (Блок 4 аркуша «Результати»)	=IF(IsBallast, B41/SFC_Ref > 1.1, ...)

У табл. 4.8 відсутній критерій активації Класу 2 експлуатаційних рішень, оскільки вибір каравану у поточній реалізації автоматично не активується, рішення про конфігурацію каравану є предметом стратегічного управлінського розгляду на основі сукупної оцінки кількох рейсів, а не одного поточного. Натомість підтримка цього класу рішень здійснюється через підблок δ -порівняння на аркуші «Результати» та через систему накопичення історії в журналі рейсів – у послідовності кроків, формалізований у підпункті 4.3.3: накопичення вибірки рейсів за конфігураціями, парне δ -порівняння за критерієм 15 % з підпункту 4.2.5, інтерпретація з урахуванням інших факторів та формування рекомендації для оператора флоту.

Як видно з табл. 4.8, усі елементи в електронних таблицях мають реалізацію з використанням іменованих діапазонів замість прямих посилань на клітинки, що забезпечує два важливі властивості реалізації. По-перше, формули

в інструменті виглядають близько до математичної нотації з тексту дисертації – порівняння [формули \(3.20\)](#) та її реалізації $=\text{Sum\_FC}/\text{Sum\_Wnorm}$ є інтуїтивно прозорим для користувача. По-друге, реалізація стає стійкою до можливих змін розташування блоків аркуша при подальшому розвитку інструменту – формули продовжують працювати незалежно від того, у які клітинки переміщено вихідні дані.

Логіка проводок, реалізована в інструменті через колонку N « FC_{eff} » аркуша «Розрахунки» та поле «Тип руху» аркуша «Вхідні дані рейсу» ([підпункт 4.4.3](#)), не змінює формул методики [\(3.17\)–\(3.20\)](#), а реалізує їх для розширеного класу експлуатаційних ситуацій. У формулі (3.17) для детермінованого індексу EE_{disc} сумарна витрата палива $\sum FC$ в інструменті обчислюється як $\sum FC_{eff}$, де $FC_{eff_i} = FC_i$ для сегментів типу «Сталий» та «Очікування» ($\sum FC_{eff} = \sum FC$), а $FC_{eff_i} = FC_i \cdot (2N - 1)$ для сегментів типу «Проводка», де N – кількість барж у каравані. Таке перетворення фактичної витрати палива на сегменті-проводці узгоджене з фізичним змістом операції: при критичному мілководді караван з N барж проходить ділянку у режимі $(2N - 1)$ проходів штовхача, кожний з власною витратою палива, причому користувач інструменту вводить витрату за один прохід штовхача (а не сумарну за всю проводку). Аналогічне перетворення застосовується до формул [\(3.18\)–\(3.20\)](#) – у кожній з них замість $\sum FC$ фактично використовується $\sum FC_{eff}$, а замість $CO_{2i} - CO_{2eff_i} = FC_{eff_i} \cdot CF/1000$. Така архітектурна реалізація дозволяє зберегти єдиний детермінований апарат розділу 3 для всіх типів рейсів, без необхідності окремих формул для проводок.

Гідрологічна нормалізація транспортної роботи виконується через множник k_H , що враховує вплив реальних дунайських умов плавання (глибини фарватеру та швидкості течії) на енергоефективність руху каравану. Значення множника отримано у [Додатку Є](#) шляхом аналізу літературних параметризацій [62; 77; 78] для трьох характерних ділянок Дунаю (Верхнього, Середнього та Нижнього) і двох сезонів (зимово-весняного та літньо-осіннього). У таблиці Є.1 для кожної комбінації ділянки і сезону наведено два значення k_H – за

параметризацією А [77; 78] і за параметризацією В [56], а також відповідні стандартні відхилення.

У програмній реалізації значення k_H заносяться у довідкову таблицю на аркуші «Довідкові k_H » в незмінному вигляді, з повним повторенням структури таблиці Є.1. Звертання до цієї таблиці виконується у колонці С аркуша «Розрахунки» через комбінацію функцій INDEX та MATCH за двома ключами одночасно – назвою ділянки Дунаю та сезоном, що вводяться користувачем у колонках J і K аркуша «Вхідні дані рейсу». Перемикання між параметризаціями А та В здійснюється через поле випадаючого списку в заголовку рейсу – формула в колонці С перевіряє значення іменованого діапазону KH_Param і відповідно повертає або значення з колонки А, або з колонки В довідкової таблиці.

Окремою опцією для коректної роботи з рейсами, для яких є дані натурних вимірів k_H , передбачено колонку «Факт. k_H » (колонка L) на аркуші «Вхідні дані рейсу». Якщо в цій колонці введено значення, воно автоматично використовується замість довідкового через відповідну логіку у колонці D аркуша «Розрахунки» ($=IF(L_i <> "", L_i, k_H\_довідкове)$). Така архітектура реалізує принцип пріоритету експериментальних даних над літературними оцінками, який обґрунтовано в підпункті 3.4.1: невизначеність типу А (статистична оцінка натурних вимірів) має перевагу над невизначеністю типу В (літературна параметризація).

Шкала оцінювання рейсу за критерієм η , визначена в підпункті 4.2.5 у вигляді чотирьох інтервалів з відповідними інтерпретаціями («висока ефективність» для $\eta \leq 0,90$; «прийнятна» для $0,90 < \eta \leq 1,10$; «задовільна з резервами» для $1,10 < \eta \leq 1,30$; «неефективний рейс» для $\eta > 1,30$), реалізована на аркуші «Результати» через два механізми: формулу інтерпретації та умовне форматування.

Формула інтерпретації у клітинці інтерпретації Блоку 2 використовує вкладену конструкцію IF з трьома вкладеннями, що покроково порівнює значення η_{Trip} з пороговими значеннями 0,90, 1,10 та 1,30. У результаті в клітинці виводиться відповідне словесне визначення з підпункту 4.2.5. Окремою

умовою враховано відсутність опційного значення EE_{ref} – у такому разі замість оцінки виводиться повідомлення «Введіть EE_{ref} на аркуші «Вхідні дані», щоб побачити η ».

Колірне кодування інтерпретації реалізовано через умовне форматування клітинки оцінки з чотирма правилами, що відповідають чотирьом інтервалам шкали: зелена заливка для високої ефективності, синя – для прийнятної, жовта – для задовільної з резервами, червона – для неефективного рейсу. Пріоритет правил налаштовано так, щоб точкові порогові значення ($\eta = 0,90; 1,10; 1,30$) однозначно потрапляли у відповідну зону згідно з нерівностями, заданими у [підпункті 4.2.5](#).

Відносне порівняння двох рейсів за критерієм $\delta EE_{(fuel,norm)}$, описане в [підпункті 4.2.5](#), реалізоване в окремому підблоку аркуша «Результати». Користувач обирає два рейси з випадających списків, формованих з ідентифікаторів зафіксованих рейсів у журналі, після чого автоматично обчислюється відносна різниця їх показників нормованої енергоефективності за формулою $\delta = (EE_B - EE_A) / EE_A \cdot 100\%$. Інтерпретація отриманої різниці виконується за трирівневою шкалою з пороговими значеннями 5 % та 15 %, як визначено в [підпункті 4.2.5](#): «несуттєва різниця» при $|\delta| \leq 5\%$, «помірна – потрібен аналіз умов» при $5\% < |\delta| \leq 15\%$, «суттєва – потрібні управлінські рішення» при $|\delta| > 15\%$.

Чотири класи управлінських рішень, визначені в [підпункті 4.3.3](#) (Клас 1 – корекція швидкісного профілю, Клас 2 – вибір каравану, Клас 3 – еко-швидкість на мілководді або проводка, Клас 4 – технічне обслуговування головних двигунів), реалізовані в Блоці 3 аркуша «Результати» через систему автоматичних критеріїв активації. Три з чотирьох класів мають однозначні кількісні критерії активації і тому автоматизовані повністю: Клас 1 активується при наявності хоча б одного сегмента рейсу зі значенням η_{seg} , що перевищує 1,3 (формула COUNTIF за колонкою J аркуша «Розрахунки»); Клас 3 у поточній реалізації інструменту розділений на два підкласи з окремими критеріями активації, що відповідає двом різним типам гідрологічних ситуацій – підклас

«мілководдя (H/d)» активується при наявності хоча б одного сегмента з відношенням глибини до осадки H/d , меншим за 1,5 (формула COUNTIFS за колонкою I аркуша «Розрахунки» з урахуванням фактичної осадки d , введеної у заголовок рейсу). Підклас «проводка» активується при наявності хоча б одного сегмента типу «Проводка» (формула COUNTIF за колонкою O аркуша «Вхідні дані рейсу» – Seg_MoveType); на аркуші «Журнал рейсів» обидва підкласи мають окремі стовпчики статистики (R «Сегментів Класу 3 (H/d)» та S «Сегментів Класу 3 (проводка)»), що дозволяє розрізняти ці два типи ситуацій при ретроспективному аналізі; Клас 4 – при наявності хоча б одного сегмента з відношенням SFC_{act}/SFC_{ref} , що перевищує 1,1 (формула COUNTIF за колонкою L аркуша «Розрахунки», що вимагає введення опційних значень SFC_{ref} та індикаторної потужності P_i).

Клас 2 (вибір каравану) у поточній реалізації автоматично не активується, оскільки рішення про конфігурацію каравану є предметом стратегічного управлінського розгляду на основі сукупної оцінки кількох рейсів, а не одного поточного. Натомість підтримка цього класу рішень здійснюється через підблок δ -порівняння на аркуші «Результати» та через систему накопичення історії в журналі рейсів, що дозволяє користувачу-аналітику порівнювати різні конфігурації караванів між собою на основі реальних даних експлуатації.

Імовірна постановка задачі, викладена в [підпункті 3.4](#), передбачає урахування невизначеностей вхідних даних різного типу при оцінці енергоефективності. У поточній версії інструменту реалізована детермінована схема обчислень – кожен рейс оцінюється для конкретного набору вхідних значень, без явного інтегрування за невизначеностями. Натомість урахування невизначеностей здійснюється архітектурно – через механізми вибору джерела значень k_H та через окремі поля для введення фактичних натурних значень параметрів.

За стандартами класифікації невизначеностей за GUM, введеної в [підпункті 3.4.1](#), інструмент реалізує наступний принцип пріоритету: при наявності у користувача натурних вимірів параметра (невизначеність типу A)

вони використовуються в обчисленнях замість літературних параметризацій (невизначеність типу В). Цей принцип реалізовано для трьох ключових параметрів: для k_H через колонку «Факт. k_H » з пріоритетною формулою, описаною вище; для значень глибини фарватеру H_i та швидкості течії U_c через ручне введення в колонках Н і І аркуша «Вхідні дані рейсу» замість використання середніх сезонних значень; для індикаторної потужності P_i через колонку М, що дозволяє обчислити фактичне значення SFC_{act} та порівняти його з опорним SFC_{ref} за паспортними даними виробника.

Стандартні відхилення значень k_H , наведені в [таблиці Є.1](#), та фактичні діапазони варіації SFC , отримані з технічної документації головних двигунів, не використовуються безпосередньо в обчислювальному ядрі поточної версії, але є основою для подальшого розвитку інструменту в напрямку імовірнісної оцінки рейсу за методом Монте-Карло, перспективи якого розглянуто у висновках до дисертації.

Виконаний у цьому підпункті розгляд показує, що розроблений інструмент реалізує усі ключові елементи способу оцінки енергоефективності, обґрунтованого в розділах 3 та 4 дисертації: чотири дискретні індекси з розділу 3 (формули [\(3.17\)–\(3.20\)](#)) реалізовані як іменовані діапазони на аркуші «Розрахунки» з прямою відповідністю математичній нотації тексту дисертації; гідрологічна нормалізація через k_H реалізована через довідкову таблицю з [Додатку Є](#) та механізми пріоритету натурних даних над літературними; чотирирівнева шкала оцінювання за критерієм η з [підпункту 4.2.5](#) та трирівнева шкала δ -порівняння реалізовані через формули інтерпретації і умовне форматування; чотири класи управлінських рішень з [підпункту 4.3.3](#) – через систему автоматичних критеріїв активації (для трьох класів) та механізми порівняльного аналізу журналу (для четвертого). Архітектурна підтримка імовірнісного контексту з [підпункту 3.4](#) закладена у вигляді опційних полів для введення натурних значень з пріоритетом над літературними. Цим завершено формальну верифікацію відповідності інструменту науковому апарату способу.

У наступному підпункті 4.4.5 наведено демонстраційний приклад використання інструменту, що ілюструє роботу описаних механізмів на реальних даних рейсу.

4.4.5 Робочий цикл користувача та апробація на 14 рейсах УДП

У попередніх підпунктах 4.4.1–4.4.4 обґрунтовано призначення, архітектуру, інформаційну модель та обчислювальне ядро інструменту, а також доведено формальну відповідність його розрахункового апарату методиці, викладеній у розділах 3 та 4 дисертації. У цьому підпункті розглянуто практичне застосування інструменту: спершу описано робочий цикл взаємодії користувача з інструментом, далі наведено результати апробації на масиві даних реальних рейсів ПрАТ «Українське Дунайське пароплавство» (надалі – УДП), сформульовано зведений аналіз отриманих результатів та зафіксовано методичні обмеження проведеної апробації. Результати, наведені в підпункті, отримано на повному файлі інструменту версії 14 з зафіксованими у журналі рейсами, посегментна історія яких збережена на аркуші «Архів сегментів».

Мета апробації – продемонструвати працездатність запропонованого способу оцінки енергоефективності та підтвердити, що автоматичні критерії активації класів рішень, обґрунтовані в підпункті 4.3.3, дають змістовні результати на реальному неоднорідному масиві рейсів, що включає як штатні умови експлуатації, так і нештатні ситуації (мілководдя з проводками, рейс без транспортної роботи).

Робочий цикл взаємодії користувача (диспетчера або фахівця менеджменту оператора флоту) з інструментом складається з шести послідовних кроків, кожен з яких виконується на відповідному функціональному аркуші робочої книги. Послідовність кроків та аркушів узгоджена зі схемою потоку даних, наведеною на рис. 4.7 у [підпункті 4.4.2](#).

Крок 1 – введення параметрів рейсу. Користувач відкриває аркуш «Вхідні дані рейсу» та заносить у блок заголовка ідентифікатор рейсу $Trip\_ID$, дату, тип самохідного судна (вантажне, штовхач або буксир), масу власного вантажу (для вантажного судна) m_{ship} , кількість барж у каравані N_{barges} , загальну масу вантажу каравану M_{total} , осадку каравану d , параметризацію k_H (A або B) та

опційні параметри (ціна палива C_f , опорна питома витрата SFC_{ref} , опорна енергоефективність EE_{ref}). Нижче, у таблиці сегментів, для кожної ділянки маршруту вводиться довжина сегмента D_i , тривалість t_i , фактична витрата палива FC_i , маса вантажу m_i , глибина фарватеру H_i , ділянка Дунаю, сезон, тип руху («Сталий», «Проводка», «Очікування») та конфігурація каравану. Опційні поля (оберти головних двигунів, швидкість течії, фактичне k_H , індикаторна потужність P_i) заповнюються за наявності відповідних даних. Введення параметрів є єдиною дією користувача, що безпосередньо формує оцінювані вхідні дані.

Крок 2 – автоматичний перерахунок. При зміні будь-якого параметра на аркуші «Вхідні дані рейсу» інструмент автоматично виконує посегментні розрахунки на аркуші «Розрахунки» та формує підсумкові показники рейсу через систему іменованих діапазонів. Окремих дій від користувача на цьому кроці не передбачено: розрахунок є наслідком архітектурного принципу автоматичного перерахунку формул електронних таблиць, обґрунтованого в [підпункті 4.4.2](#).

Крок 3 – перегляд результатів. Користувач переходить на аркуш «Результати», де отримує числові значення п'яти індексів енергоефективності, словесну оцінку рейсу за критерієм η з колірною інтерпретацією за чотирирівневою шкалою ([підпункт 4.2.5](#)), діагностичні повідомлення про найкращий і найгірший сегменти та активовані класи рішень (Клас 1, Клас 3, Клас 4 – автоматично). Для рейсів без транспортної роботи ($M_{total} = 0$, тобто $\sum W = 0$) аркуш додатково відображає Блок 4 «Діагностика баластного рейсу» з показниками δ_{SFC} . Графічне подання поточного рейсу розміщене на аркуші «Графіки» (стовпчикова діаграма η_{seg} за сегментами, зіставлення EE_{disc} і $EE_{fuel,norm}$, економічна діаграма C_{var}).

Крок 4 – копіювання посегментної історії в Архів сегментів. Після завершення оцінки рейсу користувач переходить на аркуш «Буфер сегментів», на якому в *long*-форматі автоматично сформована проєкція активного рейсу (по одному рядку на кожен сегмент із усіма обчисленими показниками). Користувач

виділяє рядки, що відповідають поточному рейсу, копіює їх та вставляє «лише значення» у перший вільний рядок аркуша «Архів сегментів». Ця операція переводить посегментну історію рейсу зі стану «жива проєкція» в стан «зафіксований історичний запис», незалежний від поточного вмісту аркуша «Вхідні дані рейсу».

Крок 5 – фіксація рейсу в журналі. Користувач переходить на аркуш «Журнал рейсів», на якому у першому вільному рядку формули вже автоматично підставили зведені показники активного рейсу (індикатор «С» у колонці «Статус»). Для фіксації запису користувач виділяє рядок (колонки A:Y), копіює його та вставляє «лише значення» у той самий рядок. Після цієї операції формули в клітинках E:M замінюються статичними значеннями, індикатор статусу автоматично змінюється на «✓», а рядок виділяється світло-зеленою заливкою через умовне форматування. Сервісні колонки Z-AB («Обрати», «Ранг обраного», «Ранг всі») залишаються без заливки та використовуються для подальшого порівняльного аналізу.

Крок 6 – порівняльний аналіз. На аркушах «Графіки журналу» та «Порівняння рейсів» користувач переглядає динаміку показників за історією рейсів у вигляді чотирьох агрегованих діаграм (η , EE_{disc} проти $EE_{fuel,norm}$, C_{var} , $\sum FC$) та виконує вибіркові порівняння через відмітки «Так» у колонці «Обрати» журналу. За результатами цього аналізу формуються управлінські рекомендації, зокрема щодо Класу 2 рішень (вибір конфігурації каравану), як обґрунтовано в [підпункті 4.3.3](#).

Сумарний час на оцінку одного рейсу за наявності первинних даних рейсового журналу становить, за результатами проведеної апробації, у середньому 12–18 хвилин: близько 70 % часу витрачається на введення вхідних даних (аркуш «Вхідні дані рейсу» наведений у [Додатку 3](#), рис. 3.1), решта – на перегляд результатів, копіювання посегментної історії в Архів та фіксацію рядка журналу. Графічний аналіз на агрегованому рівні (кроки 6) виконується періодично, у міру накопичення достатньої вибірки зафіксованих рейсів.

Апробацію інструменту проведено на масиві з 14 реальних рейсів самохідних суден УДП, з яких 13 фактично виконані з караванами барж. Дані гідрологічних характеристик частково реконструйовані з урахуванням наявної за результатами п. 3.5.2 – 3.5.5 бази. У розрахунках використані значення гідрологічного множника k_H відповідно до сезонів періоду з березня 2018 по вересень 2020 року. Масив включає 12 вантажних рейсів за маршрутом Ізмаїл – Смедерево (тип судна – «Штовхач», параметризація k_H : А, Нижній і Середній Дунай), один експериментальний вантажний рейс на українській ділянці Дунаю (УДП Р 1, Ізмаїл – 54,2 миля, 25,25 км; рейс виконано лише в межах української ділянки у зв'язку з обмеженням перетину кордону) та один баластний рейс без транспортної роботи на ділянці 97–101 км Нижнього Дунаю. Сукупно у масиві зафіксовано 116 сегментів: 90 ходових сегментів типу «Сталий», 24 сегменти типу «Очікування» (шлюзування, простої), 2 сегменти типу «Проводка» (рейс УДП Р 5 «Знаменка», на сегментах з критичним мілководдям).

Конфігурація караванів в масиві варіюється від 2 до 6 барж, маса вантажу – від 0 т (баластний рейс УДП Р 14) до 9970 т (рейс УДП Р 1 «Механік Синилов»). Зведена характеристика всіх 14 рейсів наведена в табл. 4.9.

Таблиця 4.9 – Зведена характеристика масиву апробації

№	Позначення рейсу	Дата гідрологічної реконструкції k_H	Кількість барж	Маса вантажу M_{total} , т	Кількість сегментів n	Витрата палива за рейс $\sum FC$, кг	Критерій $\eta^{(r)}$	Активні класи (кількість сегментів)
1.	УДП Р 1	22.03.2018	5	9970	7	557	0,937	4 (2)
2.	УДП Р 2	10.11.2018	5	5762	9	12789	0,893	3 H/d (3)
3.	УДП Р 3	04.05.2018	3	3978	9	10431	1,087	–
4.	УДП Р 4	07.08.2018	2	2819	9	7716	1,101	–
5.	УДП Р 5	11.11.2018	5	5762	9	36808	2,569	1 (2), 3 H/d (3), 3 пров. (2)
6.	УДП Р 6	08.08.2020	5	7353	9	13604	0,744	–
7.	УДП Р 7	04.04.2020	6	9157	9	23423	1,061	–
8.	УДП Р 8	04.04.2020	2	2233	9	4895	0,909	–

9.	УДП Р 9	01.06.2020	6	8733	9	23485	1,082	–
10.	УДП Р 10	08.07.2020	6	9009	9	23368	1,043	–
11.	УДП Р 11	08.08.2020	6	8796	9	20680	0,946	–
12.	УДП Р 12	01.09.2020	5	7320	9	26184	1,439	1 (1), 3 H/d (2)
13.	УДП Р 13	01.09.2020	5	7320	9	17857	0,981	3 H/d (2)
14.	УДП Р 14	10.01.2020	0	0	1	417	баласт.	4 (1)

З таблиці 4.9 видно, що 11 рейсів з 14 (УДП Р 1 – 13) потрапляють у діапазон $\eta \in [0,744; 1,101]$ – нижні три зони шкали («висока ефективність», «прийнятна», «задовільна з резервами»). Два рейси з 14 (УДП Р 5 і 12) виходять за поріг $\eta > 1,3$ та активують Клас 1 рішень: УДП Р 5 з $\eta = 2,569$ потрапляє далеко за межу «неефективного» рейсу через виконання двох проводок на ділянках критичного мілководдя; УДП Р 12 з $\eta = 1,439$ також потрапляє у червону зону через перехід трьох сегментів у режим мілководдя з $H/d < 1,5$. Баластний рейс УДП Р 14 не має визначеного η через нульову транспортну роботу, але для нього активовано Клас 4 через діагностику стану головних двигунів. Чотири з наведених 14 рейсів обрано надалі як ілюстративні сценарії, що покривають різні режими роботи інструменту.

Сценарій 1. Типовий рейс без особливостей – УДП Р 8 «Zaporozhye» ілюструє роботу інструменту на типовому рейсі, виконаному у штатних умовах експлуатації, без активацій діагностичних класів рішень. Як приклад обрано рейс УДП Р 8 «Zaporozhye» з реконструкцією гідрологічних характеристик на квітень 2020 року за маршрутом Ізмаїл – Смедерево, 2 баржі, маса вантажу $M_{total} = 2233$ т, 9 сегментів (7 ходових типу «Сталий» та 2 шлюзування типу «Очікування»). Розрахунковий критерій ефективності рейсу $\eta = 0,909$, що потрапляє у середину зони «прийнятна» ($0,90 < \eta \leq 1,10$) шкали з підпункту 4.2.5 і у блоці інтерпретації аркуша «Результати» виділяється відповідним кольором (Додаток 3, Рис. 3.2).

Показники рейсу, отримані на аркуші «Розрахунки» та виведені на аркуші «Результати», становлять:

- детермінований індекс $EE_{disc} = 2,15 \cdot 10^{-3}$ кг/(т·км);
- нормований індекс $EE_{fuel,norm} = 1,82 \cdot 10^{-3}$ кг/(т·км);
- детермінований індекс викидів $EE_{CO_2,disc} = 6,70 \cdot 10^{-3}$ кг CO₂/(т·км);
- нормований індекс викидів $EE_{CO_2,norm} = 5,66 \cdot 10^{-3}$ кг CO₂/(т·км);
- економічний показник $C_{var} = 5,45 \cdot 10^{-2}$ грн/(т·км);
- сумарна витрата палива за рейс $\sum FC = 4895$ кг;
- сумарні викиди $\sum CO_2 = 15,24$ т.

Посегментна діагностика дає такі результати (Додаток 3, рис. 3.2). Значення η_{seg} на ходових сегментах варіюється у вузькому діапазоні від 0,857 до 0,953 (тобто всі сегменти знаходяться у зоні «висока ефективність» або «прийнятна»); найкращий сегмент рейсу – № 4 («Оряхово – 700 р. км») з $\eta_{seg} = 0,857$, найгірший – № 1 («Ізмаїл – Рені») з $\eta_{seg} = 0,953$. Жоден сегмент не перевищує поріг $\eta_{seg} > 1,3$, тому Клас 1 рішень не активується. На п'яти з семи ходових сегментів відношення H/d перебуває у діапазоні 1,73–2,01 (мілководдя присутнє, але не критичне в усталеному режимі), жоден сегмент не падає нижче порогу $H/d < 1,5$, тому Клас 3 рішень також не активується. Опційні дані SFC_{ref} та індикаторної потужності P_i для цього рейсу не вводилися, відповідно Клас 4 рішень не діагностується.

Таким чином, оцінка рейсу УДП Р 8 в інструменті інтерпретується як «типовий штатний рейс» без активних діагностичних повідомлень. Така ситуація становить нормальний випадок для більшості рейсів, виконаних у штатних умовах експлуатації, і саме цей вигляд аркуша «Результати» бачить диспетчер у переважній більшості оцінок. Подальша робота з рейсом полягає у його фіксації в журналі за стандартною процедурою з кроку 5 робочого циклу.

Сценарій 2. Робота інструменту на рейсі, виконаному у нештатних гідрологічних умовах, що вимагали переходу до технології проводки. Як приклад обрано рейс УДП Р 5 «Знаменка» з реконструкцією гідрологічних характеристик на листопад 2018 року за маршрутом Ізмаїл – Смедерево, 5 барж, маса вантажу $M_{total} = 5762$ т. Рейс складається з 9 сегментів, з яких 5 – типу

«Сталий», 2 – типу «Очікування» (шлюзування), 2 – типу «Проводка» (сегменти 4 «Оряхово – 700 р. км» та 5 «700 – Залізні ворота 2»). У результаті на сегментах 4 і 5 каравану з 5 барж довелося послідовно проходити кожну ділянку $2N - 1 = 9$ разів (5 проходів штовхача з однією баржею за напрямком рейсу, 4 повернення порожнем за наступною баржею).

Розрахунковий критерій ефективності рейсу $\eta = 2,569$, що значно перевищує верхній поріг шкали $\eta > 1,30$ і потрапляє у зону «неефективного рейсу» (червоний маркер, див. [Додаток 3](#), рис. 3.3). Сумарна витрата палива $\sum FC = 36808$ кг – приблизно у 2,9 рази більша, ніж у рейсі УДП Р 2 теплоходу «Знаменка» за аналогічним маршрутом з тим самим судном і подібною самою конфігурацією 5 барж ($\sum FC = 12789$ кг, $\eta = 0,893$). Така розбіжність між двома рейсами одного судна свідчить про домінуючий вплив проводок на загальну енергоефективність рейсу.

Посегментна діагностика дає такі результати, рис. 4.8. На сегментах 4 і 5 (типу «Проводка») інструмент автоматично множить введену користувачем витрату палива FC за один прохід штовхача на коефіцієнт $2N - 1 = 9$, обчислюючи FC_{eff} . Для сегмента 4 $FC = 353,3$ кг (один прохід штовхача), $FC_{eff} = 3179,3$ кг (фактична витрата на проводку каравану); для сегмента 5 $FC = 2649,2$ кг, $FC_{eff} = 23842,4$ кг. Відношення глибини до осадки H/d на цих сегментах становить 1,19 (для обох сегментів), що нижче порогу 1,5 – Клас 3 «мілководдя (H/d)» активується. Додатково на сегменті 6 «Простій, шлюзування» $H/d = 1,18$, що також активує Клас 3 (відомий випадок коли судно перебуває у мілководних умовах у вузлі очікування).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Розрахунки за сегментами рейсу														
2	Аркуш-обчислювач. Не редагуйте — всі значення обчислюються автоматично.														
3															
4	№	Назва ділянки	k_1 (з довідника)	k_2 (застосований)	Транспортна робота W_t , т·км	Нормована $W_{t, норм}$, т·км	CO_2 викиди $CO_{2, i}$, т	Швидкість судна v_i , км/год	Глибина / осадка H/d (опц.)	Параметр η_{seg} (опц.)	SFC_{act} , г/(кВт·год)	$\Delta SFC = SFC_{act}/SFC_{ref}$	Коментар діагностики	FC_{eff} , кг (з урахуванням проводки)	N_t , кВт·год
5	1	Ізмаїл - Рені (97 - 127 р. км)	1,220	1,220	172 845,0	210 870,9	1,6499	10,00	3,82	1,256				529,83	
6	2	Рені - Джурджу (127 - 493 р. км)	1,220	1,220	2 102 947,5	2 565 596,0	18,1488	11,06	3,89	1,136				5 828,13	
7	3	Джурджу - Оряхово (493-675 р. км)	1,220	1,220	1 054 354,5	1 286 312,5	9,8973	10,17	3,29	1,235				3 178,33	
8	4	Оряхово - 700 (675 - 700 р. км)	1,220	1,220	144 037,5	175 725,8	9,9005	7,14	1,19	9,046			Клас 3: мілководдя (причина проводки).	3 179,34	
9	5	700 - Запізні ворота 2 (700 - 863 р. км)	1,220	1,220	939 124,5	1 145 731,9	74,2451	10,87	1,19	10,405			Клас 3: мілководдя (причина проводки).	23 842,35	
10	6	Простий, шлюзування	1,220	1,220	0,0	0,0	0,0996	0,00	1,18				Клас 3: $H/d < 1.5$.	32,00	
11	7	Запізні ворота 2 - Запізні ворота 1 (863 - 942 р. км)	1,220	1,220	455 158,5	555 293,4	0,2890	11,29	3,39	0,084				92,82	
12	8	Простий, шлюзування	1,220	1,220	0,0	0,0	0,0996	0,00	3,39					32,00	
13	9	Запізні ворота 1 - Смедерево (942 - 1116 р. км)	1,220	1,220	1 002 501,0	1 223 051,2	0,2890	10,88	2,01	0,038				92,82	
14	Підсумки по рейсу														
15					ΣFC , кг	36 807,6									
16					ΣW (транспортна робота), т·км	5 870 969									
17					ΣW_{norm} , т·км	7 162 582									
18					ΣCO_2 , т	114,619									
19					ΣD (відстань), км	1 019,0									
20					Σt (час руху), год	97,5									
21					$EE_{disc} = \Sigma FC / \Sigma W$, кг/(т·км)	0,0063									
22					$EE_{CO_2, disc} = \Sigma CO_2 / \Sigma W$, т/(т·км)	1,952E-02									
23					$EE_{fuel, norm} = \Sigma FC / \Sigma W_{norm}$, кг/(т·км)	0,0051									
24					$EE_{CO_2, norm}$, т/(т·км)	1,600E-02									
25					$C_{var} = EE_{fuel, norm} \cdot C_f$, грн/(т·км)	0,154									
26					$\eta = EE_{fuel, norm} / EE_{ref}$	2,569									
27		IsBallast (баластний рейс):				ЛОЖЬ									
28					Найкращий сегмент (мін. η): № 9—Запізні ворота 1 - Смедерево (942 - 1116 р. км) ($\eta = 0,038$)										
29					Найгірший сегмент (макс. η): № 5—700 - Запізні ворота 2 (700 - 863 р. км) ($\eta = 10,405$)										
30		$\Sigma (N_t \cdot t)$, кВт·год			0,0										
31															
32															
33															
34															
35															
36															
37															
38															
39															
40															
41															
42															
43															
44															
45															
46															
47															
48															
49															
50															
51															
52															
53															
54															
55															
56															
57															
58															
59															
60															
61															
62															
63															
64															
65															
66															
67															
68															
69															
70															
71															
72															
73															
74															
75															
76															
77															
78															
79															
80															
81															
82															
83															
84															
85															
86															
87															
88															
89															
90															
91															
92															
93															
94															
95															
96															
97															
98															
99															
100															
101															
102															
103															
104															
105															
106															
107															
108															
109															
110															
111															
112															
113															
114															
115															
116															
117															
118															
119															
120															
121															
122															
123															
124															
125															
126															
127															
128															
129															
130															
131															
132															
133															
134															
135															
136															
137															
138															
139															
140															
141															
142															
143															
144															
145															
146															
147															
148															
149															
150															
151															
152															
153															
154															
155															

Рисунок 4.8 – Аркуш «Розрахунки» для рейсу УДП Р 5 «Знаменка» з проводками

Значення η_{seg} на сегментах-проводках становлять $\eta_{seg} = 9,046$ (сегмент 4) і $\eta_{seg} = 10,405$ (сегмент 5), що візуально виглядає як аномально великі значення. Фізично ці значення є коректними: вони відображають вартість багаторазового проходження ділянки каравану і не свідчать про надмірну швидкість руху або неоптимальний режим роботи головних двигунів. Виходячи з означення η_{seg} як відношення FC_{eff} на одиницю транспортної роботи сегмента до опорного EE_{ref} , значення $\eta_{seg} \approx 9\text{--}10$ на проводках є прямим наслідком множника $2N - 1 = 9$ у формулі FC_{eff} (підпункт 4.4.3, логіка проводок). Інструмент відповідно активує Клас 1 рішень на інших ходових сегментах рейсу, де $\eta_{seg} > 1,3$ не з причини проводки. У результатах діагностики для УДП Р 5 наведено: Клас 1 (2 сегменти типу «Сталий»), Клас 3 «мілководдя (H/d)» (3 сегменти), Клас 3 «проводка» (2 сегменти).

Інтерпретація для диспетчера: висока загальна неефективність УДП Р 5 не є наслідком надмірної швидкості або неоптимального завантаження каравану, а

є прямим наслідком гідрологічної ситуації, яка вимагала виконання проводок. Управлінська рекомендація, що формується на основі цієї діагностики, належить до Класу 2 (перегляд конфігурації каравану) і Класу 3 (планування рейсів з огляду на сезонну динаміку рівня води у Дунаї): для рейсів у періоди прогнозованого падіння рівня води на критичних ділянках доцільно зменшувати кількість барж у каравані для уникнення проводок, навіть ціною збільшення кількості рейсів. Інструмент при цьому надає кількісну основу для такого рішення через зведений аналіз журналу.

Сценарій 3. Робота інструменту на рейсі з найкращим показником енергоефективності у масиві апробації. Як приклад обрано рейс УДП Р 6 теплоходу «Zvezdnyu» з реконструкцією гідрологічних характеристик на серпень 2020 року за маршрутом Ізмаїл – Смедерево, 5 барж, маса вантажу $M_{total} = 7353$ т, 9 сегментів (7 ходових типу «Сталий» та 2 шлюзування). Розрахунковий критерій ефективності $\eta = 0,744$, що потрапляє у зону «висока ефективність» ($\eta \leq 0,90$) шкали і у блоці інтерпретації аркуша «Результати» виділяється зеленим маркером.

Показники рейсу: детермінований індекс $EE_{disc} = 1,82 \cdot 10^{-3}$ кг/(т·км), нормований індекс $EE_{fuel,norm} = 1,49 \cdot 10^{-3}$ кг/(т·км), що приблизно на 18 % нижче за УДП Р 8 «Zaporozhye» (сценарій 1). Сумарна витрата палива $\sum FC = 13604$ кг, сумарні викиди $\sum CO_2 = 42,36$ т. Посегментне значення η_{seg} на ходових сегментах варіюється у вузькому діапазоні від 0,425 (сегмент 4) до 0,754 (сегмент 7), що свідчить про рівномірно ефективний режим руху каравану на всьому маршруті. Жодних класів рішень не активовано.

Інтерпретація для диспетчера: рейс УДП Р 6 за поточними даними є еталонним і може використовуватися як орієнтир для подальших рейсів того ж судна або аналогічних суден дунайського флоту. Інструмент дозволяє виконати кількісне порівняння будь-якого нового рейсу з цим еталоном через підблок δ -порівняння на аркуші «Результати» (підпункт 4.4.3). Наприклад, δ -порівняння УДП Р 6 з найгіршим рейсом масиву УДП Р 5 «Знаменка» дає $\delta EE_{fuel,norm} = +245$ % (нормована енергоефективність УДП Р 5 у 3,45 разу гірша

за еталон УДП Р 6), що значно перевищує поріг 15 % шкали і вимагає управлінської уваги. Зазначене порівняння формалізує спостереження сценарію 2 щодо домінантного впливу проводок на загальну енергоефективність.

Сценарій 4 ілюструє роботу інструменту на діагностичному рейсі без транспортної роботи. Як приклад обрано рейс УДП Р 14 теплоходу «Борис Макаров» з реконструкцією гідрологічних характеристик на січень 2020 року, виконаний штовхачем без вантажу ($M_{total} = 0$) на ділянці 97–101 км Нижнього Дунаю довжиною 3,8 км, 1 сегмент тривалістю 1 година. У такому рейсі сумарна транспортна робота $\sum W = 0$, тому показники енергоефективності EE_{disc} , $EE_{fuel,norm}$, $EE_{CO2,disc}$, $EE_{CO2,norm}$, C_{var} та критерій η не визначені (ділення на нуль). Замість числових значень інструмент явно повертає текстове повідомлення «Баластний рейс – EE не визначена» у відповідних клітинках аркуша «Результати», а в блоці інтерпретації η – текст «Баластний рейс – оцінка за шкалою η не застосовна» (рис. 4.9).

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Результати оцінки енергоефективності рейсу							
2	Рейс: Борис Макаров, Ізмаїл - 97-101 км, УДП Р 14							
3								
4	Блок 1. Числові показники енергоефективності							
5	Показник	Формула			Значення	Од. виміру		
6	EE _{diac}	SFC / ΣW			Баластний рейс — EE не визначена	кг палива / (т·км)		
7	EE _{CO2, diac}	ΣCO ₂ / ΣW			Баластний рейс — EE не визначена	кг CO ₂ / (т·км)		
8	EE _{fuel, norm}	SFC / Σ(W·k _n)			Баластний рейс — EE не визначена	кг палива / (т·км)		
9	EE _{CO2, norm}	ΣCO ₂ / Σ(W·k _n)			Баластний рейс — EE не визначена	кг CO ₂ / (т·км)		
10	C _{var}	EE _{fuel, norm} · C _г / 1000			Баластний рейс — EE не визначена	грн / (т·км)		
11	Загальна відстань Σ D	сума D _i			3,8	км		
12	Загальний час Σ t	сума t _i			1,0	год		
13	Загальна витрата Σ FC	сума FC _i			417,5	кг		
14	Загальні викиди Σ CO ₂	сума CO _{2i}			1,300	т		
15								
16								
17	Блок 2. Оцінка ефективності за критерієм $\eta = EE_{fuel, norm} / EE_{ref}$							
18	Значення η :	Не застосовується для баластного рейсу			Не застосовно для баластного рейсу			
19								
20	Шкала:	$\eta \leq 0,90$ — висока ефективність	$0,90 < \eta \leq 1,10$ — прийнятна	$1,10 < \eta \leq 1,30$ — задовільна з резервами	$\eta > 1,30$ — неефективний			
21								
22	Порівняння з іншим рейсом за $\delta EE_{fuel, norm}$							
23	Рейс А (база):				EE _{fuel, norm} (А):			
24	Рейс В (порівнюваний):				EE _{fuel, norm} (В):			
25	Рейсів у журналі:	14						
26	$\delta EE_{fuel, norm}$, %:	Вибірть два рейси з журналу			Інтерпретація:	—		
27								
28	Блок 3. Діагностика сегментів і рекомендації							
29	Найкращий сегмент:	немає даних						
30	Найгірший сегмент:	немає даних						
31								
32	Активні класи рішень:							
33	Клас 1: не застосовується для баластного рейсу (немає η)							
34	Клас 3: не застосовується для баластного рейсу (немає η)							
35	Клас 4 (техстан ГД): виявлено 1 сегментів з $\delta\_SFC > 1,1$ — перевірте техстан головних двигунів							
36								
37	Примітка: тригер Класу 3 використовує фактичну осадку α , введену у заголовку рейсу. Для баластних рейсів ($M_{load} = 0$, всі $m_i = 0$; $\Sigma W = 0$) Класи 1, 2 і 3 не активуються, оскільки η та EE_{norm} не визначені. Активним лишається лише Клас 4 (SFC_{act}), що дозволяє діагностувати стан ГД на основі питомої витрати палива.							
38								
39	Блок 4. Діагностика баластного рейсу							
40	Активний лише для рейсів без транспортної роботи ($M_{load} = 0$, всі $m_i = 0$). EE-показники не визначені; оцінка обмежена діагностикою стану ГД.							
41	Середньозважений SFC _{act} , г/(кВт·год):	283,6						
42	$\delta_{SFC} = SFC_{act} / SFC_{ref}$:	1,289						
43	Активний клас:	Клас 4 (техстан ГД): $\delta\_SFC > 1,1$ — перевірте техстан головних двигунів						
44	Σ FC, кг:	417,480						
45	Σ CO ₂ , т:	1,300						
46								
		Вхідні дані рейсу	Довідкові k _H	Розрахунки	Результати	Графіки	Журнал	

Рисунок 4.9 – Аркуш «Результати» для баластного рейсу УДП Р 14 «Борис Макаров»

Виявлення баластного рейсу виконується через іменований діапазон *IsBallast*, що набуває значення TRUE при виконанні умови $\sum FC > 0$ і $\sum W = 0$. При *IsBallast* = TRUE на аркуші «Результати» автоматично з'являється Блок 4 «Діагностика баластного рейсу» (підпункт 4.4.3), у якому виводяться: фактична питома витрата палива SFC_{act} , обчислена за фактичною витратою палива та індикаторною потужністю N_i ; відношення $\delta_{SFC} = SFC_{act}/SFC_{ref}$; активний клас діагностики (Клас 1 і Клас 3 не активуються через відсутність η_{seg} і H/d діагностики на одному сегменті, але Клас 4 працює нормально незалежно від $\sum W$); сумарна витрата палива $\sum FC$ та сумарні викиди $\sum CO_2$.

Для УДП Р 14 у блоці діагностики наведено: фактична витрата палива $FC = 417,48$ кг за 1 годину при індикаторній потужності $P_i = 1472$ кВт, що дає $SFC_{act} \approx 283,6$ г/(кВт·год). При паспортному значенні $SFC_{ref} = 220$ г/(кВт·год) для головних двигунів 8NVD48A-2U SKL відношення $\delta_{SFC} = 283,6 / 220 \approx 1,289$, що значно перевищує поріг 1,1, передбачений для активації Класу 4 рішень (підпункт 4.3.3). На аркуші «Результати» в Блоці 4 виводиться повідомлення про активацію Класу 4 з рекомендацією щодо проведення параметричної діагностики головних двигунів.

У відповідь на рекомендацію інструменту на т/х «Борис Макаров» 10.01.2020 виконано детальну параметричну діагностику двох головних двигунів за допомогою системи *DEPAS D4.0H*, методика і результати якої викладено в роботі [86]. Діагностика включала: визначення індикаторних потужностей кожного циліндра через автоматичний запис індикаторних діаграм; визначення дійсних фаз газорозподілу і фаз подачі палива через віброакустичний аналіз з контактним вібродатчиком *VS-20*; аналітичну синхронізацію даних для точного визначення положення верхньої мертвої точки і коректного розрахунку середнього індикаторного тиску. За результатами діагностування виявлено комплекс дефектів паливної апаратури та газорозподілу обох головних двигунів (лівий ГД1: ревзія клапанів циліндрів 4, 6 і 8, ревзія форсунок циліндрів 5 і 8, ревзія плунжерної пари циліндра 7; правий ГД2: ревзія плунжерної пари циліндра 3, ревзія випускних клапанів циліндрів 4, 5, 6, ревзія форсунки

циліндра 8 [86]). Усунення виявлених дефектів та подальше балансування циліндрових потужностей дозволяє повернути SFC_{act} у межі паспортного діапазону і відповідно знизити δ_{SFC} нижче порогу 1,1, що деактивує Клас 4 при наступній оцінці рейсу.

Сценарій 4 демонструє ключову методологічну особливість запропонованого способу: інструмент зберігає працездатність на рейсах без транспортної роботи через спеціалізований Блок 4 діагностики, що дозволяє використовувати його для широкого спектра експлуатаційних ситуацій, включно з технологічними рейсами штовхача без каравану. Зв'язок «оцінка енергоефективності $\rightarrow$ активація Класу 4 $\rightarrow$ реальна параметрична діагностика $\rightarrow$ виявлення та усунення дефектів головних двигунів» є практичним підтвердженням ролі інструменту як засобу підтримки прийняття управлінських рішень, а не лише засобу пасивного моніторингу.

Зведений аналіз результатів апробації виконується на аркушах «Графіки журналу» (агрегована візуалізація динаміки показників) та «Порівняння рейсів» (вибірковий аналіз обраних рейсів). У межах цього підпункту наведено основні підсумки зведеного аналізу масиву з 14 рейсів.

Розподіл рейсів за зонами шкали η має такий вигляд: у зону «висока ефективність» ($\eta \leq 0,90$) потрапляють 2 рейси (УДП Р 6 «Звездний» з $\eta = 0,744$ та УДП Р 2 «Знаменка» з $\eta = 0,893$); у зону «прийнятна» ($0,90 < \eta \leq 1,10$) – 7 рейсів (УДП Р 1, Р 3, Р 4, Р 7, Р 8, Р 9, Р 10, Р 11, Р 13 – з η у діапазоні 0,909–1,101, з яких УДП Р 4 з $\eta = 1,101$ розташований на самій верхній межі зони); у зону «задовільна з резервами» ($1,10 < \eta \leq 1,30$) рейсів не потрапляє; у зону «неефективний рейс» ($\eta > 1,30$) потрапляють 2 рейси (УДП Р 5 «Знаменка» з $\eta = 2,569$ та УДП Р 12 «Zaporozhye» з $\eta = 1,439$); 1 рейс (УДП Р 14 «Борис Макаров») класифікується окремо як баластний без визначеного η . Зведене значення $\eta_{\text{середнє}}$ для 13 вантажних рейсів становить 1,17, що формально перебуває у зоні «задовільна з резервами», але це усереднення спотворене двома аномальними рейсами УДП Р 5 і УДП Р 12. Медіанне значення для повної вибірки 13 вантажних рейсів $\eta_{\text{медіана}} = 1,043$ (рейс УДП Р 10), що потрапляє у

верхню частину зони «прийнятна». Робастна оцінка центральної тенденції з виключенням двох аномальних рейсів (УДП Р 5 і Р 12) дає $\eta_{\text{медіана}} = 0,981$ (рейс УДП Р 13) – це значення є більш репрезентативним для штатних умов експлуатації і потрапляє у середину зони «прийнятна».

Статистика частоти активації класів рішень по масиву апробації наведена в табл. 4.10.

Таблиця 4.10 – Частота активації класів рішень у масиві апробації

Клас рішень	Критерій активації	Рейси з активацією	Частка від 14 рейсів
Клас 1 (швидкісний профіль)	$\eta_{seg} > 1,3$	УДП Р 5, УДП Р 12	14 %
Клас 3 (мілководдя H/d)	$H/d < 1,5$	УДП Р 2, УДП Р 5, УДП Р 12, УДП Р 13	29 %
Клас 3 (проводка)	тип руху – «Проводка»	УДП Р 5	7 %
Клас 4 (стан ГД)	$\delta_{SFC} > 1,1$	УДП Р 1, УДП Р 14	14 %

З таблиці 4.10 видно, що в масиві апробації найчастіше активується Клас 3 за критерієм мілководдя (4 рейси з 14, або 29 %) – це є очікуваним результатом для окремих ділянок Нижнього Дунаю з типово малими глибинами фарватеру у меженний період. Класи 1 і 4 активуються рідше (по 14 %), причому Клас 4 для УДП Р 1 «Механік Синилов» і УДП Р 14 «Борис Макаров» спрацьовує тільки тому, що для цих двох рейсів у вхідних даних була зазначена індикаторна потужність P_i (необхідна для розрахунку SFC_{act}); для решти 12 рейсів УДП значення P_i не заносилося, через що Клас 4 для них не міг бути діагностований навіть за наявності фактичних відхилень питомої витрати палива (це обмеження зафіксовано окремо у переліку методичних обмежень нижче). Клас 3 за критерієм проводки активується тільки для УДП Р 5 – єдиного рейсу в масиві, на якому каравану довелося долати критичне мілководдя в режимі багаторазового проходження.

Сумарні показники масиву апробації становлять: загальна витрата палива по 14 рейсах $\sum FC_{total} \approx 222214$ кг, сумарні викиди CO_2 $\sum \text{CO}_{2total} \approx 692,0$ т. Найбільший внесок у загальну витрату палива дає рейс УДП Р 5 з проводками (36808 кг, або 16,6 % від загальної витрати по 14 рейсах, при тому що рейс становить лише $1/14 \approx 7$ % від кількості рейсів) – це наочно підтверджує доцільність окремої уваги до рейсів цього типу при формуванні управлінських рекомендацій.

Кореляційний аналіз показників журналу не входить у обсяг поточної реалізації інструменту, проте візуальний огляд агрегованих діаграм на аркуші «Графіки журналу» (Додаток 3, рис. 3.4) дозволяє зробити такі якісні спостереження: рейси з більшою масою вантажу (УДП Р 1, Р 7, Р 9, Р 10, Р 11) переважно мають кращі або порівнянні значення η , ніж рейси з меншою масою вантажу – це підтверджує загальне положення про сприятливий вплив повного завантаження каравану на енергоефективність; рейси з конфігурацією 2 баржі (УДП Р 4, Р 8) показують значення η на верхній межі зони «прийнятна» ($\eta = 1,101$ і $0,909$ відповідно), що може вказувати на менш сприятливий гідродинамічний режим малого каравану. Кількісне підтвердження цих спостережень потребує ширшої статистичної вибірки, накопичення якої передбачено у перспективах подальшого розвитку інструменту.

Проведена апробація має низку методичних обмежень, які важливо явно зафіксувати для коректної інтерпретації отриманих результатів та для обґрунтування напрямів подальшого розвитку інструменту. Обмеження сформульовано у шести положеннях.

Перше обмеження – реконструкція гідрології. Для всіх 13 вантажних рейсів УДП у масиві апробації значення глибини фарватеру H_i та швидкості течії U_c на сегментах не вимірювалися безпосередньо під час рейсу і не наявні у первинних рейсових журналах. Замість натурних вимірів використано реконструйовані значення з гідрологічної бази Дунайської Комісії для відповідного періоду на відповідній ділянці Дунаю. Таке заміщення відповідає застосуванню літературних параметризацій (невизначеність типу В за

класифікацією GUM, [підпункт 3.4.1](#)), а не натурних даних (тип А). Це впливає на точність розрахункового множника k_H та відношення H/d , тому активація Класу 3 «мілководдя (H/d)» для рейсів УДП у поточній апробації має кваліфікацію «розрахункова, на основі реконструкції гідрології», а не «верифікована за натурними вимірами».

Друге обмеження – усереднена швидкість. Для вантажних рейсів у вхідних даних тривалість t_i на окремих сегментах вводилася на основі загальної тривалості рейсу та її пропорційного розподілу за довжинами сегментів, а не з фактичних рейсових журналів з посегментним хронометражем. Це означає, що швидкість руху $v_i = D_i/t_i$ на сегментах є усередненою за весь рейс, а не фактичною посегментною швидкістю. Зазначене обмеження знижує дискримінативність діагностики на швидкісно-неоднорідних маршрутах, де реальна швидкість руху може варіюватися від сегмента до сегмента через зміну гідрологічних умов або обмежень швидкості на окремих ділянках.

Третє обмеження – відсутність індикаторної потужності для більшості рейсів. Для 12 вантажних рейсів (УДП Р 2 – Р 13) у вхідних даних не заносилася індикаторна потужність P_i головних двигунів через відсутність відповідних даних у первинних рейсових журналах. Через це фактична питома витрата палива $SFC_{act} = FC_i/(P_i \cdot t_i)$ не може бути обчислена, і Клас 4 (стан головних двигунів через критерій δ_{SFC}) для цих рейсів не діагностується. Клас 4 у поточній апробації активується лише для двох рейсів (УДП Р 1 т/х «Механік Синилов» і УДП Р 14 т/х «Борис Макаров»), для яких P_i доступна. Це обмеження впливає на повноту діагностичної картини масиву, але не на коректність роботи інструменту: при наявності P_i Клас 4 спрацьовує коректно (підтверджено сценарієм 4).

Четверте обмеження – семантика тривалості t на сегментах-проводках. У поточній реалізації інструменту тривалість t_i на сегменті типу «Проводка» інтерпретується як час одного проходу штовхача (з однією баржею), а не як сумарний час проходження каравану в режимі $(2N - 1)$ проходів. Відповідно, швидкість $v_i = D_i/t_i$ у колонці Н аркуша «Розрахунки» є швидкістю одного

проходу штовхача, а не швидкістю переміщення каравану за рейсом. Фактичний час проводки каравану дорівнює $t_i \cdot (2N - 1)$ і неявно враховується через обчислення $FC_{eff} = FC_i \cdot (2N - 1)$. При інтерпретації значень швидкості v_i для сегментів-проводок користувачу слід враховувати цю особливість семантики.

П'яте обмеження – візуально аномальні значення η_{seg} на сегментах-проводках. Як показано у сценарії 2, на сегментах типу «Проводка» значення η_{seg} може досягати 9–10 одиниць, що візуально виглядає як «надзвичайна неефективність». Фізично ці значення коректні і є прямим наслідком множника $2N - 1$ у формулі FC_{eff} , проте при графічному поданні на аркуші «Графіки» вони можуть домінувати на діаграмі η_{seg} за сегментами рейсу і ускладнювати інтерпретацію значень η_{seg} на ходових сегментах того ж рейсу. У поточній реалізації цей ефект пом'якшено через забезпечення автоматичного коментаря діагностики, що пояснює природу аномальних значень, але повне розв'язання потребує введення окремої шкали для сегментів-проводок (перспектива подальшого розвитку).

Шосте обмеження – баластний рейс поза шкалою η . Як показано у сценарії 4, для рейсів без транспортної роботи ($M_{total} = 0$) показники енергоефективності EE_{disc} , $EE_{fuel,norm}$, η та C_{var} не визначені, оскільки відповідні формули містять ділення на $\sum W = 0$. У поточній реалізації для таких рейсів виконується лише діагностика стану головних двигунів через Блок 4 (критерій Класу 4). Загальна оцінка ефективності баластного рейсу за іншими критеріями (наприклад, питома витрата палива на одиницю часу, на одиницю пройденої відстані або на одиницю потужності) у поточній методиці не реалізована і винесена за межі обсягу дослідження.

Перелічені шість методичних обмежень не зменшують прикладної цінності інструменту в межах основного завдання – оцінки енергоефективності рейсу з караваном барж та обґрунтування експлуатаційних рішень на її основі. Усі обмеження пов'язані або з властивостями первинних даних (обмеження 1, 2, 3), або з особливостями поточної реалізації (4, 5, 6), які можуть бути усунені у подальших версіях інструменту за наявності розширеної первинної інформації

або після уточнення методики. Перспективи розширення функціональності інструменту, що дозволять зняти частину цих обмежень (зокрема, інтеграція з прогнозним блоком на основі AR(1) та автоматизованим імпортом даних з бортових систем), розглянуто у [підрозділі 5.5](#) та у [висновках](#) до дисертації.

Виконана у цьому підпункті апробація інструменту на масиві з 14 реальних рейсів УДП демонструє працездатність запропонованого способу оцінки енергоефективності у широкому спектрі експлуатаційних умов: від типових штатних рейсів (сценарій 1) до нештатних ситуацій з проводками каравану на мілководних ділянках (сценарій 2) і технологічних рейсів штовхача без транспортної роботи (сценарій 4). Автоматичні критерії активації класів рішень, обґрунтовані в [підпункті 4.3.3](#), дають змістовні результати на реальному неоднорідному масиві: Клас 1 спрацьовує на 2 рейсах з $\eta > 1,3$, Клас 3 – на 4 рейсах з мілководними сегментами, Клас 4 – на 2 рейсах з наявною індикаторною потужністю та фактичним перевищенням питомої витрати палива. Зведений аналіз журналу показує медіанне значення $\eta_{\text{медіана}} = 1,043$ для повної вибірки з 13 вантажних рейсів і $\eta_{\text{медіана}} = 0,981$ для робастної вибірки з 11 рейсів (з виключенням аномальних УДП Р 5 і УДП Р 12), що в обох випадках відповідає зоні «прийнятної» ефективності та виділяє два аномальних рейси, що потребують управлінської уваги. Ширшу апробацію інструменту на повному наборі даних реальних рейсів дунайського флоту та обговорення накопичених бенчмаркових значень розглянуто у розділі 5 у контексті імовірнісного розширення способу; узагальнення результатів підрозділу 4.4 у складі загальних результатів розділу 4 наведено у висновках до розділу 4.

Висновки до четвертого розділу

У розділі 4 розв'язано загальні задачі ГЗ-3 (розроблення способу оцінки енергоефективності рейсу самохідного судна з караваном барж) та ГЗ-4 у частині детермінованої апробації способу на даних реальних рейсів. На основі інтегральної та дискретної моделей розділу 3 сформовано систему показників, формалізовано спосіб оцінки, розроблено алгоритми обґрунтування експлуатаційних рішень, реалізовано програмний інструмент підтримки прийняття рішень та виконано апробацію на масиві з 14 реальних рейсів ПрАТ «Українське Дунайське пароплавство». Основні результати розділу подано нижче.

1. Сформовано замкнену систему показників енергоефективності рейсу самохідного судна з караваном барж на дунайському судноплавному шляху, що включає базовий інтегральний індекс EE та аналогічний індекс інтенсивності викидів EE_{CO_2} (формули (3.9)–(3.11) розділу 3), дискретні паливний EE_{disc} і вуглецевий $EE_{CO_2, disc}$ індекси (формули (3.17)–(3.18)), гідрологічно нормовані індекси $EE_{fuel, norm}$ і $EE_{CO_2, norm}$ (формули (3.19)–(3.20)) та економічний показник C_{var} (формула (3.23)). Методологічна новизна системи полягає в одночасному поєднанні гідрологічної нормалізації транспортної роботи через множник k_H з урахуванням структури часу рейсу (повний хід, проводки, маневрування, шлюзування) та змінної конфігурації каравану, що відрізняє запропоновану систему від існуючих міжнародних індексів енергоефективності ($EEDI$, $EEOI$, CII , $EEXI$), розроблених для морських суден без урахування специфіки внутрішніх водних шляхів.

2. Розроблено формалізований спосіб оцінки енергоефективності, що структурує застосування системи показників у вигляді послідовності кроків: формування вхідних даних з трьох груп джерел (рейсові експлуатаційні, гідрологічні, техніко-економічні), поділ рейсу на сегменти та формування вектора стану кожного сегмента, розрахункові схеми для основних і нормованих індексів, правила врахування особливих випадків (відсутність гідрологічних даних, проводки на критичному мілководді, баластні рейси), критерії та

чотирирівнева шкала оцінювання за критерієм η з трирівневою шкалою δ -порівняння рейсів. Цим розв'язано ГЗ-3 технологічної карти у частині формалізації способу.

3. Розроблено систему алгоритмів обґрунтування експлуатаційних рішень, що включає три часові горизонти застосування способу: ретроспективний аналіз і корекція політики експлуатації (після завершення рейсу), підтримка рішень при плануванні рейсу (перед його початком) та оперативна корекція в ході рейсу (при суттєвих відхиленнях фактичних умов від прогнозних). Алгоритми оперують чотирма класами типових управлінських рішень – корекція швидкісного профілю (Клас 1), вибір конфігурації каравану (Клас 2), еко-швидкість на мілководді (Клас 3) та технічне обслуговування головних двигунів (Клас 4) – з явними кількісними критеріями активації, що дозволяє автоматизувати діагностичну частину прийняття рішень.

4. Виконано програмну реалізацію способу у вигляді інструменту підтримки прийняття рішень на основі електронних таблиць формату OOXML (.xlsx). Інструмент має модульну архітектуру з десяти функціональних аркушів, реалізує 7796 формул на основі 62 іменованих діапазонів і не використовує макропрограм, що забезпечує його портативність, безпечність та прозорість обчислень. Обчислювальне ядро інструменту реалізує всі формули моделі розділу 3 з прямою відповідністю математичної нотації, гідрологічну нормалізацію через довідкову таблицю k_H з Додатку Є з механізмом пріоритету натурних даних над літературними та чотирьохрівневу шкалу оцінювання за критерієм η з умовним форматуванням.

5. Виконано апробацію інструменту на масиві з 14 реальних рейсів ПрАТ «Українське Дунайське пароплавство» (13 вантажних рейсів самохідних суден з караванами 2–6 барж за маршрутом Ізмаїл – Смедерево та один баластний рейс на Нижньому Дунаї) сукупним обсягом 116 сегментів. Апробація підтвердила працездатність способу у широкому спектрі експлуатаційних умов – від типових штатних рейсів до нештатних ситуацій з проводками каравану на критичному мілководді та технологічних рейсів штовхача без транспортної роботи.

Чотирирівнева шкала оцінювання за критерієм η дала змістовні результати: 11 рейсів потрапили у зони «висока» і «прийнятна» ефективності з $\eta \in [0,744; 1,101]$, 2 рейси (УДП Р 5 і УДП Р 12) кваліфіковані як «неефективні» з активацією відповідних класів рішень; медіанне значення для повної вибірки 13 вантажних рейсів $\eta_{\text{медіана}} = 1,043$, для робастної вибірки 11 рейсів (без аномальних) $\eta_{\text{медіана}} = 0,981$. Цим розв'язано ГЗ-4 технологічної карти у частині детермінованої апробації способу.

6. Підтверджено діагностичну спроможність автоматичних критеріїв активації класів рішень: у масиві апробації Клас 1 активувався на 14 % рейсів (з $\eta_{\text{seg}} > 1,3$), Клас 3 за критерієм мілководдя ($H/d < 1,5$) – на 29 % рейсів, Клас 4 за критерієм $\delta_{\text{SFC}} > 1,1$ – на 14 % рейсів. У сценарії баластного рейсу УДП Р 14 т/х «Борис Макаров» інструмент діагностував перевищення питомої витрати палива ($\delta_{\text{SFC}} \approx 1,289$), що ініціювало детальну параметричну діагностику головних двигунів за системою *DEPAS D4.0H* та виявлення комплексу дефектів паливної апаратури і газорозподілу обох ГД. Цей зв'язок «оцінка енергоефективності → активація Класу 4 → фактична діагностика → виявлення дефектів» є практичним підтвердженням ролі інструменту як засобу підтримки прийняття управлінських рішень.

7. Зафіксовано шість методичних обмежень проведеної апробації, пов'язаних з реконструйованим характером гідрологічних даних 12 з 13 вантажних рейсів (тип В невизначеності за *GUM*), усередненою швидкістю руху по сегментах, відсутністю індикаторної потужності головних двигунів у 12 рейсах, семантикою тривалості сегментів-проводок, аномально великими значеннями η_{seg} на сегментах-проводках і відсутністю шкали оцінювання для баластних рейсів. Обмеження мають архітектурний, а не принципний характер і визначають конкретні напрями подальшого розвитку способу та інструменту, які розглядаються у розділі 5 дисертації.

У сукупності викладені у пунктах 1–7 результати забезпечують повне розв'язання головної задачі ГЗ-3 у всіх її допоміжних задачах: ДЗ-3.1 (структура показника енергоефективності з можливістю нормування – підрозділ 4.1), ДЗ-3.2

(математичні залежності впливу складу каравану і гідрологічних параметрів – підрозділи 4.1, 4.2), ДЗ-3.3 (урахування профілю режимів роботи головної енергетичної установки, включно з режимами проводок через множник $(2N - 1)$ – підпункти 4.2.4, 4.4.3, 4.4.4) та ДЗ-3.4 (алгоритм практичного застосування способу – підрозділи 4.3 і 4.4). Головна задача ГЗ-4 розв’язана частково: ДЗ-4.1 (збір і опрацювання експлуатаційних даних масиву з 14 рейсів УДП – підпункт 4.4.5) виконана повністю; ДЗ-4.3 (оцінка потенціалу експлуатаційної оптимізації) виконана частково через демонстрацію чотирьох сценаріїв з активацією класів управлінських рішень у підпункті 4.4.5, з повноцінною кількісною оцінкою у розділі 5. Допоміжна задача ДЗ-4.2 (порівняння результатів запропонованого способу з оцінками за існуючими методиками *EEOI* та іншими) у розділі 4 не розв’язана за обсягом і переноситься у підрозділ 5.2 для цілісного зіставлення на повному масиві апробованих рейсів. Отримані у розділі 4 результати створюють методологічну й інструментальну основу для імовірнісного розширення способу оцінки енергоефективності на базі $AR(1)$ -моделі гідрологічних рядів і Монте-Карло симуляції, для порівняння з існуючими методиками оцінки енергоефективності та для формування практичних рекомендацій операторам флоту і органам управління судноплавством, що детально розглядається у розділі 5.

Основні наукові результати по розділу наведені в працях здобувача [66–69; 72; 76; 85–87; 90–100].

РОЗДІЛ 5

ПРОГНОЗНЕ РОЗШИРЕННЯ СПОСОБУ І ЙОГО ВПРОВАДЖЕННЯ В ПРАКТИКУ ДУНАЙСЬКОГО СУДНОПЛАВСТВА

У розділах 1–4 дисертаційного дослідження послідовно розв’язано перші три головні задачі технологічної карти ([Додаток Г](#)). Четверта головна задача – ГЗ-4, що полягає в експериментально-аналітичній перевірці розробленого способу та оцінці його наукової і практичної ефективності, – за результатами розділу 4 розв’язана лише частково: виконано збір і опрацювання експлуатаційних даних на ділянках Дунаю різних класів (допоміжна задача ДЗ-4.1) та детерміновану апробацію способу на масиві з 14 реальних рейсів ПрАТ «Українське Дунайське пароплавство». Поза розв’язанням залишилися допоміжна задача ДЗ-4.2 (порівняння результатів запропонованого способу з оцінками за існуючими методиками) та повна реалізація допоміжної задачі ДЗ-4.3 (оцінка потенціалу способу для експлуатаційної оптимізації). Завершення розв’язання ГЗ-4, а отже й досягнення загальної мети дослідження, становить предмет цього розділу.

Метою розділу 5 є завершення експериментально-аналітичної перевірки способу шляхом апробації його прогностного (імовірнісного) розширення, кількісного зіставлення з чинними методиками оцінки енергоефективності внутрішнього водного транспорту, оцінки очікуваного ефекту від упровадження та формування практичних рекомендацій операторам флоту й органам управління судноплавством. На відміну від розділу 4, де спосіб апробовано в детермінованій постановці, у розділі 5 перевіряється його прогностна спроможність, що ґрунтується на імовірнісному узагальненні моделі ([п. 3.4](#)) та авторегресійному прогнозі гідрологічних умов Дунаю ([п. 3.5](#)).

Структурно розділ побудовано таким чином. У підрозділі 5.1 апробовано прогностний блок методики – поєднання Монте-Карло симуляції рейсу з авторегресійним прогнозом рівнів води Дунайської Комісії – на узагальненому

прикладі транзитного дунайського рейсу та на масиві реальних рейсів УДП; кількісно показано звуження імовірнісного інтервалу прогнозованої енергоефективності при переході від безумовного до прогнозного режиму, чим завершено експериментальну перевірку імовірнісної складової способу. У [підрозділі 5.2](#) виконано порівняння результатів запропонованого способу з оцінками за стандартним індексом *EEOI* та іншими методиками енергоефективності внутрішнього водного транспорту, чим розв’язано допоміжну задачу ДЗ-4.2. У [підрозділі 5.3](#) надано повну кількісну оцінку ефекту від упровадження способу – потенціалу економії палива, зниження викидів CO₂ та поліпшення показників енергоефективності, – що завершує розв’язання допоміжної задачі ДЗ-4.3. У [підрозділі 5.4](#) на основі отриманих результатів сформульовано практичні рекомендації операторам дунайського флоту та органам управління судноплавством щодо застосування способу. У [підрозділі 5.5](#) окреслено перспективи подальших досліджень, зокрема напрями розвитку способу та його інструментальної реалізації, а також можливості поширення способу на інші класи суден внутрішнього плавання.

Таким чином, у сукупності з результатами розділів 1–4 розв’язання задач, виконане в розділі 5, забезпечує повне розв’язання четвертої головної задачі ГЗ-4 у всіх її допоміжних складових (ДЗ-4.1 – ДЗ-4.3) і тим самим – розв’язання всіх головних задач дисертаційного дослідження (ГЗ-1 – ГЗ-4), передбачених технологічною картою, що в сукупності означає досягнення поставленої мети роботи.

5.1 Апробація прогнозного блоку методики

У [розділі 4](#) розроблений спосіб оцінки енергоефективності рейсу самохідного судна з караваном барж було реалізовано у детермінованому вигляді та апробовано на масиві з 14 реальних рейсів ПрАТ «Українське Дунайське пароплавство». Детермінована схема дає точкову оцінку показників для конкретного набору вхідних значень, однак не відображає реальної мінливості енергоефективності, зумовленої гідрологічною, експлуатаційною й технічною невизначеністю умов рейсу. Імовірнісне узагальнення моделі ([п. 3.4](#)) та його

прогностичне розширення на основі авторегресійних моделей рівнів води Дунаю (п. 3.5) усувають це обмеження, перетворюючи показник енергоефективності з детермінованого числа на випадкову величину з визначеними розподілом, імовірнісним інтервалом та імовірністю перевищення нормативу (на даний час не встановлено) або заданого цільового рівня. Цей підрозділ присвячено апробації прогностного блоку методики у його програмній реалізації – робочій книзі *MonteCarlo_EE_Danube_v2.xlsx*, що поєднує Монте-Карло симуляцію рейсу (п. 3.4) з авторегресійним прогнозом гідрологічних умов (п. 3.5).

Апробацію виконано у два кроки. Спочатку прогностний блок демонструється на узагальненому прикладі повного транзитного рейсу Дунаєм (Ізмаїл – Регенсбург, 5 ділянок) – це дозволяє показати роботу методики в широкому діапазоні гідрологічних умов: від глибоководного Нижнього Дунаю до інтенсивно шлюзованого Верхнього. Далі результати співвідносяться з реальним масивом 14 рейсів УДП розділу 4 у вигляді короткого імовірнісного зрізу, що пов’язує прогностну методику з фактичними даним експлуатації, не дублюючи детермінованої апробації п. 4.4.5.

5.1.1 Призначення прогностного блоку та його місце в методиці

Прогностний блок є інструментальним завершенням двох послідовних узагальнень детермінованого способу. Перше узагальнення (п. 3.4) трактує компоненти вектора стану рейсу – глибину фарватеру H , швидкість течії U_c , масу вантажу m_{cargo} , швидкість відносно берега v_g , питому витрату палива SFC , гідрологічний множник k_H та пропульсивний ККД η_{prop} – як випадкові величини з заданими розподілами, а інтегральний показник EE – як випадкову величину, статистичні характеристики якої (математичне сподівання, дисперсія, квантилі, ймовірність перевищення нормативу (після його встановлення) або заданого цільового рівня) обчислюються методом Монте-Карло. Друге узагальнення (п. 3.5) замінює *безумовні* розподіли глибин фарватеру F_{H_i} на *умовні* розподіли $F_{H_i}(\cdot | W_0)$, сформовані на основі актуального вектора рівнів води W_0 на опорних водомірних постах напередодні виходу та авторегресійного прогнозу їх розвитку на горизонт рейсу.

Відповідно до цього прогнозний блок реалізує два режими роботи. У *безумовному* режимі параметри розподілів глибин беруться як кліматологічні (багаторічні середні та стандартні відхилення для відповідної ділянки й сезону) – отримана оцінка EE характеризує типову мінливість енергоефективності для заданого маршруту й сезону без прив'язки до конкретної гідрологічної ситуації. У *умовному* (прогнозному) режимі параметри розподілів глибин замінюються прогнозними значеннями, отриманими з AR(1)-моделей рівнів води за фактичним станом W_0 – отримана оцінка EE є прогнозом енергоефективності конкретного запланованого рейсу з урахуванням наявної гідрологічної інформації. Різниця між двома режимами кількісно відображає інформаційну цінність оперативних гідрологічних даних для планування рейсу, що є центральним результатом цього підрозділу (п. 5.1.5).

Прогнозний блок займає у структурі способу проміжне положення між імовірнісною моделлю (теоретичний апарат, п. 3.4–3.5) та алгоритмами обґрунтування експлуатаційних рішень (п. 4.3): він постачає алгоритму перспективного планування (п. 4.3.5) розподіли прогнозних глибин і відповідні значення гідрологічного множника, на основі яких генеруються та оцінюються кандидатні сценарії рейсу. На відміну від детермінованого інструмента розділу 4, який оцінює завершений або повністю визначений рейс, прогнозний блок працює в умовах неповної інформації про майбутній стан судноплавного шляху.

5.1.2 Вхідні дані прикладу та налаштування симуляції

Узагальнений приклад відтворює повний висхідний транзитний рейс самохідного судна з караваном барж від Ізмаїла (Нижній Дунай) до Регенсбурга (Верхній Дунай) загальною довжиною 2257 км, поділений на п'ять квазісталих ділянок за критеріями п. 4.2.2 (зміна гідрологічної зони, класу водного шляху, конфігурації каравану та режиму руху). Характеристики ділянок наведено в табл. 5.1. Послідовність ділянок охоплює всі характерні гідроморфологічні режими дунайського судноплавного шляху: глибоководний Нижній Дунай ($\Delta 1$), перехідну зону через гідровузли «Залізні ворота» ($\Delta 2$), мілководну зону

Середнього Дунаю ($\Delta 3$) та інтенсивно шлюзовані регульовані ділянки Верхнього Дунаю ($\Delta 4$, $\Delta 5$).

Таблиця 5.1 – Характеристики ділянок узагальненого прикладу рейсу

№	Ділянка	Довжина D_i , км	Тип руху на ділянці	Клас AGN	Конфігу- рація
1.	$\Delta 1$: Ізмаїл–Силистра	260	З вантажем, глибока вода	VII	3:3
2.	$\Delta 2$: Силистра–Залізні ворота	480	З вантажем, шлюзування	VII	3:3
3.	$\Delta 3$: Залізні ворота–Будапешт	680	З вантажем, мілководдя	VI-b	2:2
4.	$\Delta 4$: Будапешт–Відень	280	З вантажем, шлюзування	VI-b	2:1
5.	$\Delta 5$: Відень–Регенсбург	557	З вантажем, інтенсивне шлюзування	VI-b	2:1

Для кожної ділянки задано розподіли шести компонент вектора стану та одного загального для рейсу фактора – пропульсивного ККД η_{prop} (п. 3.4.2). Глибина фарватеру H , швидкість течії U_c , швидкість v_g , питома витрата палива SFC і гідрологічний множник k_H описуються усіченим нормальним розподілом (для глибини усічення знизу виконується на фізичному рівні $H \geq d$: судно не рухається там, де глибина фарватеру менша за осадку каравану, що реалізовано як $H = \max(d, N(\mu, \sigma))$). Маса вантажу m_{cargo} описується трикутним розподілом, пропульсивний ККД η_{prop} – трикутним розподілом на інтервалі $[0,52; 0,68]$ з модою 0,60 (обґрунтування вибору типів розподілів наведено у п. 3.4). Гідрологічний множник k_H не задається як незалежна випадкова величина, а обчислюється в кожній реалізації як похідна від згенерованої глибини за параметризацією А (Додаток Є) за референтної осадки $d = 2,0$ м. Такий підхід усуває можливість фізично суперечливих сполучень великої глибини з високим значенням множника й узгоджує приклад з означенням k_H як функції гідродинамічного підвектора (формула 3.21). Параметри (математичні сподівання) ключових факторів по ділянках наведено в табл. 5.2; стандартні

відхилення глибин відображають кліматологічну (безумовну) невизначеність рівнів води і зменшуються вздовж течії від Нижнього до Верхнього Дунаю відповідно до зростання коефіцієнта авторегресії φ (п. 3.5).

Таблиця 5.2 – Математичні сподівання входних факторів по ділянках

Ділянка	H , м	U_c , км/год	m_{cargo} , Т	v_g , км/год	SFC , г/(кВт·год)
$\Delta 1$	6,5	3,0	9000	14	215
$\Delta 2$	4,5	4,0	7500	12	220
$\Delta 3$	3,2	3,5	6000	10	230
$\Delta 4$	3,8	3,2	4500	11	225
$\Delta 5$	3,5	3,8	3000	10	220

Гідрологічний множник у таблиці не наводиться, оскільки він є похідною величиною: за наведеними середніми глибинами ділянок (табл. 5.2) і референтної осадки $d = 2,0$ м відношення H/d складає відповідно 3,25; 2,25; 1,60; 1,90; 1,75, чому за параметризацією А відповідають значення $k_H \approx 1,05$; 1,09; 1,15; 1,12; 1,13 для $\Delta 1$ – $\Delta 5$ відповідно (обчислення наведено в табл. Є.4 Додатку Є; значення нижчі за кліматологічні значення табл. Є.1, оскільки приклад відповідає рейсу за сприятливих рівнів води). Пропульсивний ККД η_{prop} задається спільним для рейсу (трикутний розподіл [0,52; 0,68], мода 0,60).

Кількість реалізацій Монте-Карло прийнято $N = 1000$, що забезпечує стандартну похибку оцінки математичного сподівання EE на рівні $\frac{\sigma_{EE}}{\sqrt{N}} \approx 0,5$ % і є достатнім для стійкого ранжування факторів за внеском у дисперсію (п. 5.1.4); за потреби підвищення точності квантильних оцінок кількість реалізацій може бути збільшена до 5000–10000 без зміни структури книги. Конверсійний фактор палива у викиди CO_2 прийнято $CF = 3,206$ т CO_2 /т палива; умовне цільове значення для оцінки ймовірності перевищення прийнято на рівні 30 г CO_2 /(т·км); це не регуляторний норматив (для внутрішнього судноплавства такого не встановлено), а орієнтир порядку типового галузевого показника викидів, відносно якого оцінюється ризик невідповідності, зокрема за контрактними зобов'язаннями. Генерація випадкових значень виконується вбудованими

функціями NORMINV(RAND();;) для нормально розподілених величин (для глибини – у поєднанні з MAX для усічення знизу на рівні осадки) та оберненим перетворенням для трикутного розподілу; гідрологічний множник обчислюється в кожній реалізації за параметризацією A з відповідної згенерованої глибини. Перерахунок усієї книги (понад 61 тис. формул) ініціюється клавішею F9. Для строгої відтворюваності результатів стандартний генератор RAND() може бути замінений детермінованою квазिवипадковою послідовністю Соболя або Хаммерслі (п. 3.4); у базовому варіанті методики, орієнтованому на практичне застосування в судноплавних компаніях, достатньо стандартного генератора за умови фіксації (збереження статичних значень) однієї задокументованої реалізації.

5.1.3 Результати Монте-Карло симуляції (безумовний режим)

З метою отримання розподілу показника енергоефективності виконано 1000 реалізацій рейсу в безумовному режимі. В результаті отримано емпіричний розподіл інтегрального показника вуглецевої енергоефективності EE_{CO_2} , статистичні характеристики якого наведено в табл. 5.3, а гістограму – на рис. 5.1. Розподіл є одномодальним з помірною правосторонньою асиметрією, що відповідає фізичній природі показника: несприятливі сполучення малих глибин і високих швидкостей дають порівняно рідкі, але великі за величиною значення EE , формуючи витягнутий правий хвіст. Математичне сподівання показника становить $E[EE_{CO_2}] = 11,58$ г CO₂/(т·км) за стандартного відхилення $\sigma_{EE} = 1,93$ г CO₂/(т·км), що відповідає коефіцієнту варіації $CV = 16,6\%$ – помітна, але не екстремальна мінливість, типова для рейсів зі змішаними гідрологічними умовами.

Таблиця 5.3 – Статистичні характеристики показника EE_{CO_2} (безумовний режим, $N = 1000$)

Характеристика	Значення
Математичне сподівання $E[EE_{CO_2}]$, г CO ₂ /(т·км)	11,58
Стандартне відхилення σ_{EE} , г CO ₂ /(т·км)	1,93

Коефіцієнт варіації CV , %	16,6
Медіана (квантиль 0,50)	11,36
Квантиль 0,05	8,84
Квантиль 0,95	15,15
95 %-імовірнісний інтервал	[8,53; 16,09]
Мінімум / максимум	7,38 / 20,58
Імовірність $EE > 30$ (цільовий рівень)	0

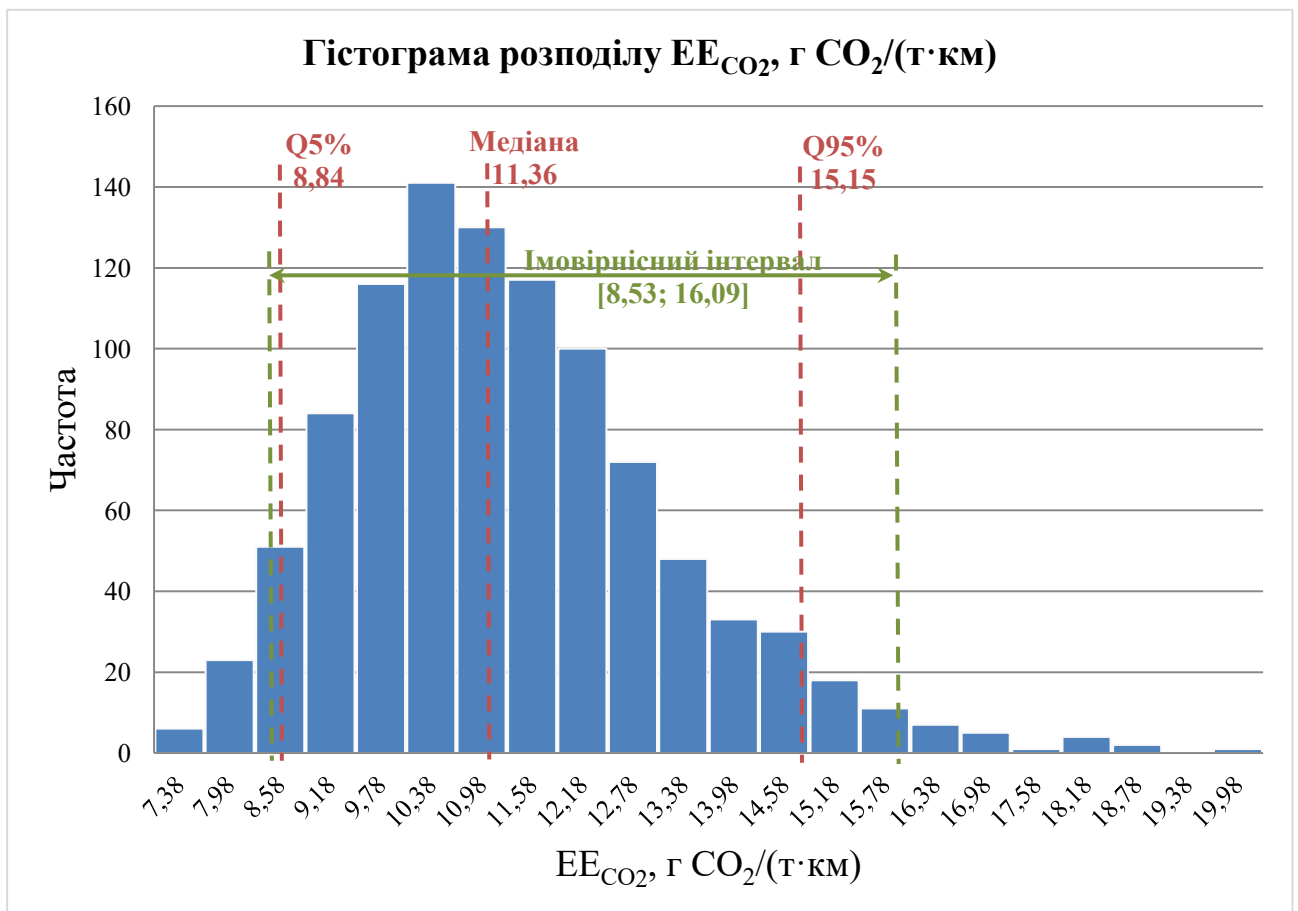


Рисунок 5.1 – Емпіричний розподіл показника енергоефективності EE_{CO_2}
(безумовний режим)

Медіана показника (11,36 г $CO_2/(т \cdot км)$) дещо менша за математичне сподівання, що підтверджує правосторонню асиметрію розподілу. 95 %-імовірнісний інтервал [8,53; 16,09] г $CO_2/(т \cdot км)$ має ширину 7,56 г $CO_2/(т \cdot км)$ – це і є кількісна міра мінливості енергоефективності рейсу за безумовної (кліматологічної) гідрологічної невизначеності. Ймовірність перевищення

прийнятого цільового рівня 30 г CO₂/(т·км) дорівнює нулю, оскільки навіть максимальне значення вибірки (20,42) залишається істотно нижчим за цей рівень; це означає, що для розглянутого типу рейсу й конфігурації каравану енергоефективність стабільно краща за типовий галузевий показник, тож ризик невідповідності прийнятому цільовому рівню практично відсутній. Для рейсів з гіршими гідрологічними умовами або меншим завантаженням ця ймовірність може набувати ненульових значень, і саме її оцінка є практично значущим виходом методики для обґрунтування контрактних зобов'язань.

5.1.4 Аналіз чутливості та пріоритезація факторів

Попередній аналіз чутливості (*screening*) виконано за коефіцієнтами рангової кореляції Спірмена ρ між кожним із семи випадкових входів та підсумковим показником EE_{CO_2} за всіма N реалізаціями. Відносну важливість факторів оцінено нормованим показником $S_j = \rho_j^2 / \sum \rho^2$, що зводить квадрати рангових коефіцієнтів до одиничної суми; цей показник застосовується як інструмент попереднього ранжування за силою монотонного зв'язку, а не як точна декомпозиція дисперсії (для останньої потрібні методи на основі дисперсії – індекси Соболя, *FAST*). Результати ранжування наведено в табл. 5.4 і візуалізовано у вигляді діаграми Парето на рис. 5.2.

Таблиця 5.4 – Ранжування незалежних факторів за нормованим показником рангового впливу (*screening*)

Ранг	Фактор	ρ Спірмена	ρ^2	S_j
1	Середня глибина фарватеру H	−0,571	0,326	0,516
2	Швидкість відносно берега v_g	0,449	0,202	0,319
3	Пропульсивний ККД η_{prop}	−0,288	0,083	0,131
4	Питома витрата палива SFC	0,142	0,020	0,032
5	Швидкість течії U_c	0,029	0,001	0,001
6	Маса вантажу m_{cargo}	−0,002	0,000	0,000

У табл. 5.4 гідрологічний множник k_H не включено до ранжування, оскільки він є детермінованою функцією глибини H (п. 5.1.2) і його вплив повністю врахований у внеску глибини.

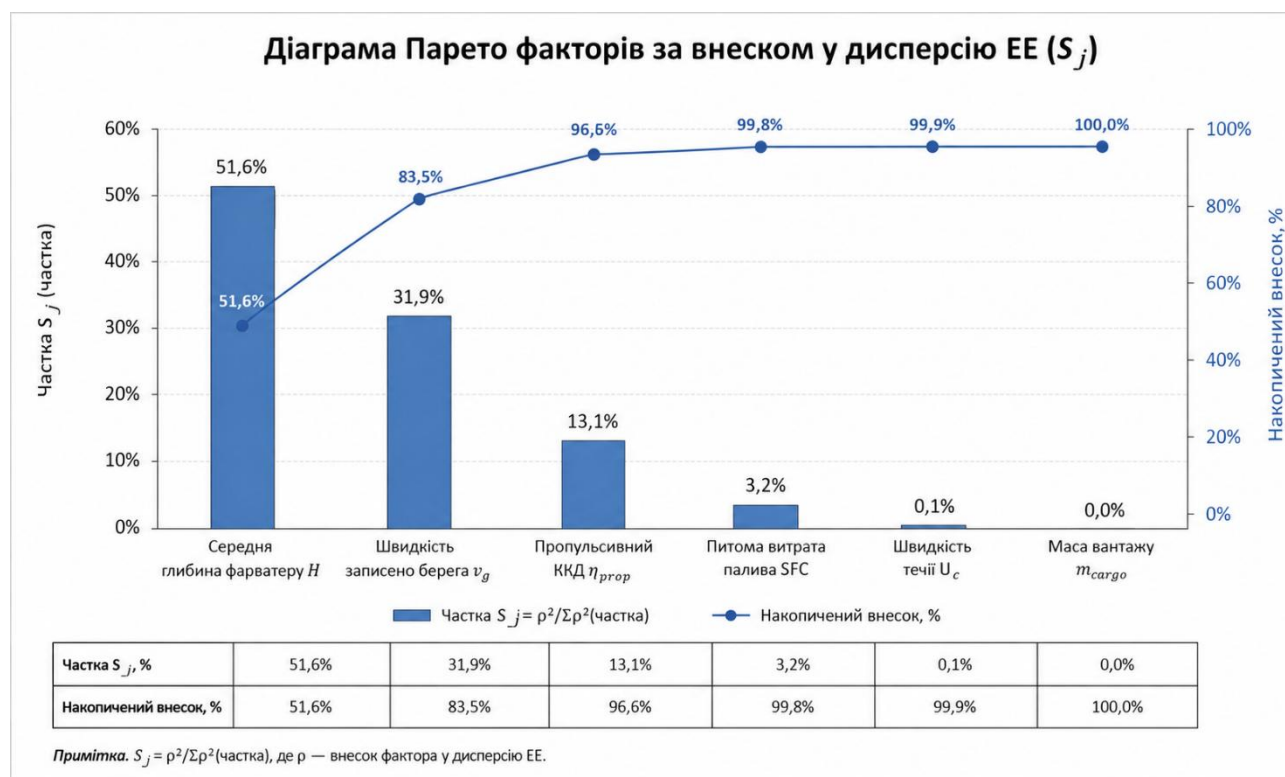


Рисунок 5.2 – Ранжування факторів за нормованим показником рангового впливу на енергоефективність (*screening*)

Аналіз чутливості виявляє чітку ієрархію впливу факторів. Домінуючим є гідродинамічний блок: глибина фарватеру H ($S_j = 0,516$) та швидкість руху v_d ($S_j = 0,319$) разом дають понад 83 % сумарного нормованого рангового показника, тобто за результатами скринінгу домінують у формуванні розкиду енергоефективності. Від’ємний знак рангового коефіцієнта для глибини ($\rho = -0,571$) відображає фізично очікувану закономірність: зменшення глибини під кілем посилює мілководний опір і підвищує питому витрату палива, погіршуючи ЕЕ. Додатний знак для швидкості ($\rho = 0,449$) відповідає кубічній залежності опору від швидкості. Третім за значущістю є пропульсивний ККД η_{prop} ($S_j = 0,131$), внесок якого підтверджує доцільність виокремлення його як самостійної стохастичної компоненти моделі (п. 3.3). Питома витрата палива SFC посідає четверте місце ($S_j = 0,032$). Зростання частки глибини порівняно з

варіантом, де множник k_H трактувався незалежно, прямо впливає з того, що ефект мілководдя тепер повністю реалізується через єдину величину H .

Прикметним є практично нульовий безпосередній внесок швидкості течії U_c ($S_j = 0,001$) та маси вантажу m_{cargo} ($S_j \approx 0,000$). Це уточнює механізм дії гідрологічного фактора: оскільки множник k_H обчислюється безпосередньо з глибини, уся гідрологічна невизначеність каналізується через єдину величину H (мілководний опір), а не розподіляється між глибиною та окремим нормувальним множником. Практичний висновок з аналізу чутливості однозначний: пріоритетними напрямками підвищення енергоефективності рейсу для розглянутого типу суден є гнучке маршрутно-часове планування з урахуванням прогнозу глибин та раціональний вибір швидкісного режиму, тоді як модернізація ГЕУ (зниження SFC) та оптимізація завантаження дають істотно менший відносний ефект. Саме домінування глибини за результатами скрінінгу EE обґрунтовує доцільність прогнозного режиму, розглянутого в наступному підпункті.

5.1.5 Прогнозний режим: звуження імовірнісного інтервалу енергоефективності

Як показано в п. 5.1.4, основним джерелом дисперсії показника енергоефективності є невизначеність глибини фарватеру. Прогнозний блок методики (п. 3.5) дозволяє істотно зменшити цю невизначеність, замінюючи кліматологічні (безумовні) розподіли глибин $F_{H_i}(h)$ на умовні розподіли

$$F_{H_i}(h|W_0), \quad (5.1)$$

сформовані на основі актуального вектора рівнів води W_0 на опорних постах та AR(1)-прогнозу їх розвитку на горизонт рейсу з подальшою трансляцією рівнів у глибини фарватеру через лінійні залежності $H = a + b \cdot W$ (формули 3.39–3.40). Розрахунок прогнозу для дати виходу 15 червня (середній за водністю рік) дає по опорних постах режими від нормального (Регенсбург, Будапешт) до маловодного (Силистра, Рені); очікувані глибини $E[H]$ і прогнозні стандартні відхилення σ_H по ділянках, обчислені прогнозним блоком (аркуш «7_Прогноз»), підставляються у параметри розподілів глибин аркуша «1_Параметри», після

чого Монте-Карло симуляція повторюється в умовному режимі. Зіставлення результатів двох режимів наведено в табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Порівняння безумовного й умовного (прогнозного) режимів оцінки EE_{CO_2}

Характеристика	Безумовний режим	Умовний режим (прогнозний)
Математичне сподівання $E[EE_{CO_2}]$, г $CO_2/(T \cdot км)$	11,58	11,29
Стандартне відхилення σ_{EE} , г $CO_2/(T \cdot км)$	1,93	1,49
Коефіцієнт варіації CV , %	16,6	13,2
Медіана	11,36	11,17
95 %-імовірнісний інтервал	[8,53; 16,09]	[8,80; 14,70]
Ширина 95 %-імовірнісного інтервалу	7,56	5,90

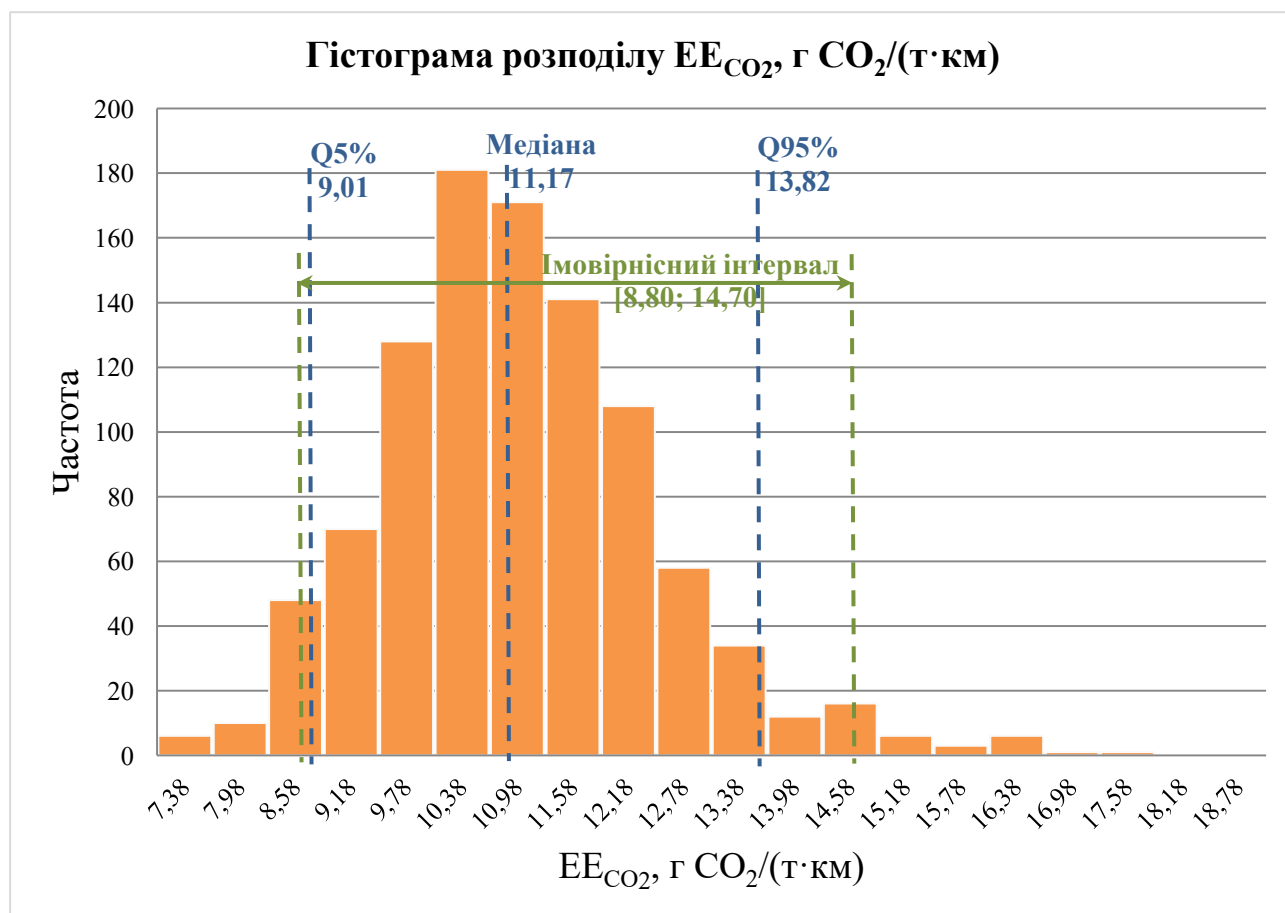


Рисунок 5.3 – Звуження імовірнісного інтервалу розподілу EE_{CO_2} при переході в прогнозний режим

Перехід у прогнозний режим звужує 95 %-імовірнісний інтервал показника енергоефективності з 7,56 до 5,90 г CO₂/(т·км), тобто на

$$\Delta CI = \left(1 - \frac{w_{\text{ум}}}{w_{\text{безум}}}\right) \cdot 100 \% \approx 22 \%, \quad (5.2)$$

за одночасного зменшення стандартного відхилення з 1,93 до 1,49 г CO₂/(т·км) і коефіцієнта варіації з 16,6 до 13,2 %. Математичне сподівання при цьому дещо зміщується (з 11,58 до 11,29 г CO₂/(т·км)) унаслідок того, що прогнозні глибини для конкретного стану W_0 відрізняються від багаторічних середніх; напрям цього зміщення залежить від фактичної гідрологічної ситуації й може бути як у бік покращення, так і погіршення оцінки. Принциповим результатом є саме скорочення ширини довірчого інтервалу: воно кількісно виражає інформаційну цінність оперативних гідрологічних даних Дунайської Комісії для планування рейсу – використання актуального стану рівнів води та AR(1)-прогнозу зменшує невизначеність прогнозованої енергоефективності приблизно на чверть. Для судноводія й оператора флоту це означає істотно вужчий діапазон очікуваних витрат палива та викидів, а отже – точніше обґрунтування швидкісного режиму, конфігурації каравану та оцінки ризику невідповідності контрактним зобов'язанням ще на етапі планування рейсу.

Отриманий ефект узгоджується з виявленими в п. 3.5 емпіричними закономірностями: звуження імовірнісного інтервалу є найбільшим для ділянок Нижнього Дунаю, де коефіцієнт авторегресії ϕ наближається до 0,99, а горизонт корисного прогнозу (10–29 діб) перекриває типову тривалість дунайського рейсу, і помітно меншим для ділянок Верхнього Дунаю (Δ5, Регенсбург), де $\phi \approx 0,90$ і горизонт корисного прогнозу скорочується до 6–8 діб. Таким чином, прогнозний блок забезпечує найбільший виграш саме для тих ділянок, що є критичними з погляду мілководного опору.

5.1.6 Імовірнісний зріз на масиві реальних рейсів

Узагальнений приклад п. 5.1.2–5.1.5 демонструє роботу прогнозного блоку на синтетичних розподілах. Щоб пов'язати прогнозну методику з реальними даними експлуатації, не дублюючи детермінованої апробації п. 4.4.5, розглянемо

масив 14 рейсів УДП як *емпіричну вибірку* реалізацій показника енергоефективності. Для 13 вантажних рейсів за маршрутом Ізмаїл – Смедерево розрахований нормований індекс $EE_{fuel,norm}$ та зведений критерій η утворюють емпіричний розподіл, який можна інтерпретувати як апостеріорний (фактично реалізований) аналог безумовного розподілу узагальненого прикладу.

Емпіричний розподіл за критерієм η має медіану $\eta_{\text{медіана}} = 0,981$ (рейс УДП Р 13), причому 11 із 13 вантажних рейсів зосереджені у вузькому діапазоні $\eta \in [0,744; 1,101]$ (зони «висока» та «прийнятна» ефективність за шкалою п. 4.2.5). Два рейси формують виражений правий хвіст розподілу: УДП Р 12 ($\eta = 1,439$) унаслідок переходу трьох сегментів у режим мілководдя та УДП Р 5 «Знаменка» ($\eta = 2,569$) унаслідок виконання двох проводок на ділянках критичного мілководдя. Структура цього емпіричного розподілу – компактне ядро з рідкісним, але важким правим хвостом – якісно відтворює форму модельного розподілу EE_{CO_2} узагальненого прикладу (рис. 5.1), що є непрямым підтвердженням адекватності прийнятих у моделі типів розподілів. Водночас саме поява важкого хвоста в реальних даних, спричиненого мілководними проводками, демонструє практичну важливість прогностичного блоку: завчасне виявлення ризику критичного зниження глибин дозволяє оператору уникнути потрапляння рейсу в зону неприйнятної ефективності через коригування складу каравану або часу виходу.

Принципова відмінність двох розподілів полягає у моменті їх формування відносно рейсу. Емпіричний розподіл 14 рейсів є апостеріорним: він узагальнює вже виконані рейси й доступний лише після їх завершення. Прогностичний розподіл інструмента є апріорним: він формується до початку рейсу на основі актуального стану рівнів води й дозволяє оцінити очікувану енергоефективність та ризик перевищення цільового рівня ще на етапі планування. Звуження довірчого інтервалу приблизно на 22 % (п. 5.1.5) кількісно характеризує, наскільки апріорний прогноз наближається до апостеріорної визначеності за рахунок використання оперативних гідрологічних даних. Саме цей перехід від ретроспективної оцінки окремих рейсів до проспективного інструмента

підтримки рішень становить практичну цінність прогностичного розширення способу й конкретизує напрями його впровадження, розглянуті в підрозділах 5.3–5.4.

5.2 Порівняння з існуючими методиками оцінки енергоефективності

Підрозділ 5.2 розв’язує допоміжну задачу ДЗ-4.2 – зіставлення результатів запропонованого способу з оцінками за існуючими методиками. Систематичний аналіз самих методик уже виконано в [підрозділі 1.1](#) і тут не повторюється; натомість він використовується як відправна точка. Метою підрозділу є визначити місце кожного показника запропонованої системи ([рис. 4.1](#), [табл. 4.1](#)) серед чинних методик, обрати безпосередньо порівнянний показник, кількісно зіставити з ним спосіб на повному масиві 13 вантажних рейсів УДП і у такий спосіб визначити місце способу відносно чинного методологічного апарату.

5.2.1 Вибір методики для зіставлення

У [підрозділі 1.1](#) виконано системний аналіз існуючих підходів до оцінки енергоефективності суден і зведено їх до порівняльної таблиці ([табл. 1.1](#)). Аналіз показав, що всі чинні міжнародні індекси *IMO* поділяються на дві родини: вуглецеві індикатори інтенсивності (операційний *EEOI* [30], рейтинговий *CII* [33]) та питомі витратні показники енергоспоживання (*SFOC*, *SEC*, *TEI* [84, 92, 101]). При цьому конструктивний *EEDI* [32], технічний *EEXI* та операційно-річний *CII* [33], – а також адаптовані для внутрішніх водних шляхів розробки (зокрема *EEDI_{Binnen}* *CESNI* [11]) є непридатними для прямого застосування до самохідного судна з караваном барж змінної конфігурації: вони прив’язані до фіксованої геометрії корпусу й проєктного дедвейту, виконують річне усереднення за типами морських суден або мають математичну невизначеність за $m_{cargo} = 0$ і не нормують показник на гідрологічні умови.

Єдиним показником, безпосередньо порівнянним із запропонованим способом за розмірністю та змістом, є операційний індикатор енергоефективності *EEOI*, означений у [п. 1.1](#) формулою (1.2) [30]: подібно до розробленого способу, він оперує фактичною питомою емісією CO_2 на одиницю

транспортної роботи рейсу й вимірюється в г CO₂ на тонно-кілометр. Тому подальше зіставлення (п. 5.2.3) виконується насамперед з *EEOI* як єдиним операційним рейсовим показником чинної міжнародної методики. Водночас для внутрішнього судноплавства Європи нормативна база (Директива ЄС 2016/1629, технічні стандарти Центральної комісії судноплавства по Рейну [7; 12]) не містить обов'язкового питомого показника вуглецевої інтенсивності, аналогічного *EEOI* чи *CII*, – висновок, узгоджений із результатами п. 5.1 щодо відсутності регуляторного нормативу.

5.2.2 Місце показників запропонованого способу серед існуючих методик

Запропонована система (рис. 4.1, табл. 4.1) не зводиться до одного індексу, а охоплює три рівні застосування за складом доступних даних, кожен з яких представлено парою показників – паливним і вуглецевим: базові дискретні EE_{disc} , $EE_{CO_2, disc}$ (рівень 1 – обчислюються на бази існуючих рейсових даних та CF); гідрологічно нормовані $EE_{fuel, norm}$, $EE_{CO_2, norm}$ (рівень 2 – до вихідних даних додано гідрологічні дані); економічна оцінка C_{var} і підтримка рішень (рівень 3 – додано техніко-економічні дані). Інтегральні форми EE , EE_{CO_2} (3.9)–(3.11) застосовуються для теоретичного обґрунтування й аналізу чутливості, а критерій η (4.1) – для зведення абсолютних значень до оцінки відносно еталона.

Наявність двох індексів на кожному рівні не є дублюванням. Паливний блок (EE , EE_{disc} , $EE_{fuel, norm}$) виражає енергоспоживання у фізичних одиницях палива, слугує оператору для техніко-економічної оптимізації (через C_{var}) та діагностики ГЕУ й за змістом відповідає питомим витратним показникам $SFOC$, SEC . Вуглецевий блок (EE_{CO_2} , $EE_{CO_2, disc}$, $EE_{CO_2, norm}$) виражає те саме у викидах CO₂, слугує для екологічного звітування й зіставлення з міжнародними індексами та відповідає *EEOI*, *CII*. Зв'язок між треками лінійний через конверсійний фактор ($EE_{CO_2, x} = CF \cdot EE_x$), тож обидва індекси отримуються з одного розрахунку, але адресовані різним користувачам – оператору флоту та регулятору.

Зведене позиціонування кожного показника системи, його одиниць, найближчого аналога серед існуючих методик і ролі в розрахунковій схемі наведено в табл. 5.6.

Таблиця 5.6 – Місце показників запропонованого способу відносно існуючих методик оцінки енергоефективності

Показник	Рівень, тип	Одиниці	Аналог у наявних методиках	Роль у розрахунковій схемі
EE (3.9)	Інтегральний, паливний	т пал./($T \cdot км$)	$EEI, EEDI$ [36; 92]	Теоретичне обґрунтування, аналіз чутливості
EE_{CO_2} (3.10)	Інтегральний, вуглецевий	т CO_2 /($T \cdot км$)	$EEOI$ [30] (агрегована форма)	Перехід до вуглецевих одиниць; чутливість
EE_{disc} (3.17)	Дискретний, паливний	т пал./($T \cdot км$)	SEC посегментно (прямого в IMO немає)	Основний робочий паливний індекс; основа бенчмарків
$EE_{CO_2, disc}$ (3.18)	Дискретний, вуглецевий	т CO_2 /($T \cdot км$)	$EEOI$ [30] (посегментна форма)	Вуглецева інтенсивність рейсу; сумісність з $EEOI, CII$
$EE_{CO_2, norm}$ (3.19)	Нормований, вуглецевий	т пал./($T \cdot км$)	Прямого аналога немає	Зіставлення вуглецевої інтенсивності за різних умов
$EE_{fuel, norm}$ (3.20)	Нормований, паливний	т CO_2 /($T \cdot км$)	Прямого аналога немає	Порівняння рейсів за різної водності; знаменник η
C_{var} (3.23)	Економічний	грн/($T \cdot км$)	Прямого аналогу немає	Вибір економічно оптимального сценарію
η (4.1)	Критерій оцінки	безрозмірний	Слабкий аналог – рейтинг CII А–Е [33]	Оцінка рейсу відносно еталона; показник активації класів рішень

Як видно з табл. 5.6, чинні міжнародні методики покривають лише два елементи системи: операційну вуглецеву інтенсивність ($EEOI \leftrightarrow EE_{CO_2, disc}$) та,

частково, логіку відносного рейтингу ($CII \leftrightarrow \eta$). Решта елементів – посегментна дискретизація, гідрологічна нормалізація (рівень 2 повністю) та економіко-управлінський рівень (C_{var} , підтримка рішень) – не мають прямих аналогів і становлять власний внесок запропонованого способу.

Серед усіх показників системи з $EEOI$ безпосередньо збігається дискретний вуглецевий індекс $EE_{CO_2, disc}$ (формула (3.18)): обидва є відношенням сумарної маси викидів CO_2 до транспортної роботи, причому $EE_{CO_2, disc}$ підсумовує роботу посегментно $\sum(m_i \cdot D_i)$ зі змінною масою каравану замість єдиного добутку $m_{cargo} \cdot D$. Отже, запропонований спосіб містить $EEOI$ як свій ненормований окремий випадок (рівень 1). Принципова відмінність полягає в тому, що $EEOI$ зупиняється на вуглецевій інтенсивності, тоді як запропонований спосіб додає рівні врахування специфіки внутрішнього судноплавства, відсутні в морських індексах:

- гідрологічну нормалізацію через множник k_H ($EE_{CO_2, norm}$ (3.19), $EE_{fuel, norm}$ (3.20)) – рівень 2, що робить зіставними рейси різної водності;
- структуру часу рейсу, зокрема множник $(2N - 1)$ для проводок, маневрування й шлюзування (п. 4.2.4);
- змінну конфігурацію каравану, що впливає на опір і питому роботу;
- економічний показник C_{var} (3.23) і критерій η (4.1) з прив'язкою до бенчмарка (рівень 3);
- імовірнісне розширення (п. 5.1) – апріорну оцінку очікуваної енергоефективності та її імовірнісного інтервалу, чого апостеріорні індикатори не передбачають.

Таким чином, $EEOI$ вимірює результат – фактичну вуглецеву інтенсивність рейсу, тоді як запропонований спосіб дозволяє цей результат інтерпретувати й діагностувати: встановити, якою мірою підвищена інтенсивність зумовлена об'єктивними гідрологічними чинниками, а якою – структурою рейсу або технічним станом енергетичної установки.

5.2.3 Числове зіставлення на масиві апробованих рейсів

Для кількісного зіставлення на масиві 13 вантажних рейсів (УДП Р 1 – Р 13; баластний рейс Р 14 виключено, оскільки за відсутності транспортної роботи $EEOI$ не визначений – див. застереження $m_{cargo} = 0$ у табл. 1.1) для кожного рейсу наведено: операційний індикатор $EEOI$ (тотожний індексу $EE_{CO_2, disc}$, формула (3.18)), гідрологічно нормований індекс $EE_{CO_2, norm}$ (формула (3.19)), зведений критерій ефективності η (4.1) та економічний показник C_{var} (3.23). Результати зведено в табл. 5.6. Паливні індекси пропорційні вуглецевим через CF і окремо не наводяться. Результати наведені у табл. 5.7.

Таблиця 5.7 – Зіставлення операційного індикатора $EEOI$ з гідрологічно нормованим індексом та критерієм ефективності на масиві рейсів

Рейс	$EEOI$, г $CO_2/(T \cdot км)$	$EE_{CO_2, norm}$, г $CO_2/(T \cdot км)$	η	C_{var} , грн/($T \cdot км$)
УДП Р 1	6,89	5,84	0,937	0,0562
УДП Р 2	6,78	5,56	0,893	0,0536
УДП Р 3	8,01	6,77	1,087	0,0652
УДП Р 4	8,37	6,86	1,101	0,0661
УДП Р 5	19,52	16,00	2,569	0,1542
УДП Р 6	5,65	4,63	0,744	0,0446
УДП Р 7	7,82	6,61	1,061	0,0636
УДП Р 8	6,70	5,66	0,909	0,0545
УДП Р 9	8,22	6,74	1,082	0,0649
УДП Р 10	7,93	6,50	1,043	0,0626
УДП Р 11	7,18	5,89	0,946	0,0567
УДП Р 12	10,93	8,96	1,439	0,0863
УДП Р 13	7,45	6,11	0,981	0,0589

За абсолютним значенням $EEOI$ масив демонструє широкий діапазон вуглецевої інтенсивності – від 5,65 г $CO_2/(T \cdot км)$ для еталонного рейсу УДП Р 6 «Звездний» до 19,52 г $CO_2/(T \cdot км)$ для рейсу УДП Р 5 «Знаменка», тобто з перевищенням на 245 %. Цей результат збігається з δ -порівнянням Р 6 $\leftrightarrow$ Р 5, наведеним у п. 4.4.5. Медіанне значення $EEOI$ по масиву становить 7,82 г $CO_2/(T \cdot км)$. Економічний показник C_{var} поводитьсь узгоджено з

енергетичним (для УДП Р 6 $C_{var} = 0,0446$ грн/(т·км); для УДП Р 5 $C_{var} = 0,1542$ грн/(т·км), розкид у 3,46 разів), що підтверджує внутрішню несуперечність системи: вуглецевий, паливний і вартісний треки впорядковують рейси однаково.

Перехід від $EEOI$ до нормованого індексу $EE_{CO_2, norm}$ знижує показник для всіх рейсів на 15–18 % (відношення $EE_{CO_2, norm}/EEOI$ становить 0,82–0,85, що відповідає середньому по рейсу множнику $k_H \approx 1,18–1,22$). Це зниження відображає приведення фактичної транспортної роботи до референтних гідрологічних умов: частина «сирої» вуглецевої інтенсивності пояснюється об'єктивно складними умовами мілководдя, а не неефективністю експлуатації. Проте навіть після нормалізації аномальні рейси Р 5 ($EE_{CO_2, norm} = 16,00$) і Р 12 (8,96) лишаються істотно вищими за основну групу – їхня підвищена інтенсивність зумовлена не лише гідрологією.

Зведений критерій η локалізує причину: для УДП Р 5 $\eta = 2,569$ відображає виконання двох проводок каравану на ділянках критичного мілководдя (множник $(2N - 1) = 9$ для каравану з 5 барж), а для УДП Р 12 $\eta = 1,439$ – перехід трьох сегментів у режим мілководдя. Обидва рейси автоматично потрапляють до зони управлінської уваги ($\eta > 1,1$) й активують відповідні класи рішень (п. 4.3.3), тоді як $EEOI$ лише фіксує підвищену інтенсивність, не розрізняючи її причини. Для основної групи з 11 рейсів значення $\eta \in [0,744; 1,101]$ (медіана 0,981) підтверджують прийнятну ефективність, узгоджену з еталоном УДП Р 6.

За масивом загалом сумарна витрата палива 13 вантажних і одного баластного рейсу становить 222,2 т, а сумарні викиди CO_2 – 692,0 т (за конверсійним фактором $CF = 3,114$ т CO_2 /т палива [33]).

Виконане зіставлення показує, що запропонований спосіб не суперечить чинній міжнародній методиці оцінки операційної енергоефективності, а узагальнює її стосовно умов внутрішнього судноплавства. Чинні індекси IMO покривають лише операційну вуглецеву інтенсивність ($EEOI$) та логіку відносного рейтингу (CII); запропонований спосіб відтворює їх

($EE_{CO_2, disc} \equiv EEOI$; $\eta \leftrightarrow$ логіка CII) і розширює трьома елементами, що не мають аналогів: посегментною дискретизацією, гідрологічною нормалізацією через множник k_H (паливний і вуглецевий нормовані індекси) та економіко-управлінським рівнем (C_{var} , критерій η , підтримка рішень). При цьому подвійний паливно-вуглецевий підхід дозволяє з одного розрахунку обслуговувати і техніко-економічну оптимізацію оператора, і вуглецеве звітування, сумісне з $EEOI$, CII . Кількісне зіставлення на 13 рейсах підтвердило взаємну узгодженість усіх треків системи та діагностичну перевагу нормованих індексів і критерію η над $EEOI$. Цим розв'язано задачу ДЗ-4.2: запропонований спосіб зіставлено з існуючими методиками й визначено його місце як узагальнення операційного індикатора $EEOI$ для караванного судноплавства в мілководних умовах Дунаю.

5.3 Оцінка ефекту від впровадження способу

Підрозділ 5.3 завершує розв'язання допоміжної задачі ДЗ-4.3 – оцінку потенціалу використання запропонованого способу для експлуатаційної оптимізації. У [підрозділі 4.4.5](#) цю задачу розв'язано частково – через демонстрацію класів рішень на окремих рейсах; тут наводиться повна кількісна оцінка ефекту для всього апробованого масиву з 13 вантажних рейсів УДП у трьох вимірах: економія палива, зниження викидів CO_2 та зменшення паливної складової змінних витрат C_{var} . Оцінка побудована безпосередньо на даних журналу рейсів і на результатах аналізу чутливості ([п. 5.1.4](#)), без залучення зовнішніх припущень.

5.3.1 Методика оцінки потенціалу економії

Запропонований спосіб не змінює фізику рейсу безпосередньо, а надає оператору обґрунтування для експлуатаційних рішень (класи 1–4 за [п. 4.3.3](#)). Тому ефект від впровадження визначається як потенціал усунення надбенчмаркової неефективності – тієї частини питомих витрат, що перевищує еталонний рівень і зумовлена керованими чинниками. Оскільки гідрологічні умови вже зняті нормуванням (індекс $EE_{fuel, norm}$, множник k_H), перевищення

критерію $\eta = \frac{EE_{fuel,norm}}{EE_{ref}}$ над одиницею відображає саме керовану неефективність – режим швидкості, конфігурацію каравану або технічний стан ГД, на які впливають рішення класів 1–4. Рейси з $\eta \leq 1$ вважаються такими, що вже досягли або перевершили еталон, і резерву не несуть (еталонна група).

Частка палива, що вивільняється на рейсі при приведенні його до цільового рівня ефективності, визначається як

$$f_i = 1 - \frac{\eta_{ц\acute{и}л}}{\eta_i} \text{ (при } \eta_i > \eta_{ц\acute{и}л}; \text{ інакше } f_i = 0), \quad (5.3)$$

де $\eta_{ц\acute{и}л}$ – цільовий рівень критерію.

Для нормальних рейсів ($\eta_i \leq 1,1$) цільовим є еталон $\eta_{ц\acute{и}л} = 1$. Для аномальних рейсів ($\eta_i > 1,1$, де висока питома витрата зумовлена проводками або критичним мілководдям) у консервативній оцінці прийнято $\eta_{ц\acute{и}л} = 1,1$ – поріг «прийнятної» ефективності за шкалою п. 4.2.5, що відображає неповну усунівність структурних втрат; у верхній (потенційній) оцінці для всіх рейсів $\eta_{ц\acute{и}л} = 1$. Агреговані показники ефекту по флоту обчислюються як

$$\Delta FC = \sum_i FC_i \cdot f_i; \quad \Delta CO_2 = CF \cdot \Delta FC; \quad \Delta C = C_f \cdot \Delta FC, \quad (5.4)$$

де $CF = 3,114$ т CO_2 /т палива [32], а ціна палива $C_f = 30000$ грн/т закладена у розрахунковому показнику $C_{var} = \frac{EE_{fuel,norm} \cdot C_f}{1000}$. Натуральні складники ефекту (паливо, CO_2) від ціни не залежать; чутливість грошового виміру до ціни палива розглянуто в п. 5.3.4.

Згідно з аналізом чутливості (п. 5.1.4), після гідрологічного нормування домінантним керованим важелем лишається швидкість руху (часткова чутливість $S_{v_g} \approx 0,32$, близько двох третин керованої дисперсії), далі – технічний стан рушійного комплексу та ГД (пропульсивний ККД і SFC , разом приблизно одна третина), тоді як маса вантажу й течія мають близький до нуля маржинальний внесок. Відповідно основну частку резерву реалізують рішення класів 1 і 3 (вибір швидкісного профілю та перехід у економний хід на мілководних ділянках), меншу – клас 4 (корекція режиму та позачергове ТО ГД за критерієм $\frac{SFC_{fact}}{SFC_{ref}} > 1,1$). Конфігурація каравану (клас 2) має малий

маржинальний внесок у межах рейсу, проте є ключовим важелем запобігання аномаліям – вибору складу, що дозволяє уникнути проводок.

5.3.2 Поіндексний потенціал економії

Результати порейсового розрахунку резерву за формулами (5.3)–(5.4) для всіх 13 вантажних рейсів наведено в табл. 5.8 (резерв палива подано у двох оцінках – консервативній та верхній, решта показників – для консервативної оцінки як основної).

Таблиця 5.8 – Поіндексний потенціал економії від впровадження способу на масиві рейсів УДП

Рейс	η	FC факт., т	Резерв палива (консерв.), ΔFC , т	Резерв палива (верхня межа), т	Резерв CO_2 , ΔCO_2 , т	Резерв коштів, тис. грн
УДП Р 1	0,937	0,56	0	0	0	0
УДП Р 2	0,893	12,79	0	0	0	0
УДП Р 3	1,087	10,43	0,84	0,84	2,60	25
УДП Р 4	1,101	7,72	0,01	0,71	0,02	0
УДП Р 5	2,569	36,81	21,05	22,48	65,55	632
УДП Р 6	0,744	13,60	0	0	0	0
УДП Р 7	1,061	23,42	1,34	1,34	4,17	40
УДП Р 8	0,909	4,90	0	0	0	0
УДП Р 9	1,082	23,48	1,77	1,77	5,52	53
УДП Р 10	1,043	23,37	0,97	0,97	3,02	29
УДП Р 11	0,946	20,68	0	0	0	0
УДП Р 12	1,439	26,18	6,16	7,98	19,19	185
УДП Р 13	0,981	17,86	0	0	0	0
Разом	–	221,8	32,1	36,1	100,1	963

Розподіл резерву по масиву є вкрай нерівномірним. П'ять рейсів еталонної групи (УДП Р 1, Р 2, Р 6, Р 8, Р 11) і рейс УДП Р 13, що мають $\eta \leq 1$, резерву не

несуть – вони відображають уже досягнуту добру практику. Чотири нормальні рейси з помірним перевищенням (УДП Р 3, Р 7, Р 9, Р 10; $\eta = 1,04\text{--}1,09$) дають сукупно лише близько 4,9 т палива – це «тонке доналаштування» швидкісного профілю. Натомість понад 85 % усього резерву (27,2 т із 32,1 т) припадає на два аномальні рейси – Р 5 і Р 12. Це означає, що головна цінність способу полягає не в косметичному покращенні рядових рейсів, а в запобіганні потраплянню рейсу в зону неприйнятної ефективності засобами перспективного планування (п. 4.3.5) та прогнозного блоку (п. 5.1).

5.3.3 Агрегований ефект по флоту

За апробованим масивом з 13 вантажних рейсів, на яких фактично спалено 221,8 т палива (690,7 т CO₂), потенціал економії від впровадження способу становить:

- за консервативною оцінкою (основною) – 32,1 т палива, або 14,5 % сумарної витрати, що відповідає зниженню викидів на 100,1 т CO₂ та зменшенню паливних витрат приблизно на 963 тис. грн (за ціною 30 000 грн/т);
- за верхньою (потенційною) оцінкою – 36,1 т палива (16,3 %), 112,4 т CO₂ та близько 1 083 тис. грн.

Таким чином, реалістичний ефект від впровадження способу на апробованому масиві лежить у діапазоні 14,5–16,3 % економії палива та відповідного зниження викидів. За структурою резерву (п. 5.3.1) близько двох третин цього потенціалу реалізується рішеннями щодо швидкісного профілю та економного ходу (класи 1, 3), близько третини – корекцією технічного стану ГД (клас 4), а вибір конфігурації каравану (клас 2), маючи малий маржинальний внесок на рядових рейсах, відіграє вирішальну роль у запобіганні аномаліям. Слід підкреслити, що наведені оцінки отримані на ретроспективному масиві; систематичне застосування способу в перспективному режимі (планування рейсу) здатне реалізувати переважну частину цього потенціалу завчасно, до виходу каравану в рейс.

5.3.4 Чутливість економічного ефекту до ціни палива

Грошова оцінка ефекту (п. 5.3.3) спирається на закладену в інструменті ціну палива 30 000 грн/т. Оскільки ринкова ціна суднового палива (MGO) демонструє значну волатильність, доцільно подати грошовий ефект у вигляді сценарної «вилки». При цьому слід підкреслити, що натуральні складники ефекту – економія палива (32–36 т) і зниження викидів (100–112 т CO₂) – від ціни не залежать і є інваріантними; ринкова кон'юнктура впливає лише на грошовий вимір, причому лінійно: $\Delta C = \Delta FC \cdot C_f$.

Діапазон сценаріїв обґрунтовано фактичною динамікою цін MGO у перерахунку за роками: від 420 USD/т ($\approx$ 11,3 тис. грн/т, 2020 р.) до 1090 USD/т ($\approx$ 48,1 тис. грн/т, червень 2026 р.). Розмах у гривні (приблизно у 4,25 разів) перевищує розмах у доларах (у 2,6 разів), оскільки гривнева ціна вбирає одночасно паливну й валютну волатильність. Ретроспективні дані цін на суднове паливо за даними [BIX Bunker index](#), [Rousse Bunker Prices](#) наведені у табл. 5.9. Відповідні сценарії та грошовий ефект наведено в табл. 5.10.

Таблиця 5.9 – Орієнтовна динаміка цін на суднове паливо MGO 2018–2026 середньорічно

Рік	MGO, USD/т	Курс USD*, грн/USD	MGO, грн/т
2018	560	27,20	15232
2019	620	25,85	16027
2020	420	26,96	11323
2021	520	27,29	14191
2022	980	32,34	31693
2023	870	36,57	31816
2024	760	40,15	30514
2025	820	41,80	34276
06.2026	1090	44,10	48069
* Середні значення за офіційною статистикою НБУ . Для 2025–2026 використано середні значення курсу, близькі до фактичних значень НБУ за відповідні періоди			

Таблиця 5.10 – Чутливість грошового ефекту до ціни палива

Сценарій ціни	C_f , грн/т	C_f , USD/т*	Економія, млн.грн. (консервативний)	Економія, млн.грн. (верхня межа)
Низький	25000	565	0,80	0,9
Базовий	35000	795	1,12	1,26
Високий	50000	1135	1,61	1,81
Кризовий	60000	1360	1,93	2,17
* Орієнтовно за курсом 44 грн/USD (червень 2026 р.); історичні гривневі значення відрізняються через зміну курсу (наприклад, 560 USD/т у 2018 р. = 15,2 тис. грн/т, а за курсом 2026 р. $\approx$ 24,7 тис. грн/т)				

Закладена в інструменті ціна 30 000 грн/т (розрахунок п. 5.3.3) розташована між низьким і базовим сценаріями, що відповідає економії 0,96–1,08 млн грн; базовий рівень 35 000 грн/т приблизно дорівнює середній ціні 2022–2025 рр., а поточний спот червня 2026 р. (приблизно 48 тис. грн/т, 1090 USD/т) лежить між високим і кризовим сценаріями. Таким чином, грошовий ефект від впровадження способу на апробованому масиві становить від 0,8 до 2,2 млн. грн. залежно від цінового сценарію, а висхідний тренд цін на паливо лише посилює економічну доцільність застосування способу.

Підсумовуючи результати, можна зазначити, що виконана кількісна оцінка є внеском до розв’язання допоміжної задачі ДЗ-4.3. Показано, що запропонований спосіб має вимірний експлуатаційний ефект: на апробованому масиві з 13 вантажних рейсів УДП він окреслює потенціал економії 14,5–16,3 % палива (32–36 т), зниження викидів на 100–112 т CO₂ та зменшення паливних витрат на 0,96–1,08 млн грн за базової ціни 30 000 грн/т, а з урахуванням сценаріїв ціни палива (п. 5.3.4) – у діапазоні 0,8–2,2 млн грн, причому понад 85 % цього потенціалу зосереджено в раціональному плануванні прогнозовано аномальних рейсів в умовах очікуваного мілководдя засобами перспективного планування та прогнозного блоку. Тим самим підтверджено, що спосіб придатний не лише для оцінювання, а й для обґрунтування експлуатаційних рішень щодо вибору швидкості, конфігурації каравану та режимів ГД, а також

для подальшого включення до систем нормування й моніторингу енергоефективності флоту, як того вимагає технологічна карта дослідження.

5.4 Практичні рекомендації

Сформульовані нижче практичні рекомендації безпосередньо впливають з результатів апробації запропонованого способу (п. 5.2) та кількісної оцінки потенційного ефекту від його впровадження (п. 5.3). Рекомендації згруповано за двома адресними групами, що відрізняються горизонтом і характером ухвалюваних рішень: оператори флоту, для яких спосіб є інструментом експлуатаційної оптимізації окремих рейсів, та органи управління (галузеві адміністрації, регулятори внутрішнього водного транспорту), для яких він є інструментом моніторингу й обґрунтування транспортної політики. Викладені нижче рекомендації безпосередньо реалізують допоміжну задачу ДЗ-4.3 – оцінювання потенціалу способу для експлуатаційної оптимізації та його включення до систем нормування й моніторингу енергоефективності флоту – і разом із результатами підрозділів 5.2 (ДЗ-4.2) та 5.3 завершують розв’язання головної задачі ГЗ-4.

5.4.1 Рекомендації операторам флоту

Для операторів самохідних суден з караваном барж спосіб реалізується через систему класів типових експлуатаційних рішень 1–4, визначених у п. 4.3.3, та підтримувальні алгоритми п. 4.3.4–4.3.6. Нижче наведено практичні рекомендації за кожним важелем управління енергоефективністю.

.1 Вибір швидкісного профілю та перехід у режим економного ходу (класи 1 і 3). На мілководних ділянках (клас водного шляху $AGNIV-Va, \frac{H}{d_{eq}} < 2,0$) вплив швидкості на нормований індекс $EE_{fuel,norm}$ посилюється через зростання мілководного опору, що нормується коефіцієнтом k_H . Рекомендується знижувати швидкість (переходити в режим *eco-speed*) за умови $\eta^{(r)} > 1,1$ або $Fr_h > 0,6$, а на ділянках підвищеного гідрологічного ризику ($\frac{H_i}{d_{eq,i}} < 1,5$) – завчасно переходити до економічної швидкості за сигналом прогнозу глибин (алгоритм

4.3.6), не очікуючи перевищення порога η . Це усуває паливно невігідну «гонитву за швидкістю» там, де приріст опору найбільший.

.2 Вибір конфігурації та завантаження каравану (клас 2). Конфігурацію каравану слід обирати на етапі планування рейсу (алгоритм 4.3.5) шляхом порівняння розрахункових значень C_{var} для альтернативних схем з урахуванням навігаційних обмежень по осадці та ширині шляху. Показовою є пара рейсів УДП Р2 і Р5 з ідентичною конфігурацією (5 барж, 5762 т) на одному маршруті: через дві проводки на критичних ділянках витрата палива зросла з 12,8 до 36,8 т, тобто у 2,88 рази. Це засвідчує, що своєчасне переформування каравану задля уникнення проводок дає найбільший одиничний резерв економії.

.3 Технічне обслуговування та корекція режиму ГД (клас 4). Цей клас рішень ініціюється виключно технічним станом головних двигунів. Рекомендується призначати позачергове технічне обслуговування (регулювання паливної апаратури, перевірку газотурбонагнітача) за показником $\delta SFC = \frac{SFC_{\text{факт}}}{SFC_{\text{реф}}} > 1,10$, що систематично спостерігається протягом двох і більше рейсів підряд за незмінних гідрологічних умов. Перевищення цього порога є індикатором деградації паливної апаратури або механічного ступеня ГД і підставою для технічного втручання до планового строку.

.4 Проспективне планування рейсу. Перед виходом у рейс доцільно застосовувати алгоритм проспективного аналізу (4.3.5) у формі матриці «швидкість $\times$ конфігурація» з вибором сценарію за мінімумом $EE_{\text{fuel, norm}}$ та C_{var} , поєднуючи його з імовірнісним прогнозом енергоефективності (п. 5.1) для вибору сприятливого навігаційного вікна за прогнозованими гідрологічними умовами.

.5 Очікуваний ефект. Системне застосування наведених рекомендацій забезпечує, за оцінкою п. 5.3, потенціал скорочення витрати палива на 14,5–16,3 % за розглянутою вибіркою рейсів, що відповідає економії 32–36 т палива та 100–112 т CO_2 . Натуральний (паливний та вуглецевий) ефект є інваріантним

щодо цінової кон'юнктури, тоді як грошова оцінка лінійно залежить від ціни палива (п. 5.3.4).

Сукупно наведені рекомендації реалізують першу складову задачі ДЗ-4.3 – використання запропонованого способу для експлуатаційної оптимізації рейсу, а саме обґрунтований вибір складу й конфігурації каравану, швидкісних режимів і завантаження на основі кількісної оцінки енергоефективності.

5.4.2 Рекомендації органам управління

Для органів управління запропонований спосіб має цінність як інструмент моніторингу енергоефективності та обґрунтування політики переорієнтації вантажопотоків на внутрішній водний транспорт (модального зсуву). Нижче окреслено відповідний політико-регуляторний контекст і місце способу в ньому.

.1 Контекст політики ЄС. Модальний зсув є наріжним принципом транспортної декарбонізації ЄС. *Sustainable and Smart Mobility Strategy – putting European transport on track for the future* – Стратегія сталої та розумної мобільності (COM(2020) 789 final) передбачає зростання перевезень внутрішніми водними шляхами та каботажним судноплавством на 25 % до 2030 р. і на 50 % до 2050 р., а також переведення щонайменше 30 % автомобільних вантажоперевезень на відстань понад 300 км на залізницю або водний транспорт до 2030 р. і понад 50 % до 2050 р. Нині близько 75 % внутрішніх вантажів у ЄС перевозиться автотранспортом. Попри ці цілі, бажаний зсув не відбувається: сукупна частка залізниці та внутрішнього водного транспорту у вантажоперевезеннях ЄС досягла піку 27 % у 2012 р. і відтоді знижується – до 22 % у 2023 р.

.2 Ключовий бар'єр і роль способу. Серед причин такої динаміки Європейське агентство з довкілля (EEA) окремо називає вразливість внутрішніх водних шляхів до дедалі частіших посух і повеней, спричинених зміною клімату: гідрологічна мінливість порушує операції, знижує надійність ВВШ і їхню привабливість порівняно з іншими видами транспорту. Саме цей бар'єр і знімає запропонований спосіб: нормування мілководного опору коефіцієнтом k_H разом з імовірнісним прогнозом енергоефективності (п. 5.1) робить оцінку ВВШ

стійкою до коливань водності, забезпечуючи зіставність рейсів за різних гідрологічних умов. У цьому полягає прямий зв'язок між методичним апаратом дисертації та пріоритетами транспортної політики ЄС.

.3 Порівняння за видами транспорту. Енергетична та кліматична перевага водного транспорту підтверджується ієрархією питомих викидів парникових газів за видами транспорту, оціненою за повним паливним циклом (*WtW*, *Well-to-Wheel*, або *Well-to-Wake*) для ЄС-27 (дані, усереднені або підсумовані для всіх 27 держав-членів ЄС) станом на 2018 р. (табл. 5.11, рис. 5.4). Для УДП-караванів використано фактичні дані журналу рейсів: медіанне значення $EE_{CO_2, disc} = 7,82 \text{ г CO}_2/(\text{т} \cdot \text{км})$, що відповідає викидам від згоряння палива (*TtW*, *Tank-to-Wake*). Для нафтових дистильатних палив внесок стадії *WtT* (*Well-to-Tank*) розраховується у залежності від кількості енергії та становить орієнтовно 20–30 % від прямих викидів *TTW*, що відповідає коефіцієнту перерахунку $TTW \rightarrow WTW$ близько 1,2–1,3 [69]. Для цілей орієнтовної оцінки в рамках підрозділів 5.4, 5.5 приведення до повного циклу виконано зі спрощенням – множенням на коефіцієнт паливного апстріму 1,27, що дає приблизно 10 г $\text{CO}_2\text{-екв}/(\text{т} \cdot \text{км})$.

Таблиця 5.11 – Питомі викиди парникових газів в еквіваленті CO_2 за видами транспорту (*WtW*, ЄС-27, 2018)

Вид транспорту	<i>WtW</i> , г $\text{CO}_2/(\text{т} \cdot \text{км})$	У порівнянні з караваном (кратність)
Автотранспорт (HGV)	137	13,7
Внутрішній водний транспорт (середнє по флоту)	33	3,3
Залізниця (дизельна тяга)	24	2,4
Внутрішній водний транспорт (штовхачі)	24	2.4
Дунайські каравани (досліджуване самохідне судно + несамохідні баржи)	10	1

Наведені значення відповідають оцінці за повним паливним циклом *WtW* і взято з методичного звіту, підготовленого *Fraunhofer ISI* та *CE Delft/ECTA* на

замовлення Європейського агентства з довкілля *EEA* [47]: автотранспорт – табл. 3.2 (137 г CO₂-екв/(т·км); складник *TtW* – 108 г CO₂-екв/(т·км)), залізничний вантажний транспорт – рис. 4.5 (*WtW* приблизно 24 г CO₂-екв/(т·км)), внутрішній водний транспорт – табл. 6.4 (середнє по ЄС 33,4 г CO₂-екв/(т·км); категорія «штовхач» – 24,2 г CO₂-екв/(т·км) за 2019 р.).

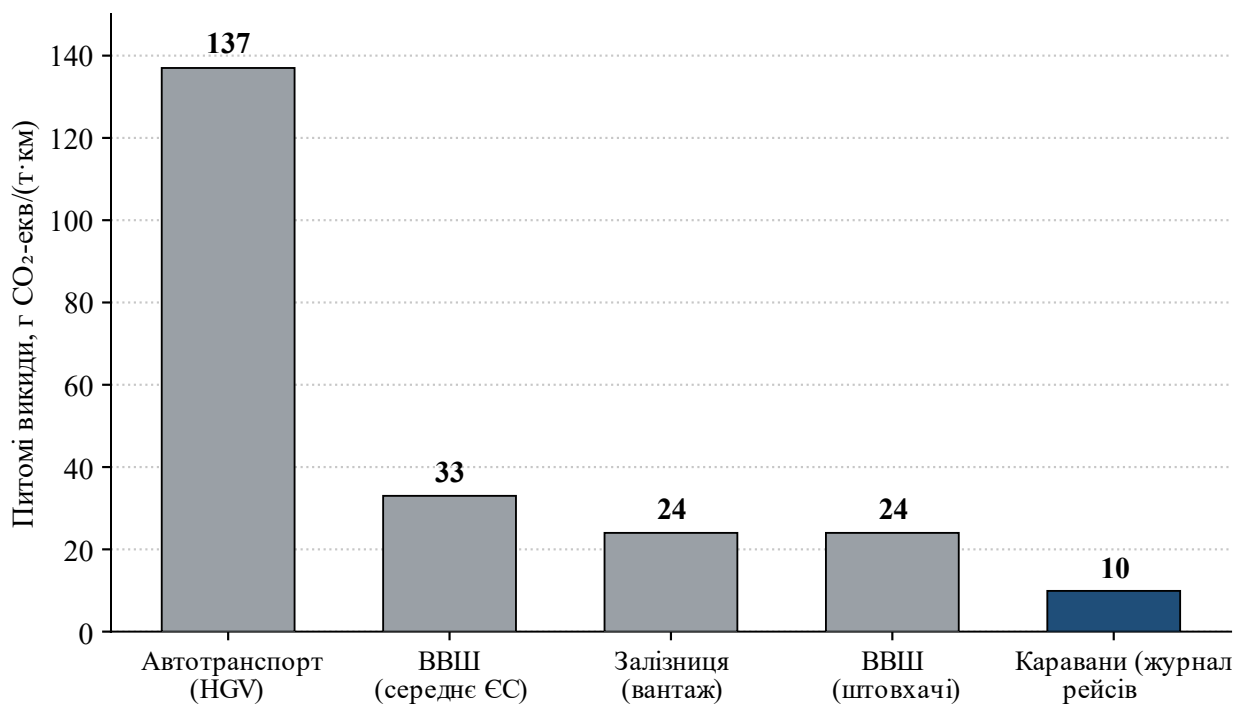


Рисунок 5.4 – Питомі викиди *WtW* в еквіваленті CO₂ за видами транспорту, г CO₂/(т·км). Джерела: [47], журнал рейсів

Окремо слід відзначити, що в зазначеному звіті [47] 2018 рік охарактеризовано як рік низької водності (для ВВШ Західної Європи), через що судна перевозили лише частину звичайного завантаження, а середні питомі викиди внутрішнього водного транспорту в цьому році були вищими, ніж в інші роки. Це незалежно підтверджує центральну тезу дослідження: гідрологічна мінливість безпосередньо впливає на енергоефективність внутрішнього судноплавства, а запропоноване нормування коефіцієнтом k_H усуває цей вплив, забезпечуючи зіставність оцінок за різних умов водності.

.4 Ілюстративний диференціал. На умовну одиницю транспортної роботи 1 млн т·км переведення вантажу з автотранспорту на дунайський

штовханий караван дає скорочення викидів приблизно на 127 т CO₂-екв, тобто караван виявляється у приблизно 13,8 рази «чистішим» за автотранспорт. Прикметно, що навіть порівняно з усередненим європейським показником для суден-штовхачів (24,2 г CO₂-екв/(т·км)) дунайські каравани УДП за питомими викидами приблизно у 2,4 рази ефективніші, що пояснюється більшим розміром каравану та рівнем завантаження на ділянках Нижнього Дунаю. Цей диференціал наведено на одиницю роботи й не залежить від припущень про середню дальність перевезення.

.5 Масштаб дунайських вантажопотоків. Для контексту масштабу наведемо фактичні обсяги перевезень за даними Спостережень за ринком дунайських перевезень Дунайської Комісії [14] (подано в тоннах, без перерахунку в т·км): сукупний вантажообіг дунайських портів за 2023 р. становив 95,1 млн т, зокрема портів українського Придунав'я – 32,0 млн т; через шлюз Габчиково штовханими караванами у 2024 р. перевезено 2 038 тис. т (45 % усього вантажу шлюзу); обсяг перевезень каналом Дунай–Чорне море за дев'ять місяців 2024 р. сягнув 14,48 млн т. За таких потоків навіть незначна відносна частка модального зсуву на користь дунайських караванів дає вагому абсолютну економію викидів CO₂.

.6 Рекомендація щодо застосування. Запропонований спосіб доцільно використовувати органам управління як інструмент моніторингу, звітності та верифікації (*MRV*) енергоефективності внутрішнього водного транспорту й супроводу політики модального зсуву. Завдяки нормуванню гідрологічного впливу (k_H) спосіб дає зіставні в часі оцінки, стійкі до коливань водності, і тим самим методично знімає визнаний *EEA* бар'єр гідрологічної надійності ВВШ.

.7 Обмеження та напрям розвитку. Повномасштабна сценарна оцінка ефекту модального зсуву на рівні транспортної системи потребує статистики вантажопотоків у тонно-кілометрах, якої наявні галузеві джерела [14] безпосередньо не містять. Тому таку оцінку винесено як перспективний напрям подальших досліджень (п. 5.5).

Таким чином, рекомендації для органів управління реалізують ще одну складову задачі ДЗ-4.3 – включення способу до систем нормування й моніторингу енергоефективності флоту, а підтверджена в підпункті узгодженість методичного апарата з регуляторним контекстом ЄС і Дунайського регіону відповідає вимогам до способу, сформульованим у межах задачі ДЗ-1.3.

5.5 Перспективи подальших досліджень

Розв’язання чотирьох поставлених наукових задач (ГЗ-1–ГЗ-4) забезпечило побудову та експериментально-аналітичну перевірку способу оцінки енергоефективності руху самохідних суден і штовхачів з караванами барж на Дунаї. Водночас отримані результати окреслюють низку напрямів подальшого розвитку способу, що виходять за межі розглянутих задач. Ці напрями систематизовано нижче; їх мотивує, зокрема, пілотна апробація способу на судні іншого класу – пасажирському круїзному теплоході *m/v Lisabelle*, яка ілюструє універсальність запропонованого методичного апарата.

5.5.1 Адаптація показника енергоефективності до пасажирських суден

Запропонований у роботі апарат орієнтовано на вантажний сегмент, де транспортною роботою є переміщення вантажу. Безпосереднє застосування нормованого показника $EE_{fuel,norm} = \frac{\sum FC}{\sum(m_{cargo} \cdot D)}$ до пасажирських круїзних суден методологічно некоректне: транспортна робота не є метою рейсу (пасажери оплачують послугу, а не переміщення вантажу), а маса корисного навантаження мізерна порівняно з масою самого судна. Тому для поширення способу на пасажирський флот транспортну роботу доцільно перевизначити через пасажиро-кілометри, $W_{pass} = n_{pass} \cdot D$, зберігши решту логіки способу.

Питому витрату палива на пасажиро-кілометр визначено як:

$$EE_{pass} = \frac{FC}{n_{pass} \cdot D}, \quad (5.5)$$

де FC – витрата палива; n_{pass} – кількість пасажирів; D – пройдена відстань.

Похідні показники для зіставлення. Для порівняння з кліматичними показниками інших видів транспорту значення EE_{pass} переводиться у викиди

діоксиду вуглецю: за стадією згоряння (*Tank-to-Wheel*) множенням на 3,114 кг CO₂/кг палива, а за повним паливним циклом (*Well-to-Wheel*) – додатковим множенням на коефіцієнт паливного апстріму 1,27, як прийнято у п. 5.4.2. Нормування на стандартні гідрологічні умови виконується, як і для вантажних суден, коефіцієнтом мілководного опору:

$$EE_{\text{рах, норм}} = \frac{EE_{\text{рах}}}{k_H}. \quad (5.6)$$

Збереження універсальних складників. Решта складників способу при цьому лишається без змін: діагностика технічного стану головних двигунів за відносним показником δSFC (клас рішень 4), урахування гідрологічних умов (глибина, швидкість течії, тип ділянки) і коефіцієнт k_H . Отже, перехід до пасажирського флоту змінює лише знаменник транспортної роботи, тоді як методичне ядро способу зберігається, що й підтверджує його універсальність.

5.5.2 Пілотна апробація способу на пасажирському судні

Як додатковий тестовий випадок розглянуто пасажирський круїзний теплохід *m/v Lisabelle* (ГД $2 \times Caterpillar$ по 783 кВт, сумарно 1566 кВт; довжина 110 м, ширина 11,40 м, осадка 1,50 м; пасажиромісткість до 152 пасажирів). Натурні дані зібрано на верхньому Дунаї у восьми експлуатаційних сегментах за період 04.05–07.06.2026 на ділянках підходу до Пассау, Надьмарош, *Strudengau*, *Au an der Donau* та Корнойбург, за ходу як проти течії, так і за течією. Первинні дані структуровано за участі капітана судна С. Гончарова. Для кожного сегмента вони охоплюють: дату, час і напрям руху; район (кілометр шляху); витрату палива, оберти й навантаження кожного з двох головних двигунів; швидкість над дном за ехолотом і за *AIS*; а також гідрологічні параметри – рівень води за найближчим водомірним постом (W_{post}), низький судноплавний регуляційний рівень посту ($HCPP_{\text{post}}$), глибину за ехолотом і розрахункову глибину H_i , швидкість течії U_c та коефіцієнт k_H .

Реконструкція швидкості течії. Швидкість течії U_c відтворено непрямо за різницею швидкості судна через воду та над дном ($U_c = STW - SOG$ за даними *AIS*). Цей прийом є самостійним методичним результатом: за наявності

відповідних логів гідрологічну складову можна реконструювати без додаткових вимірювальних засобів. Слід враховувати, що це інженерна оцінка з похибкою порядку ± 1 км/год, а опубліковані рівні водомірних постів відповідають висоті над нулем поста, а не глибині фарватеру; перехід між ними виконано співвідношенням $H_i = H_{rec,post} + (W_{post} - \text{НСРР}_{post})$.

Розрахунок реалізовано у вигляді електронної таблиці з чотирьох взаємопов'язаних аркушів, наведених у [Додатку І](#): аркуш констант і критеріїв оцінки (рис. І.1), аркуш вихідних даних по сегментах (рис. І.2), аркуш розрахованих індексів енергоефективності та діагностики головних двигунів (рис. І.3) і аркуш критеріїв та класів експлуатаційних рішень з посегментними прапорцями (рис. І.4). Така структура дає змогу простежити весь ланцюг обчислень – від первинних даних до підсумкових показників – і автоматично оновлювати результати при зміні вхідних величин або порогових критеріїв.

5.5.3 Паливні характеристики і порівняння з видами транспорту

Підсумкові посегментні результати оцінки паливних індексів для т/х *Lisabelle* наведено в табл. 5.12. Для кожного сегмента визначено сумарну витрату палива обох головних двигунів, гідрологічні умови, коефіцієнт k_H , питому витрату палива на пасажиро-кілометр EE_{pax} (5.5) за повної пасажиромісткості 152 пас., та її нормоване за гідрологічними умовами значення $EE_{pax,norm}$ (5.6).

Таблиця 5.12 – Посегментні результати апробації способу на *m/v Lisabelle*

№	Ділянка, напрям	FC_{lh} , л/ГОД	v_g , км/ГОД	U_c , км/ГОД	H_i , м	k_H	EE_{pax} , г/(пас·км)	$EE_{pax,norm}$, г/(пас·км)
1.	04.05, підхід до Пассау, проти течії	184	17,0	3,5	3,88	1,073	59,8	55,7
2.	04.05, підхід до Пассау, проти течії	145	17,0	3,5	3,85	1,073	47,1	43,9
3.	05.05, Надьмарош (1702), за течією	118	18,52	1,5	3,93	1,071	35,2	32,9
4.	05.06, Strudengau (2079), проти течії	171	10,19	4,8	3,20	1,097	92,7	84,5
5.	05.06, Strudengau (2080), проти течії	144	13,70	1,3	3,21	1,096	58,1	53,0
6.	07.06, Au an der Donau, (2106) за течією	250	22,41	3,5	3,03	1,104	61,7	55,8
7.	07.06, Au an der Donau, (2102) за течією	250	13,90	1,0	7,30	1,000	99,4	99,4
8.	07.06, Korneuburg, (1945) за течією	229	21,67	3,0	3,40	1,088	58,4	53,7

Примітки: 1 – значення FC_{lh} вказані сумарно для обох ГД без урахування витрат допоміжного обладнання на готельне навантаження; 2 – EE_{pax} розраховано для повної пасажиромісткості 152 пасажири

Питома витрата палива істотно змінюється залежно від режиму руху та гідрологічних умов – від $EE_{pax} = 35,2$ г/(пас·км) на ході за течією (сегмент 3) до 99,4 г/(пас·км) у режимах із високою витратою палива (сегмент 4 – рух проти течії $U_c = 4,8$ км/год, коли судно за швидкості через воду близько 15 км/год просувається зі швидкістю відносно землі лише $v_g = 10,2$ км/год; сегмент 7 – робота обох двигунів на підвищеній потужності за низької швидкості відносно

землі). Коефіцієнт k_H (1,00–1,10) знімає мілководну складову опору: у глибоководному сегменті 7 ($H_i = 7,3$ м) він дорівнює одиниці, а на мілководніших ділянках знижує нормований показник на 7–10 %. Це підтверджує, що чутливість способу до гідрологічних умов зберігається й для судна пасажирського класу.

Технічний стан головних двигунів за надійними режимами відповідає нормі: відносний показник $\delta SFC = \frac{SFC}{SFC_{\text{реф}}}$ ($SFC_{\text{реф}} = 190$ г/(кВт·год)) перебуває в межах 0,98–1,07, що підтверджує застосовність діагностичного критерію класу 4 і поза вантажним сегментом. Окремі режими часткового навантаження дають аномальні значення δSFC , зумовлені некаліброваним показником навантаження панелі керування, і виключаються з аналізу.

Для зіставлення з іншими видами пасажирського транспорту діапазон $EE_{\text{рах}}$ переведено у викиди CO₂-еквіваленту за повним паливним циклом ($\times 3,114 \times 1,27$), що дає ≈ 139 – 393 г CO₂-екв/(пас·км). На рис. 5.5 його зіставлено з усередненими показниками інших видів пасажирського транспорту ЄС-27 за 2018 р. (легковий автомобіль 143, авіація 126, автобус 80, залізниця 33 г CO₂-екв/(пас·км); джерело – методичний звіт ЕЕА [47]).

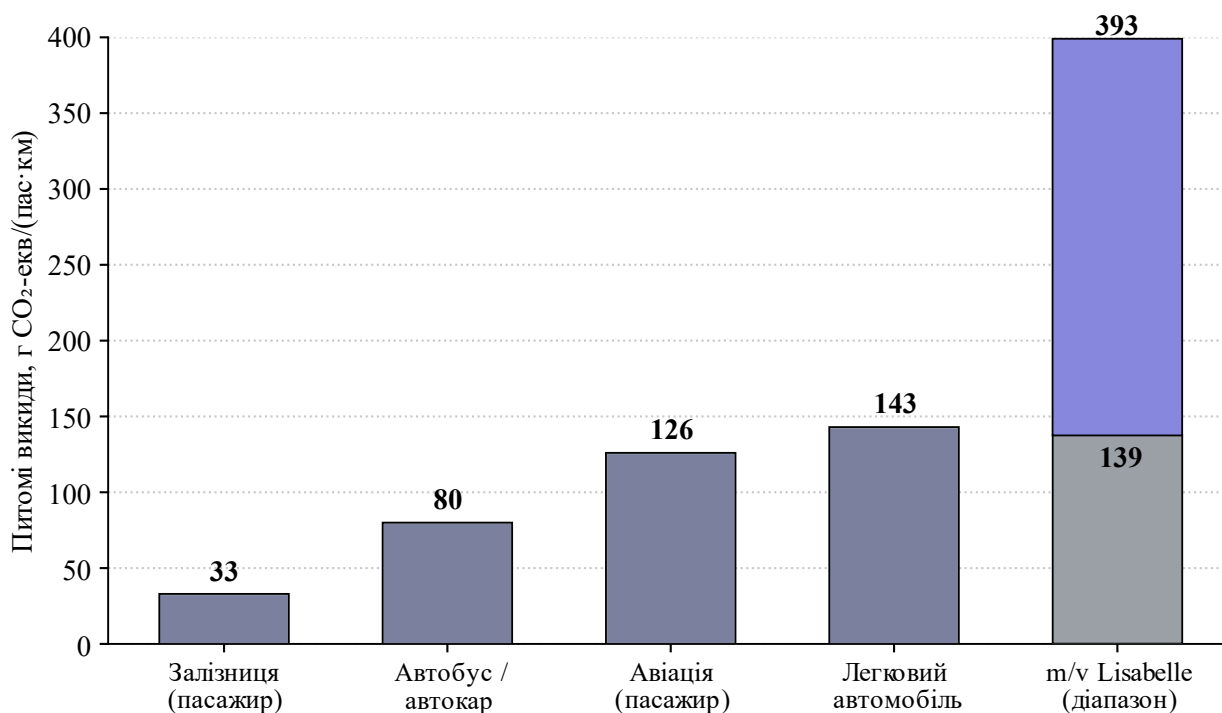


Рисунок 5.5 – Питомі викиди CO₂-екв за видами пасажирського транспорту (*Well-to-Wheel*), г/(пас·км): для інших видів – середні по ЄС-27 за 2018 р. (методичний звіт *EEA*); для *m/v Lisabelle* – діапазон за вимірними сегментами (за повної пасажиромісткості 152 пас.)

Залежно від режиму руху питомі викиди річкового круїзного судна перевищують діапазон видів залізниці та автобусів, а на ході за течією вони зіставні із легковим автомобілем та літаком. В режимах високої витрати палива (проти течії або на підвищеній потужності) перевищують усі інші види транспорту. Така висока питома інтенсивність на пасажиро-кілометр закономірна: для круїзного судна переміщення не є основною метою (судно виконує функцію готелю), тож транспортна робота на одиницю палива низька. До того ж до уваги взято лише витрату головних двигунів; повне врахування потребувало б додавання готельного навантаження та витрат палива на роботу допоміжного обладнання. Незалежно від абсолютних значень, наведений приклад демонструє головне – універсальність методичного апарата, який після перевизначення знаменника транспортної роботи коректно застосовується й до пасажирського флоту.

За характером рейсу пасажирське круїзне судно ближче до поодинокого вантажного судна, ніж до штовханого каравану. Рейс каравану має переважно ступінчастий (дискретний) характер: завантаження й конфігурація змінюються між ділянками, а режими роботи рушія тяжіють до квазісталих станів, що й уможливорює посегментне застосування дискретних індексів енергоефективності ($EE_{CO_2, disc}$). Натомість на круїзному судні завантаження протягом рейсу практично не змінюється (пасажери лишаються на борту), однак постійна мінливість гідрологічних умов змушує головні двигуни безперервно працювати на перехідних часткових режимах. Через це дискретні індекси для таких суден є незастосовними або застосовними лише умовно – на окремих ділянках зі сталою гідрологією; коректнішою є посегментна оцінка з нормуванням k_H , як виконано вище.

З погляду пріоритетів декарбонізації отримані результати вказують на різні стратегії для двох сегментів флоту. Питомі викиди круїзних пасажирських суден на пасажиро-кілометр високі (а за рейс – потенційно надмірні) і перевищують показники наземних видів транспорту, тож для них доцільно якомога швидше розглядати перехід на менш вуглецеві види палива як основний важіль зниження викидів. Натомість питомі викиди штовханих караванів на тонно-кілометр на порядок нижчі за автотранспорт і одні з найнижчих серед усіх видів (п. 5.4), тому рішення щодо модернізації чи переобладнання їхніх енергетичних установок на альтернативні палива не є першочерговими й можуть бути відкладені – ймовірно, аж до виведення суден з експлуатації з інших причин. Даючи зіставні питомі показники для різних класів суден, запропонований спосіб дозволяє обґрунтовано спрямовувати обмежені ресурси декарбонізації туди, де вони дають найбільший ефект.

5.5.4 Інші напрями подальших досліджень

Окрім адаптації до пасажирського флоту, доцільними є такі напрями розвитку запропонованого способу:

- повномасштабна сценарна оцінка ефекту модального зсуву на рівні транспортної системи, що потребує статистики вантажопотоків у тонно-

кілометрах (на відміну від наявних галузевих джерел, які подають обсяги в тоннах, – див. п. 5.4);

- масштабування реконструкції гідрологічних умов з даних AIS-журналів (архівів) на ширшу вибірку рейсів і ділянок задля підвищення повноти гідрологічного входу способу;

- уточнення гідрологічного входу через побудову локальних кривих «рівень поста → глибина фарватеру» для коректнішого обчислення гідрологічного множника k_H за посегментною глибиною;

- інтеграція даних, що автоматично передаються Річковими інформаційними службами (RIS), у розрахунок енергоефективності. Апарат RIS (передусім *Inland AIS*) у режимі, близькому до реального часу, надає більшість вхідних величин транспортної роботи й вихідних даних гідрології: позицію та швидкість відносно землі (пройдена відстань і посегментування рейсу), габарити каравану й тип судна, осадку в завантаженому стані (ступінь завантаження) та кількість осіб на борту ($n_{рах}$ для пасажирських суден), а служби рівнів води RIS – рівень води W . Натомість витрата палива й потужність енергетичної установки в RIS не передаються і потребують бортової телеметрії; швидкість відносно води (STW), потрібна для оцінки U_c , також надходить лише з борту. Поєднання даних RIS з бортовими даними про витрату палива відкриває шлях до майже автоматичного безперервного моніторингу енергоефективності на рівні флоту (MRV), узгодженого з регуляторною базою RIS (Директива 2005/44/ЄС; Регламент (ЄС) 2019/838) та з ініціативами модального зсуву ЄС і Дунайського регіону. При цьому повний потік тактичних даних RIS доступний операторам щодо власних суден і компетентним органам, тоді як практичне впровадження потребує відповідних угод про доступ до даних; крім того, дані, що їх вводять судноводії (зокрема осадка й кількість осіб на борту), різняться за повнотою й точністю;

- формування у здобувачів морської освіти фахових компетентностей та управлінських (менеджерських) якостей [4], потрібних для практичного впровадження методів оцінки й підвищення енергоефективності флоту, –

зокрема компетентностей з енергетичного менеджменту судна, моніторингу паливовикористання та вуглецевої інтенсивності, прийняття рішень на основі експлуатаційних даних і цифрових інструментів (у тому числі RIS), а також обізнаності з регуляторним контекстом ЄС; розроблення відповідного навчально-методичного забезпечення є самостійним напрямом, що поєднує результати дослідження з освітнім процесом морських закладів вищої освіти.

Наведені напрями окреслюють розвиток способу поза межами розв'язаних у роботі задач ГЗ-1–ГЗ-4. Виконана пілотна апробація на *m/v Lisabelle* підтверджує універсальність способу, побудованого в межах задачі ГЗ-3 та перевіреного в межах задачі ГЗ-4, поширюючи його застосовність на судна інших класів внутрішнього судноплавства.

Висновки до п'ятого розділу

У розділі 5 виконано прогностичне розширення та комплексну експериментально-аналітичну перевірку розробленого способу оцінки енергоефективності, а також окреслено напрями його практичного впровадження й подальшого розвитку. Отримані результати дозволяють сформулювати такі висновки.

1. Реалізовано прогностичний блок способу – Монте-Карло симуляцію рейсу в поєднанні з авторегресійним прогнозом рівнів води Дунаю, – який перетворює показник енергоефективності з детермінованого числа на випадкову величину з визначеними розподілом та імовірнісним інтервалом. На узагальненому транзитному рейсі Ізмаїл–Регенсбург (2257 км, п'ять ділянок) середнє значення показника становить 11,3–11,6 г CO₂/(т·км), а перехід від кліматологічного до прогнозного режиму звужує 95-відсотковий імовірнісний інтервал з 7,56 до 5,90 г CO₂/(т·км) (приблизно на 22 %). Це кількісно виражає інформаційну цінність оперативних гідрологічних даних для планування рейсу й реалізує вимогу врахування гідрологічних умов (вимога 2 п. 1.4.4).

2. Глобальний аналіз чутливості показав, що глибина фарватеру (частка у дисперсії 0,52) і швидкість руху (0,32) разом пояснюють понад 83 % мінливості показника енергоефективності, тоді як питома витрата палива та маса вантажу мають незначний безпосередній внесок. Це обґрунтовує пріоритет маршрутно-часового планування з урахуванням прогнозу глибин і раціонального вибору швидкісного режиму над модернізацією енергетичної установки як засобами підвищення енергоефективності.

3. Апробація на масиві 14 реальних рейсів УДП підтвердила узгоджену роботу восьми показників способу на трьох рівнях застосування (судно, флот, маршрут) і коректність інтегрального показника на етапах рейсу, де стандартний показник *EEOI* втрачає чинність через нульову транспортну роботу. Цим розв'язано допоміжну задачу ДЗ-4.2 та підтверджено відповідність вимогам структурованості за етапами рейсу й порівнянності/агрегування (вимоги 3 і 5 п. 1.4.4).

4. Кількісно оцінено потенціал підвищення енергоефективності: на масиві 14 рейсів він становить 14,5–16,3 % палива (32–36 т) та 100–112 т CO₂, з аналізом чутливості ефекту до ціни палива. Цим розв’язано допоміжну задачу ДЗ-4.3 у частині оцінки операційного потенціалу.

5. Сформульовано практичні рекомендації операторам на основі чотирьох класів експлуатаційних рішень із кількісними показниками (зокрема $\delta SFC > 1,10$ для позачергового технічного обслуговування). Природний експеримент «рейс УДП Р 2 ↔ рейс УДП Р 5» (різниця у витраті палива у 2,88 раза за ідентичної конфігурації каравану) підтвердив діагностичну здатність способу, а два аномальні рейси (УДП Р 5, Р 12) акумулюють понад 85 % відновлюваного потенціалу ефективності.

6. Обґрунтовано придатність способу до інтеграції в регуляторний контекст ЄС: на умовну одиницю транспортної роботи 1 млн т·км переведення вантажу з автотранспорту на дунайський штовханий караван дає скорочення викидів приблизно на 127 т CO₂-екв (близько 14 разів «чистіше», за повним паливним циклом, за даними ЕЕА), а показник придатний до агрегування й звітності щодо вуглецевої інтенсивності флоту відповідно до NAIADES III. Цим розв’язано задачі ДЗ-4.3 і ДЗ-1.3 та підтверджено відповідність вимогам нормування/агрегування й сумісності з регуляторним контекстом ЄС (вимоги 5 і 6 п. 1.4.4).

7. Підтверджено універсальність методичного апарата: після перевизначення транспортної роботи через пасажиро-кілометри (показник EE_{pass} , формула 5.5) спосіб поширено на судно іншого класу – пасажирський круїзний теплохід *m/v Lisabelle* (вісім експлуатаційних сегментів) – зі збереженням усіх універсальних складників (діагностика δSFC , гідрологічні показники, коефіцієнт k_H). Це розширює адаптованість способу за межі вантажного сегмента (вимога 1 п. 1.4.4).

8. Зіставлення результатів для двох класів суден дозволяє обґрунтувати різні стратегії декарбонізації: питомі викиди круїзного судна (139–393 г CO₂екв/(пас·км)) високі й вимагають першочергового розгляду переходу

на менш вуглецеві види палива, тоді як штовхані каравани на порядок ефективніші, тож модернізацію їхніх енергетичних установок можна відкласти. Даючи зіставні питомі показники для різних класів суден, спосіб дозволяє спрямовувати обмежені ресурси декарбонізації туди, де вони дають найбільший ефект.

Усі входні параметри способу доступні для вимірювання в умовах реальної експлуатації без спеціалізованого лабораторного обладнання, що відповідає вимозі практичної реалізованості (вимога 4 п. 1.4.4); подальший розвиток способу пов'язується з інтеграцією даних річкових інформаційних служб (*RIS*), повномасштабною сценарною оцінкою модального зсуву та уточненням гідрологічного входу, а також із формуванням у здобувачів морської освіти відповідних фахових компетентностей та управлінських якостей з енергетичного менеджменту й моніторингу вуглецевої інтенсивності флоту як умови практичного впровадження способу. Таким чином, результати підрозділів 5.1–5.5 у сукупності завершують розв'язання четвертої наукової задачі (ГЗ-4) і підтверджують відповідність розробленого способу всім шести вимогам, сформульованим у п. 1.4.4.

Основні наукові результати по розділу наведені в працях здобувача [4; 66–69; 72; 76; 85–87; 90–100].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу – розроблено спосіб оцінки енергоефективності руху суден внутрішнього судноплавства (самохідних суден і штовхачів з караванами несамохідних барж), що враховує склад каравану, гідрологічні умови та профіль режимів роботи головної енергетичної установки. Поставлену мету досягнуто, усі чотири наукові задачі розв’язано; основні результати полягають у такому.

1. Систематизовано наявні міжнародні та європейські показники енергоефективності суден за типами (конструктивні, операційні, гідродинамічні) і встановлено, що індекси $EEDI$, $EEXI$, $EEOI$, $EEDI_{Binnen}$, орієнтовані на морські судна та стаціонарні умови експлуатації, не забезпечують коректної й порівнянної оцінки рейсів дунайських караванів за змінного складу та змінних гідрологічних умов. На цій основі сформульовано шість вимог до способу оцінки енергоефективності суден внутрішнього судноплавства (п. 1.4.4), що визначили подальшу побудову роботи.

2. Досліджено вплив експлуатаційних і гідрологічних факторів на енергоефективність та встановлено, що мінливість гідрологічних умов зумовлює варіацію операційного показника енергоефективності в межах 40–60 %. Виконано декомпозицію рейсу за якісно різними етапами (рух у повному складі каравану, проводка, маневрування, шлюзування) з урахуванням ступінчастого профілю навантажень головної енергетичної установки та побудовано концептуальну модель енергоефективності, що відокремлює вплив завантаження, гідрології й режимів роботи установки.

3. Розроблено інтегральну математичну модель і спосіб оцінки енергоефективності на основі нормованого показника, у якому транспортну роботу приведено до стандартних гідрологічних умов через коефіцієнт мілководного опору k_H (формули (3.19)–(3.20)). Це є основним науковим результатом роботи, оскільки забезпечує нормовану й порівнянну оцінку рейсів

за змінного складу каравану та різних рівнів води Дунаю, на відміну від наявних індексів.

4. Запропоновано посегментно-дискретну форму показника (формули (3.17)–(3.18)) з урахуванням режиму проводок множителем $(2N - 1)$, що усуває математичну невизначеність стандартного показника $EEOI$ на етапах рейсу з нульовою транспортною роботою й дає змогу коректно оцінювати рейс по етапах.

5. Удосконалено модель гідродинамічного опору й потрібної потужності руху каравану – введенням формфактора мілководдя $1 + k^*$ і виокремленням пропульсивного ККД як самостійної стохастичної компоненти (коефіцієнт варіації близько 5 %), поширено застосування методу параметричної діагностики робочого процесу головних двигунів (аналітична синхронізація) на опосередковане визначення ефективної потужності і діагностику технічного стану установки за відносним показником δSFC без прямих вимірювань потужності.

6. Побудовано імовірнісно-прогностичне розширення способу, що поєднує Монте-Карло симуляцію рейсу з авторегресійним прогнозом рівнів води Дунаю й перетворює показник на випадкову величину з прогнозним імовірнісним інтервалом. Установлено, що врахування оперативних гідрологічних даних звужує 95-відсотковий імовірнісний інтервал прогнозу приблизно на 22 %, а за результатами аналізу чутливості (скринінгу) глибина фарватеру й швидкість руху домінують у формуванні розкиду показника (понад 83 % сумарного нормованого рангового внеску), що визначає пріоритет маршрутно-часового планування над модернізацією енергетичної установки.

7. Спосіб перевірено на масиві 14 реальних рейсів суден ПрАТ «Українське Дунайське пароплавство» (116 сегментів); підтверджено узгоджену роботу восьми показників на трьох рівнях застосування (судно, флот, маршрут) і коректність інтегрального показника там, де стандартний показник $EEOI$ втрачає чинність. Кількісно оцінено потенціал підвищення енергоефективності:

14,5–16,3 % палива (32–36 т) та 100–112 т CO₂ на проаналізованому масиві рейсів.

8. Розроблено систему алгоритмів обґрунтування експлуатаційних рішень із чотирма класами типових рішень та кількісними критеріями активації, інтегровану з параметричною діагностикою (зв'язок « $\delta SFC > 1,10 \rightarrow$ технічне обслуговування»). Природний експеримент «рейс P2 $\leftrightarrow$ рейс P5» (різниця у витраті палива у 2,88 раза за ідентичної конфігурації каравану) підтвердив діагностичну здатність способу, а два аномальні рейси акумулюють понад 85 % відновлюваного потенціалу ефективності.

9. Спосіб застосовано для кількісної оцінки кліматичного ефекту модального зсуву: переведення 1 млн т·км вантажоперевезень з автотранспорту на дунайський штовханий караван дає скорочення викидів приблизно на 127 т CO₂-екв (близько 14 разів «чистіше» за повним паливним циклом). Показано придатність способу до агрегування й звітності щодо вуглецевої інтенсивності флоту відповідно до регуляторного контексту ЄС; обґрунтовано, що відносно висока енергоефективність караванів дозволяє не відносити цей клас флоту до першочергових об'єктів модернізації та переведення на альтернативні види палива.

10. Підтверджено універсальність розробленого способу: після перевизначення транспортної роботи через пасажиро-кілометри (показник EE_{pass} , формула (5.5)) його поширено на судно іншого класу – пасажирський круїзний теплохід *m/v Lisabelle*, для якого питомі викиди становлять 139–393 г CO₂-екв/(пас·км). Це розширює застосовність способу за межі вантажного сегмента внутрішнього судноплавства.

На основі теоретичних та експериментальних досліджень доведено робочу гіпотезу, згідно з якою спосіб оцінки енергоефективності руху суден внутрішнього судноплавства, що одночасно враховує склад каравану (кількість, тип і завантаженість барж), гідрологічні умови плавання (глибину фарватеру, швидкість течії) та профіль режимів роботи головної енергетичної установки і реалізує нормування показника на стандартні умови експлуатації, забезпечує

об'єктивну та порівнянну оцінку енергоефективності як самохідних суден, так і штовхачів з караванами на різних ділянках Дунаю й може бути використаний як інструмент для прийняття обґрунтованих експлуатаційних рішень у контексті європейських підходів до індексів енергоефективності для суден внутрішнього водного транспорту.

Наукова новизна роботи полягає у вперше розробленому способі оцінки енергоефективності з використанням запропонованого гідрологічного нормування показника енергоефективності рейсу, що адаптує операційний індекс типу ЕЕОІ до умов внутрішнього судноплавства зі змінним складом каравану; у посегментно-дискретній та імовірісно-прогностичній формах показника і системі обґрунтування експлуатаційних рішень; а також в удосконаленні моделі гідродинамічного опору, а метод параметричної діагностики двигунів поширено на задачу опосередкованого визначення ефективної потужності в оцінці енергоефективності рейсу. Практичну значущість підтверджено впровадженням результатів у діяльності Дунайської Комісії, у практику ПрАТ «Українське Дунайське пароплавство» (у тому числі на т/х «Механик Синилов»), при апробації на пасажирському теплоході *m/v Lisabelle* та в навчальному процесі кафедри інженерних дисциплін Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія». Упровадження результатів у навчальний процес засвідчує також потребу у формуванні в здобувачів морської освіти відповідних фахових компетентностей та управлінських якостей – з енергетичного менеджменту, моніторингу вуглецевої інтенсивності й прийняття рішень на основі експлуатаційних даних і цифрових інструментів, – що є необхідною умовою практичної реалізації методів підвищення енергоефективності флоту. Таким чином, поставлену в роботі мету досягнуто, а сукупність одержаних результатів вирішує актуальну науково-прикладну задачу підвищення енергоефективності руху суден внутрішнього судноплавства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 2018 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships : Resolution MEPC.308(73). 26.10.2018.URL: [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) (дата звернення: 02.07.2023).
2. 2022 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships : Resolution MEPC.364(79). URL: [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) (дата звернення: 22.06.2023).
3. Barcanescu M. et al., Report on the zero – emission strategy IWT, update of STEERER work. URL: <https://platina3.eu/download/zero-emission-iwt-strategy/> (дата звернення: 02.05.2026).
4. Bezlutska, O., Leshchenko, A., Zahorodnia, Y., Tarasenko, T., Sherman, M., & Smyrnova, I. (2021). Management qualities of the marine cadets. Journal of Management Information and Decision Sciences, 24(1), 1-12. <https://www.abacademies.org/articles/Management-qualities-of-the-marine-cadets-1532-5806-24-1-235.pdf>.
5. Bhowmik N. G., Soong T. W. Identification of study approaches to determine physical impacts of commercial navigation on the Upper Mississippi River System. Illinois State Water Survey, Contract Report 531. Champaign, IL, 1999. 124 p. URL: <https://www.isws.illinois.edu/pubdoc/CR/ISWSCR-531.pdf> (дата звернення: 04.04.2026).
6. Boyer B. et al, Report on policy recommendations on regulatory pathway towards zero emission fleet. URL: <https://platina3.eu/download/towards-zero-emission-fleet/> (дата звернення: 02.05.2026).
7. C.N.F.R. NAVROM S.A. Galați. Flota de împingătoare / Флот штовхачів. URL: <https://www.navrom.ro/index.php/ro/impingatoare> (дата звернення: 13.04.2026).

8. C.N.F.R. NAVROM S.A. Galați. Prezentare generală. URL: <https://www.navrom.ro/index.php/ro/cnfr-navrom-s-a-galati> (дата звернення: 13.04.2026).
9. CCNR Roadmap for reducing inland navigation emissions / Central Commission for the Navigation of the Rhine. Strasbourg : CCNR, 2022. 75 p. URL: https://www.ccr-zkr.org/files/documents/Roadmap/Roadmap_en.pdf (дата звернення: 04.05.2023).
10. Central Commission for the Navigation of the Rhine. Possibilities for reducing fuel consumption and greenhouse gas emissions from inland navigation. Strasbourg: CCNR, 2013. 86 p. URL: https://www.ccr-zkr.org/files/documents/rapports/Thg_ber_en.pdf (дата звернення: 03.04.2026).
11. CESNI. Evaluating the Energy Requirement of Inland Vessels Using Energy Efficiency Indices (*EEDI_{Binnen}*). Expert Group on Technical Issues (PT). – Strasbourg : CESNI, 2021. – 47 p. URL: https://www.cesni.eu/wp-content/uploads/2021/03/cesnipt_energyindex_en.pdf (дата звернення: 01.04.2026).
12. Chimimport. Bulgarian River Shipping J.S.Co. URL: <https://www.chimimport.bg/en/sektori/transport/water/brp> (дата звернення: 13.04.2026).
13. Dalheim Ø. Ø., Steen S. Uncertainty in the real-time estimation of ship speed through water. *Ocean Engineering*. 2021. Vol. 235. Article 109423. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109423>.
14. Danube Commission. Market observation for Danube navigation, results in 2024. URL: <https://www.danubecommission.org/dc/en/danube-navigation/market-observation-for-danube-navigation/market-observation-for-danube-navigation-results-in-2024/> (дата звернення: 01.04.2026).
15. Danube Commission. Statistical Yearbook 2022. URL: https://www.danubecommission.org/uploads/doc/2025/Stat_2022/en_stat_2022.pdf (дата звернення: 10.04.2026).

16. Danube Commission. Поздовжній профіль ріки Дунай / Längsprofil der Donau / Profil en long du Danube / Продольний профіль реки Дунай. – Будапешт : Danube Commission, 2021. URL: https://www.danubecommission.org/uploads/doc/2021/long_profil_2021.pdf (дата звернення: 10.04.2026).

17. Danube Commission. Щорічні доповіді про судноплавний шлях Дунай за 2005–2020 роки / Jahresbericht Über Die Wasserstrasse Donau 2005–2020 / Rapport Annuel Sur La Voie Navigable Du Danube 2005–2020 / Ежегодные доклады о судоходном пути Дунай за 2005–2020 гг. Будапешт : Danube Commission, 2007–2025. URL: <https://www.danubecommission.org/dc/en/extranet/e-library/>.

18. Directive (EU) 2016/1629 of the European Parliament and of the Council of 14 September 2016 laying down technical requirements for inland waterway vessels. OJ L 252, 16.9.2016. P. 118–176. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2016/1629/oj/eng> (дата звернення: 01.04.2026).

19. Döring M., Guesnet G., Schneekluth H. Mathematical modeling of propulsion forces in shallow waters. Karlsruhe: Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW), 2023. 47 p. URL: <https://henry.baw.de/bitstreams/ab49111f-89d7-42ec-aeaa-41855d399cc6/download> (дата звернення: 03.04.2026).

20. European Commission. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. NAIADES III: Boosting future-proof European inland waterway transport. COM(2021) 324 final. – Brussels : European Commission, 2021. – 32 p. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52021DC0324> (дата звернення: 01.04.2026).

21. Faber J., Hanayama S., Zhang S., Pereda P., Comer B., Hauerhof E., Schim van der Loeff W., Smith T., Zhang Y., Kosaka H. Fourth IMO GHG Study : Full report. International Maritime Organization, 2020. 524 p. URL: https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/07/Fourth-IMO-GHG-Study-2020-Full-report-and-annexes_compressed.pdf.

22. FAIRway Danube II. URL: <https://navigation.danube-region.eu/fairway-danube-ii/> (дата звернення: 10.04.2026).
23. First-DDSG Logistics Holding GmbH. Technical specifications. URL: <https://www.ddsg-holding.com/technical-specifications/> (дата звернення: 05.04.2026).
24. Friedhoff B. et al., State of play and requirements for the label for inland vessels. URL: https://platina4action.iwtprojects.eu/wp-content/uploads/2025/01/250123_PLATINA4Action_D3.1-State-of-play-and-requirements-for-the-label-for-inland-vessels.pdf (дата звернення: 02.05.2026).
25. Gastescu P., Serban P. The Danube River and its Delta: Hydrographic and Hydrologic Features. Proceedings of Working with Water Resources. 2023. URL: http://www.limnology.ro/wrw2023/1_Gastescu.pdf (дата звернення: 10.04.2026).
26. Gebraad J. et al., Report on consolidated R&D roadmap and implementation plan for IWT. URL: <https://platina3.eu/download/rd-roadmap-for-iwt/> (дата звернення: 02.05.2026).
27. Gharib H., Kovács G. A Review of Prognostic and Health Management (PHM) Methods and Limitations for Marine Diesel Engines: New Research Directions. *Machines*. 2023. Vol. 11, No. 7. P. 695. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines11070695>.
28. Godet A., Nurup J. N., Saber J. T., Panagakos G., Barfod M. B. Operational cycles for maritime transportation: A benchmarking tool for ship energy efficiency. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2023. Vol. 121. Art. 103840. DOI: 10.1016/j.trd.2023.103840.
29. Hasselaar T. W. F. Speed Through Water measurement on ships in service. *Green Ship Technology Conference (GST 2015)*, Copenhagen, March 2015. 11 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/381321018_Speed_Through_Water_measurement_on_ships_in_service#fullTextFileContent (дата звернення: 26.04.2026).

30. IMO MEPC.1/Circ.684. Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (EEOI). – London : IMO, 2009. – 17 p. URL: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/M2%20EE%20regulations%20and%20guidelines%20final.pdf> (дата звернення: 01.04.2026).

31. IMO MEPC.346(78). 2022 Guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan (SEEMP). – London : IMO, 2022. – 36 p. URL: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.346%2878%29.pdf> (дата звернення: 01.04.2026).

32. IMO Resolution MEPC.203(62). Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973 (Inclusion of regulations on energy efficiency for ships in MARPOL Annex VI). – London : IMO, 2011. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.203\(62\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.203(62).pdf) (дата звернення: 01.04.2026).

33. IMO Resolution MEPC.328(76). 2021 Revised MARPOL Annex VI. – London : IMO, 2021. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.328\(76\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.328(76).pdf) (дата звернення: 01.04.2026).

34. IMO Resolution MSC.96(72). Adoption of new and amended performance standards for navigational equipment. International Maritime Organization, 22 May 2000. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.96\(72\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.96(72).pdf) (дата звернення: 26.04.2026).

35. IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships 2023. International Maritime Organization. : веб-сайт. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/2023-IMO-Strategy-on-Reduction-of-GHG-Emissions-from-Ships.aspx> (дата звернення: 16.10.2024).

36. Implementing Energy Efficiency Design Index (EEDI) / Indian Register of Shipping. Mumbai : Indian Register of Shipping, 2023. 13 p. URL: <https://www.irclass.org/media/2368/energy-efficiency-design-index.pdf> (дата звернення: 16.05.2023).
37. ISO/IEC Guide 98-3. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. URL: <https://www.iso.org/resources/publicly-available-resources-top> (дата звернення: 17.05.2026).
38. Kalajdzic M., Vasilev M., Momcilovic N. Evaluating an Inland Waterway Cargo Vessel's Energy Efficiency Indices. *Polish Maritime Research*. 2022. Vol. 29, № 2. P. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0014>.
39. Kalajdžić M., Vasilev M., Momčilović N. Inland waterway cargo vessel energy efficiency in operation. *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*. 2023. Vol. 74, No. 3. P. 27–45. DOI: 10.21278/brod74304.
40. Karaarslan S., Quispel M., Kreukniet N. D3.1 Regional inland application of the model. NEEDS project, WP3 – Regional inland application of the dynamic techno-economic model. URL: https://waterborne.eu/images/D07_NEEDS_WP3-D3.1_Regional_inland_application_of_the_model.pdf (дата звернення: 05.04.2026).
41. Koh K. K., Yasukawa H. Comparison study of a pusher–barge system in shallow water, medium shallow water and deep water conditions. *Ocean Engineering*. 2012. Vol. 46. P. 9–17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.03.002>.
42. Lee T., Cho J., Lee J. Mixing properties of emulsified fuel oil from mixing marine bunker-c fuel oil and water. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, № 11. Art. 1610. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10111610>.
43. Lu D., Theotokatos G., Zhang J., Tang Y., Gan H., Liu Q., Ren T. Numerical investigation of the high pressure selective catalytic reduction system impact on marine two-stroke diesel engines. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2021. Vol. 13. P. 659–673. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2021.09.003>.

44. Manual on Danube Navigation. 4th ed. via donau – Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH. URL: https://www.viadonau.org/fileadmin/user_upload/Manual_on_Danube_Navigation.pdf (дата звернення: 05.04.2026).

45. Mao X., Meng Z. Decarbonizing China's coastal shipping: the role of fuel efficiency and low-carbon fuels : Working Paper 2022-20. Washington, DC : International Council on Clean Transportation, 2022. 20 p. URL: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/06/china-marine-decarbonizing-chinas-coastal-shipping-jun22.pdf> (дата звернення: 16.04.2026).

46. MARPOL 73/78 Consolidated Edition 2017. Annex VI: Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships. – London : IMO, 2017. – 200 p. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Index-of-MEPC-Resolutions-and-Guidelines-related-to-MARPOL-Annex-VI.aspx> (дата звернення: 01.04.2026).

47. Methodology for GHG Efficiency of Transport Modes – Final Report. Fraunhofer ISI & CE Delft, для Європейського агентства з довкілля (EEA), Framework Service Contract EEA/ACC/18/001/LOT 1, 2021 (CE Delft publ. 200258). URL: https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/05/CE_Delft_200258_Methodology_GHG_Efficiency_Transport_Modes.pdf (дата звернення: 01.04.2026).

48. Molland A. F., Turnock S. R., Hudson D. A. Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Ship Propulsive Power. 2nd ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2017. 605 p. ISBN 978-1107142060.

49. Muilerman G-J., Quispel M., Report on policy implementation plan for IWT (roadmap and matrix). URL: <https://platina3.eu/download/policy-roadmap/> (дата звернення: 02.05.2026).

50. Napolitano P., Liotta L. F., Guido C., Tornatore C., Pantaleo G., La Parola V., Beatrice C. Insights of Selective Catalytic Reduction Technology for Nitrogen Oxides Control in Marine Engine Applications. *Catalysts*. 2022. Vol. 12, № 10. Art. 1191. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal12101191>.

51. Pauli G., Ley J. Energy Efficiency Indices for carbon foot printing and as instrument for CO₂-emission reduction of inland vessels. Berlin : Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, 2023. 31 p. 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/> (дата звернення: 17.06.2023).

52. Platform for the implementation of a future inland navigation action programme PLATINA 3 : вебсайт. URL: <https://platina3.eu/download/5th-stage-all-presentations-and-agenda/> (дата звернення: 11.06.2023).

53. Pro Danube International. GRENDel – GReen and EfficieNt DanubE fLeet: Project Final Report. – Vienna : Pro Danube International, 2020. URL: <https://dtp.interreg-danube.eu/approved-projects/grendel> (дата звернення: 01.04.2026).

54. Psaraftis H. N., Kontovas C. A. Speed models for energy-efficient maritime transportation: a taxonomy and survey. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2013. Vol. 26. P. 331–351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.09.012>.

55. Quispel M., Tachi K., Roux L. Report on implementation of European IWT emission label / energy index / GLEC for vessels. PLATINA3 Deliverable D2.6. Grant Agreement No. 101006364. – Amsterdam : SPB / CCNR, 2022. – 139 p. URL: https://www.danubecommission.org/uploads/doc/Platina3/02_Fleet/D2.6-Label-index-inland-vessels_public-2.pdf (дата звернення: 01.04.2026).

56. Raven H. C. Shallow-water effects in ship model testing and at full scale. *Ocean Engineering*. 2019. Vol. 189. Art. 106343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106343>.

57. REWWay. Danube infrastructure. URL: <https://www.rewway.at/en/danube-infrastructure/> (дата звернення: 10.04.2026).

58. Rhenus PartnerShip Serbia. Our fleet. URL: <https://www.rhenus.rs/en/our-fleet/> (дата звернення: 05.04.2026).

59. Rogozin A., Marunych O., Riabchenko A. Energy efficiency of inland waterways transport for agriculture: the Ukraine case study. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, № 19. Article 8937. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11198937>.
60. Romanescu G., Stoleriu C. C. Flow variability of the Lower Danube River: an up-to-date overview. In: *The Lower Danube River*. Cham : Springer, 2023. (Springer Geography). DOI: 10.1007/978-3-031-03865-5_1.
61. T. Salmi, A. Määttä, P. Anttila, T. Ruoho-Airola, T. Amnell. Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates – the Excel template application MAKESENS. Helsinki : Finnish Meteorological Institute, 2002. 35 p. (Publications on Air Quality ; № 31). URL: <https://www.yumpu.com/en/document/read/38053618/excel-template-for-the-calculation-of-trend-statistics-of-ilmanlaatu/1> (дата звернення 25.06.2026).
62. Tabaczek T., Kulczyk J., Zawislak M. Analysis of hull resistance of pushed barges in shallow water. *Polish Maritime Research*. 2007. Vol. 14, No. 2. P. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10012-007-0002-4>.
63. Tachi Kh. et al., Stocktaking and good practices. URL: https://platina4action.iwtprojects.eu/wp-content/uploads/2025/01/250123_PLATINA4Action_D4.1_Stocktaking-and-good-practices.pdf (дата звернення: 02.05.2026).
64. Tachi Kh., Quispel M., Friedhoff B., TCO and economic scenario analysis. URL: https://platina4action.iwtprojects.eu/wp-content/uploads/2026/04/260331_PLATINA4Action_D4.2_TCO-and-economic-scenario-analysis.pdf (дата звернення: 02.05.2026).
65. Tachi Kh., Quispel M., Gebraad J., Requirements, barriers and opportunities for industry support. URL: https://platina4action.iwtprojects.eu/wp-content/uploads/2026/04/260331_PLATINA4Action_D4.3_Requirements-barriers-and-opportunities-for-industry-support.pdf (дата звернення: 02.05.2026).
66. Tarasenko T, Zalozh V and 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, conference 1. P. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1297/1/012019>.

67. Tarasenko T., Zalozh V., Maksymov S. Approach of using a system of evaluation indicators in determining the efficiency of ships in the Danube shipping. *Scientific Bulletin of Naval Academy*. 2022. Vol. XXV. P. 66–74. DOI: <https://doi.org/10.21279/1454-864X-22-I1-008>.
68. Tarasenko T., Zalozh V., Varbanets R., Minchev D. Considerations regarding reducing Danube navigation emissions. *Scientific Bulletin of Naval Academy*. 2021. Vol. XXIV. P. 174–183. DOI: <https://doi.org/10.21279/1454-864X-21-I1-021>.
69. Tarasenko Tetyana, Zalozh Vitalii. Comparative analysis of energy transition scenarios in maritime shipping. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, Vol. XXVIII 2025, pg. 78-86. doi: 10.21279/1454-864X-25-I1-008.
70. Understanding the Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI). RBSA. 2015. 15 p. URL: https://www.safety4sea.com/wp-content/uploads/2015/09/RBSA-Understanding-the-EEOI-Summary-2015_08-.pdf (дата звернення: 02.04.2026).
71. Varbanets R. Determination of top dead centre location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis . *Diagnostyka*. 2020. № 21(1). P. 51–60. DOI: <https://doi.org/10.29354/diag/116585>.
72. 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, Issue 3. P. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0037>.
73. viadonau – Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH. Locks on the Danube. URL: <https://www.viadonau.org/en/economy/the-danube-transport-axis/locks> (дата звернення: 10.04.2026).
74. viadonau – Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH. Navigability of the Danube. URL: <https://www.viadonau.org/en/economy/the-danube-transport-axis/navigability> (дата звернення: 10.04.2026).
75. Wang Z., Li T., Mei Q., Wang S., Zhao X., Qi J., Guedes Soares C. Study on total resistance of ships navigating in shallow water. *Ocean Engineering*. 2026. Vol. 343, Part 5. Article 123463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.123463>.

76. Zalozh V., Tarasenko T., Varbanets R. Efficiency Control Improvement of Diesel Engines Conditions by Using the Method of Analytical Synchronization of Monitored Data. *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*. 2020. Vol. 2, no. 7. P. 151–159. DOI: <https://doi.org/10.47577/technium.v2i7.1829>.
77. Zeng Q. A method to improve the prediction of ship resistance in shallow water. – PhD dissertation. – Delft University of Technology, 2019. <https://doi.org/10.4233/uuid:d4d8524a-fedc-4949-a953-f5848a1634bb>.
78. Zeng Q., Hekkenberg R., Thill C. On the viscous resistance of ships sailing in shallow water. *Ocean Engineering*. 2019. Vol. 190. Article 106434. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106434>.
79. Zentari L., el Moctar O., Lassen J., Hallmann R., Schellin T. E. Experimental and numerical investigation of shallow water effects on resistance and propulsion of coupled pusher-barge convoys. *Applied Ocean Research*. 2022. Vol. 121. Article 103048. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103048>.
80. 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. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115731.
81. Zhang L., Xing L., Dong M., Chen W. Resistance Tests of an Articulated Pusher Barge System in Deep and Shallow Water. *Proceedings of the ASME 2021 40th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Volume 6: Ocean Engineering*. Virtual, Online. June 21–30, 2021. V006T06A035. DOI: 10.1115/OMAE2021-61754.
82. Zhu Y., Zhou W., Xia C., Hou Q. Application and Development of Selective Catalytic Reduction Technology for Marine Low-Speed Diesel Engine: Trade-Off among High Sulfur Fuel, High Thermal Efficiency, and Low Pollution Emission. *Atmosphere*. 2022. Vol. 13, № 5. Art. 731. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos13050731>.

83. Zis T., North R. J., Angeloudis P., Ochieng W. Y., Bell M. G. H. Evaluation of cold ironing and speed reduction policies to reduce ship emissions near and at ports. *Maritime Economics & Logistics*. 2014. Vol. 16, № 4. P. 371–398. DOI: <https://doi.org/10.1057/mel.2014.6>.

84. Бондаренко Ю. А., Онищенко С. П. Система техніко-експлуатаційних показників роботи суден-контейнеровозів у рамках лінійних сервісів. *Transport Development*. 2024. Т. 2, № 21. С. 35–50. DOI: 10.33082/td.2024.2-21.04.

85. Варбанець Р. А., Залож В. І., Тарасенко Т. В., Белоусова Т. П., Єриганов О. В. Метод аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в експлуатації. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2020. Вип. 7. С. 118–128. DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2020.7.17>.

86. Варбанець Р. А., Залож В. І., Тарасенко Т. В., Кирнац В. І., Клименко В. Г., Александровська Н. І. Деякі аспекти застосування системи DEPAS D4.0H для підвищення енергоефективності суден внутрішнього плавання. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2021. Вип. 2(2021). С. 60–67. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2021.2.08>.

87. Варбанець Р. А., Залож В. І., Тарасенко Т. В., Кучеренко Ю. М., Клименко В. Г. Особливості аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2020. Вип. 1(2020). С. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2020.1.02>.

88. Голіков В. А., Козьмініх М. А., Онищенко О. А. Методологія наукових досліджень : навч. посіб. Одеса : ОНМА, 2014. 163 с.

89. Залож В. І. Огляд сучасних тенденцій розвитку систем діагностики суднових дизельних двигунів по параметрам робочого процесу. *Розвиток транспорту*. 2024. Вип. 1(20). С. 44–56. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.1-20.05>.

90. Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології : монографія / Букарос А. Ю., Онищенко О. А., Тарасенко Т. В. та ін.; за наук. ред. В. А. Голікова та О. А. Онищенко. – Миколаїв : Іліон, 2022. – 408 с. ISBN 978-617-534-687-7. DOI: 10.6084/m9.figshare.20279652.

91. Суворов П. С., Тарасенко Т. В., Залож В. І. Аналіз трансформації оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу у внутрішньому водному транспорті. *Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. 2023. Вип. 1(37). С. 161–170. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.18>.

92. Суворов П. С., Тарасенко Т. В., Залож В. І. Деякі питання оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу у внутрішньому судноплавстві. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2023. Вип. 2(2023). С. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2023.2.05>.

93. Суворов П. С., Тарасенко Т. В., Залож В. І. Обмежувальні фактори в оцінці енергоефективності суден-штовхачів великовантажних составів у внутрішньому плаванні. *Автоматизація суднових технічних засобів*. 2020. № 26. С. 94–109. DOI: <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2020-1-26-94-109>.

94. Суворов П. С., Тарасенко Т. В., Залож В. І. Оцінка енергоефективності для умов навігаційних невизначеностей у внутрішньому судноплавстві. *Автоматизація суднових технічних засобів*. 2019. № 25. С. 90–100. URL: <http://ast.onma.edu.ua/wp-content/uploads/2019/12/astf-2019-1-25-90-100.pdf> (дата звернення: 21.06.2023).

95. Суворов П. С., Тарасенко Т. В., Залож В. І. Оцінка факторів, що визначають енергоефективність суден внутрішнього плавання. *Автоматизація суднових технічних засобів*. 2018. Вип. 24. С. 94-102. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/asts_2018_24_12.

96. Суворов П. С., Тарасенко Т. В., Залож В. І. Принципи визначення індикаторів енергоефективності для суден внутрішнього плавання. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2018. № 2 (243). С. 203–207. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VSUNU_2018_2_38, [http://sazt-snu.in.ua/uploads/14_05_BA_2_\(243\).pdf](http://sazt-snu.in.ua/uploads/14_05_BA_2_(243).pdf).

97. Суворов П. С., Тарасенко Т. В., Залож В. І., Максимов С. Б. Про співвідношення показників енергоефективності та екологічності для суден внутрішнього плавання. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2019. № 3 (251). С. 168–175. URL: [http://sazt-snu.in.ua/uploads/BA_3_\(251\).pdf](http://sazt-snu.in.ua/uploads/BA_3_(251).pdf).

98. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту. Колективна монографія /за редакцією В. Чимшир/. – Ізмаїл : ДІ НУ «ОМА» 2020 – Київ: Міленіум, 2020. 472 с. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2021/04/monografia2020.pdf>.

99. Тарасенко Т. В. Аналіз моделей витрати палива, викидів та показників енергоефективності для штовхачів з караванами барж у дунайському суднопластві. *Наука і техніка сьогодні*, 2026, Випуск 2(56). С. 2281-2293. doi: 10.52058/2786-6025-2026-2(56)-2281-2293.

100. Тарасенко Т. В., Мазур Т. М. Основні методи моніторингу для управління енергоефективністю на судні згідно додатку VI МК МАРПОЛ 73/78. *Водний транспорт*, 2025, Випуск 2(43). С. 117-122. doi: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.10>.

101. Тимошевський Б. Г., Ткач М. Р. Підвищення ефективності судових двигунів, які працюють на важкому паливі, збагаченому воднем. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2024. Вип. 100. С. 89–101. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.100.0.

102. Українське Дунайське пароплавання. Річкові барже-буксирні каравани. URL: <https://www.udp.one/richkovi-barzhe-buksyrni-karavany/> (дата звернення: 05.04.2026).

Документи про впровадження



DONAUKOMMISSION
ДУНАЙСКАЯ КОМИССИЯ
COMMISSION DU DANUBE

DC 90/VI-2026

Budapest, June, 26, 2026
PS

Subject: – On the Implementation of the Research Results of T. V. Tarasenko
Re: – Working Group on technical Matters (*May, 12–13, 2026*)
Addition: – 0 -

Confirmation of Implementation of the Research Results of T. V. Tarasenko

On the basis of information officially submitted by the competent authorities of Ukraine, the proposed method for assessing the energy efficiency of vessel movement in inland navigation, developed by Ms Tetyana V. Tarasenko, was presented and heard at the meeting of the Working Group on Technical Questions of the Danube Commission, held on 12–13 May 2026, and was discussed by the participants of the meeting.

The participants noted that the proposed method constitutes a fundamentally new approach to determining energy efficiency, in which the entire duration of the voyage is considered according to its stepwise operational profile. This makes it possible to account for the variable factors of a voyage – including the quantitative composition of the convoy, its loading, navigation under different hydrological conditions, and the operating parameters of the power plant – while simultaneously providing diagnostics and establishing a basis for management decisions.

Following the discussion, the meeting decided:

- to submit the work for review to the Development Centre for Ship Technology and Transport Systems (DST), Duisburg, Germany, and to CE Delft, Delft, the Netherlands;
- to adopt the proposed method as the methodological basis for the operational assessment of the energy efficiency of Danube convoys, with a view to taking a decision on its further standardization and regulation process.

In adopting this decision, the meeting took into account that the method falls directly within the scope of the Danube Commission's competence, in particular as regards:

- the monitoring of the energy efficiency of the Danube fleet and the substantiation of policy aimed at shifting freight flows to inland waterway transport (modal shift), in line with the goals of the EU Sustainable and Smart Mobility Strategy;
- addressing the key barrier to modal shift — the vulnerability of inland waterways to hydrological variability: normalisation of shallow-water resistance by the coefficient k_H , together with the probabilistic forecast of energy efficiency, makes the assessment of inland waterway transport robust to fluctuations in water levels and ensures the comparability of voyages under different hydrological conditions;

- the provision of a comparable, full fuel-cycle (Well-to-Wake) basis for assessing the climate advantage of Danube convoys over other modes of transport, suitable for substantiating modal-shift decisions against international benchmarks.

In view of the above, the meeting concluded that the proposed method possesses both scientific and practical value and represents a significant contribution to the common technical toolkit for Danube navigation efficiency assessment, as envisaged by Annex 5 to the Roadmap for the decarbonisation of the Danube fleet.



Petro Suvorov

Chief Engineer of the Secretariat of the Danube Commission





**ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
«УКРАЇНСЬКЕ ДУНАЙСЬКЕ ПАРОПЛАВСТВО»
(ПрАТ «УДП»)**

вул. Флотська, 28, м. Ізмаїл, Ізмаїльський район, Одеська обл., 68600, Україна,
e-mail: office@udr.one, сайт: www.udr.one, ідентифікаційний код 01125821

15.06.2026

№ 652/01-01.3/05

Г

Г

На № _____ від _____

Г

Г

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

ТАРАСЕНКО Тетяни Владиславівни

Цим актом засвідчується, що результати дисертаційної роботи ТАРАСЕНКО Тетяни Владиславівни на тему розробки способу оцінки енергоефективності руху суден у внутрішньому судноплаванні, виконаної на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук впроваджено в практику експлуатаційної діяльності ПрАТ «Українське Дунайське пароплавство».

Об'єктом впровадження є розроблений автором спосіб оцінки енергоефективності руху самохідних суден з караванами несамохідних барж та програмний інструмент підтримки прийняття рішень на основі електронних таблиць.

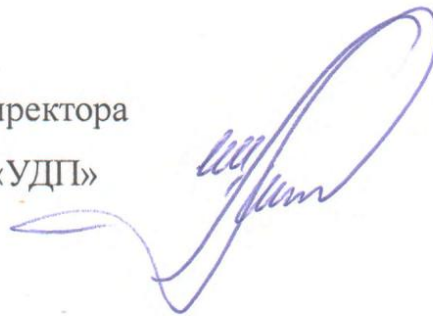
Спосіб використано для оцінки та порівняльного аналізу енергоефективності рейсів суден пароплавства, виявлення резервів зниження витрати палива й обґрунтування експлуатаційних рішень щодо вибору швидкісного режиму та конфігурації каравану. Застосування способу дозволило виявити потенціал зниження витрати палива в межах 14,5–16,3 % на проаналізованому масиві рейсів.

Виконаний порівняльний аналіз підтверджує, що значення показників енергоефективності (питомих витрати палива та викидів на одиницю

транспортної роботи) штовхачів та самохідних суден з караванами барж є відносно низькими, тобто зазначені судна є енергоефективними порівняно з іншими видами транспорту. Це дає підстави не відносити цей клас суден до першочергових об'єктів модернізації головних енергетичних установок та переведення на альтернативні (менш вуглецеві) види палива й відкласти прийняття відповідних рішень на пізніший термін.

Відкладення масштабних проєктів модернізації енергетичних установок та переобладнання суден на альтернативні види палива для цього класу флоту, обгрунтоване відносно високою його енергоефективністю, має також відчутний економічний ефект. Рациональний розподіл обмежених капітальних ресурсів і перенесення капіталомістких рішень на пізніший термін на користь першочергових заходів є суттєвим чинником підвищення фінансової стійкості підприємства.

Заступник генерального директора
з технічних питань ПрАТ «УДП»



Олег МУДРАЧЕНКО



**ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
«УКРАЇНСЬКЕ ДУНАЙСЬКЕ ПАРОПЛАВСТВО»
(ПрАТ «УДП»)**

вул. Флотська, 28, м. Ізмаїл, Ізмаїльський район, Одеська обл., 68600, Україна,
e-mail: office@udp.one, сайт: www.udp.one, ідентифікаційний код 01125821

15.06.2026 № 651/01-01.3105

Г

Г

На № _____ від _____

Г

Г

ДОВІДКА

про достовірність використаних даних

Видана ТАРАСЕНКО Тетяні Владиславівні про те, що експлуатаційні (рейсові) дані щодо руху самохідних суден ПрАТ «Українське Дунайське пароплавство», використані в дисертаційній роботі на тему розробки способу оцінки енергоефективності руху суден у внутрішньому судноплаванні для апробації розробленого здобувачем способу оцінки енергоефективності, а саме – дані 12 рейсів штовхачів типу «Zaporozhye» з караванами різного складу, рейсу т/х «Механик Синилов» з караваном, діагностичного баластного рейсу т/х «Борис Макаров» є достовірними й відповідають фактичним даним експлуатації зазначених суден.

При цьому під час теплотехнічних вимірювань штовхачів типу «Zaporozhye» та під час параметричної діагностики т/х «Механик Синилов» гідрологічні умови не фіксувалися. Ретроспективна реконструкція глибин фарватеру, виконана автором самотійно на основі середньодобових рівнів (дані Дунайської Комісії), узгоджується з відомими сезонними характеристиками відповідних років. Зауважень щодо застосування такого підходу не маємо.

Зазначені дані надано здобувачеві для використання в наукових цілях.
Заперечень щодо їх використання в дисертаційній роботі та наукових публікаціях
здобувача немає.

Заступник генерального директора
з технічних питань ПрАТ «УДІП»



Олег МУДРАЧЕНКО



ЗАТВЕРДЖУЮ
Капітан т/х «Механик Синилов»

 Д. А. Заяц
“ 26 ” 12 2020 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційних досліджень докторанта
Тарасенко Тетяни Владиславівни

Даний Акт складено у підтвердження тому, що результати дисертаційних досліджень Тарасенко Т.В. використані на т/х «Механик Синилов» Приватного акціонерного товариства «Українське Дунайське пароплавство» при експлуатації та моніторингу паливовикористання та екологічних показників роботи судна як в умовах експлуатації з базовою комплектацією системи подання палива, так зі встановленим фільтром-перетворювачем палива типу КТ-14 виробництва НВФ «Еко-Авто-Титан» (м.Бровари, Україна).

Практична значимість проведених дисертаційних досліджень зумовлюється запропонованою системою встановлення взаємозв'язку показників енергоефективності, моніторингу використання палива та режимів роботи енергетичної установки судна, що дозволяє оперативно оцінювати екологічні характеристики та виконувати їх нормативні обмеження. Відмінність запропонованої системи від існуючих полягає у можливості її використання без втручання до складу та конструкції елементів силового комплексу.

Старший механік
т/х «Механик Синилов»



В.А.Баратинський

Суперінтендант групи моніторингу
паливовикористання ПрАТ «УДП»



В.О.Кузьмук

ДОВІДКА

про достовірність даних та апробацію способу

Видана ТАРАСЕНКО Тетяні Владиславівні про те, що дані натурних спостережень на пасажирському круїзному теплоході m/v Lisabelle, надані капітаном судна ГОНЧАРОВИМ Сергієм Олександровичем для апробації розробленого здобувачем способу оцінки енергоефективності, а саме – витрата палива, оберти й навантаження головних двигунів, швидкість руху та гідрологічні умови у восьми експлуатаційних сегментах рейсів за період 04.05–07.06.2026, – є достовірними й відповідають фактичним даним експлуатації судна.

Розроблений спосіб оцінки енергоефективності (у частині адаптації до пасажирських суден через показник питомої витрати палива на пасажиро-кілометр) апробовано на зазначених даних; отримані результати визнано коректними та такими, що адекватно відображають енергоефективність судна в реальних умовах експлуатації.

Заперечень щодо використання зазначених даних у дисертаційній роботі та наукових публікаціях здобувача немає.

Капітан m/v Lisabelle



Сергій ГОНЧАРОВ

LISABELLE A
NAVIBELLE CRUISES GMBH
Grundstrasse 10.
6343 Rotkreuz, Switzerland



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДУНАЙСЬКИЙ ІНСТИТУТ НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

68600, Одеська область, м. Ізмаїл, просп. Миру, 15, тел.: (+38 048) 771-61-01, тел.: (+38096) 722-05-30
e-mail: dinuoma@onma.edu.ua web site: www.dinuoma.com.ua

23.06.2026 № 332

На № _____



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

Дунайського інституту

Національного університету

«Одеська морська академія»

Валентин ЧИМШИР

«23» червня 2026 року

АКТ ВИКОРИСТАННЯ

результатів дисертаційного дослідження

ТАРАСЕНКО Тетяни Владиславівни в освітньому процесі

Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»

Комісія у складі:

Голова комісії:

заступник директора з НПР ДІНУОМА, доктор педагогічних наук, професор Смирнова

Ірина Михайлівна;

Члени комісії:

- заступник директора з НМР ДІНУОМА, кандидат педагогічних наук, доцент Гайдаржи

Анжела Ігорівна,

- доктор технічних наук, доцент кафедри інженерних дисциплін Залож Віталій Іванович

склала цей акт про те, що результати дисертаційного дослідження на тему: «Розробка способу оцінки енергоефективності руху суден у внутрішньому судноплавстві» кандидата технічних наук, доцента кафедри інженерних дисциплін Тарасенко Тетяни Владиславівни, які представлені до захисту на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту, використовуються при реалізації освітнього компоненту «Устрій судна та морехідні якості» для здобувачів освіти освітньо-професійної програми Управління судновими технічними системами і комплексами, спеціальності J5 (271) Морський та внутрішній водний транспорт спеціалізації J5.02 (271.02) Управління судновими технічними системами і комплексами; освітнього компоненту «Морехідні якості судна» освітньо-професійної програми Навігація і управління морськими суднами, спеціальності J5 (271) Морський та внутрішній водний транспорт J5.01 (271.01) Навігація і управління морськими суднами.

В освітній процес ДІНУОМА впроваджено результати, що полягають у розробленні способу та його програмній реалізації доведення до рівня інструмента, придатного для безпосереднього використання в експлуатаційній і управлінській практиці підприємств внутрішнього водного транспорту. Зокрема, одержані результати дають змогу:

- здійснювати оперативну оцінку та порівняльний аналіз енергоефективності рейсів самохідних суден з караванами барж за змінного складу каравану й змінних гідрологічних умов, виявляти резерви зниження витрати палива (до 14,5–16,3 % на проаналізованому масиві рейсів) та обґрунтовувати експлуатаційні рішення щодо швидкісного режиму й конфігурації каравану на основі чотирьох класів типових рішень із кількісними критеріями активації, причому оцінка виконується за штатними експлуатаційними даними, без втручання в конструкцію енергетичної установки судна;

- використовувати результати оцінки як основу для техніко-економічного обґрунтування й визначення пріоритетності проектів модернізації енергетичних установок та переведення суден на альтернативні види палива, зокрема для раціонального розподілу обмежених капітальних ресурсів між класами флоту;

- застосовувати спосіб для кількісної оцінки кліматичного ефекту модального зсуву вантажопотоків на внутрішній водний транспорт та для аргументації відповідних рішень у зіставленні з міжнародними показниками;

- використовувати показники й алгоритм агрегування як підґрунтя для формування корпоративних стандартів енергоефективності та участі підприємств у системах нормування, моніторингу й звітності щодо вуглецевої інтенсивності флоту відповідно до регуляторного контексту ЄС.

Використання вищезазначених результатів в освітній процес ДІНУОМА забезпечує формування у здобувачів освіти практичних навичок оперативної оцінки та моніторингу енергоефективності за експлуатаційними показниками, що значно підвищує якість підготовки майбутніх судових механіків, судноводіїв, фахівців морської галузі, формує компетентності з взаємодії елементів пропульсивного комплексу судна, взаємозв'язків опору руху, форми корпусу судна, режимів роботи та технічного стану двигунів та забезпечує глибоке розуміння практичних аспектів експлуатації судових енергетичних установок, включаючи методи зниження витрати палива, моніторингу параметрів робочого процесу та збільшення міжремонтного періоду.

Голова комісії:

заступник директора з НІПР
д.пед.н., професор



Ірина СМІРНОВА

Члени комісії:

заступник директора з НІМР
к.пед.н., доцент



Анжела ГАЙДАРЖИ

доцент кафедри
інженерних дисциплін
д.т.н., доцент

Віталій ЗАЛОЖ

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. 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, Issue 3. P. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0037>. (*Scopus Q2*).
2. Tarasenko T., Zalozh V., Varbanets R., Minchev D. Considerations regarding reducing Danube navigation emissions. *Scientific Bulletin of Naval Academy*. 2021. Vol. XXIV. P. 174–183. DOI: <https://doi.org/10.21279/1454-864X-21-I1-021>. (*Scopus Q4*).
3. **Tarasenko T.**, Zalozh V. and Maksymov S. The Ways to Improve Energy Efficiency and Eco-friendliness of the Specific Danube Inland Vessels. First Stage. *JPCS*. 2019. Vol. 1297, conference 1. P. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1297/1/012019> (*Scopus Q4*).
4. Bezlutska, O., Leshchenko, A., Zahorodnia, Y., **Tarasenko, T.**, Sherman, M., & Smyrnova, I. (2021). Management qualities of the marine cadets. *Journal of Management Information and Decision Sciences*, 24(1), 1-12. <https://www.abacademies.org/articles/Management-qualities-of-the-marine-cadets-1532-5806-24-1-235.pdf> (*Scopus Q4*).
5. Tarasenko Tetyana, Zalozh Vitalii. Comparative analysis of energy transition scenarios in maritime shipping. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, Vol. XXVIII 2025, pg. 78-86. doi: <https://doi.org/10.21279/1454-864X-25-I1-008>.
6. **Tarasenko T.**, Zalozh V., Maksymov S. Approach of using a system of evaluation indicators in determining the efficiency of ships in the Danube shipping. *Scientific Bulletin of Naval Academy*. 2022. Vol. XXV. P. 66–74. DOI: <https://doi.org/10.21279/1454-864X-22-I1-008>.
7. Zalozh V., **Tarasenko T.**, Varbanets R. Efficiency Control Improvement of Diesel Engines Conditions by Using the Method of Analytical Synchronization of

Monitored Data. *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*. 2020. Vol. 2, no. 7. P. 151–159. DOI: <https://doi.org/10.47577/technium.v2i7.1829>.

8. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту. Колективна монографія /за редакцією В. Чимшир/. – Ізмаїл : ДІ НУ «ОМА» 2020 – Київ: Міленіум, 2020. 472 с. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2021/04/monografia2020.pdf>.

9. Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології : монографія / Букарос А. Ю., Онищенко О. А., **Тарасенко Т. В.** та ін.; за наук. ред. В. А. Голікова та О. А. Онищенка. – Миколаїв : Іліон, 2022. – 408 с. ISBN 978-617-534-687-7. DOI: 10.6084/m9.figshare.20279652.

10. **Т. В. Тарасенко**, П. С. Суворов. Сценарний підхід до прогнозування переходу до еконавігації. *Автоматизація судових технічних засобів*: науково-технічний збірник. 2026. Вип. 31. Одеса: НУОМА. DOI: <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2026-1-31-153-166> (автором сформульовано ідея дослідження, виконано розрахункову частину, візуалізацію, підготовлено первинний текст рукопису, взято участь у редагуванні та узгоджені висновків).

11. **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Оцінювання енергоефективності суден внутрішнього плавання за експлуатаційними параметрами судових двигунів. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії* № 32 (2026). С. 20–32. DOI: <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2026.1.32.020-032> (автору належить концепція застосування методу для окремих типів суден, взято участь в первинному формуванні та остаточному редагуванні тексту).

12. Тарасенко Т. В. Аналіз моделей витрати палива, викидів та показників енергоефективності для штовхачів з караванами барж у дунайському судноплавстві. *Наука і техніка сьогодні*, 2026, Випуск 2(56). С. 2281-2293. doi: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2026-2\(56\)-2281-2293](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2026-2(56)-2281-2293).

13. **Тарасенко Т. В.**, Мазур Т. М. Основні методи моніторингу для управління енергоефективністю на судні згідно додатку VI МК МАРПОЛ 73/78.

Водний транспорт, 2025, Випуск 2(43). С. 117-122. doi: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.10>.

14. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Аналіз трансформації оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу у внутрішньому водному транспорті. *Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. 2023. Вип. 1(37). С. 161–170. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.18>.

15. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Деякі питання оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу у внутрішньому судноплавстві. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2023. Вип. 2(2023). С. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2023.2.05>.

16. Варбанець Р. А., Залож В. І., **Тарасенко Т. В.**, Кирнац В. І., Клименко В. Г., Александровська Н. І. Деякі аспекти застосування системи DERAS D4.0H для підвищення енергоефективності суден внутрішнього плавання. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2021. Вип. 2(2021). С. 60–67. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2021.2.08>.

17. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Обмежувальні фактори в оцінці енергоефективності суден-штовхачів великовантажних составів у внутрішньому плаванні. *Автоматизація судових технічних засобів*. 2020. № 26. С. 94–109. DOI: <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2020-1-26-94-109>.

18. Варбанець Р. А., Залож В. І., **Тарасенко Т. В.**, Кучеренко Ю. М., Клименко В. Г. Особливості аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2020. Вип. 1(2020). С. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2020.1.02>.

19. Варбанець Р. А., Залож В. І., **Тарасенко Т. В.**, Белоусова Т. П., Єриганов О. В. Метод аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в експлуатації. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2020. Вип. 7. С. 118–128. DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2020.7.17>.

20. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Оцінка енергоефективності для умов навігаційних невизначеностей у внутрішньому судноплаванні. *Автоматизація судових технічних засобів*. 2019. № 25. С. 90–100. URL: <http://ast.onma.edu.ua/wp-content/uploads/2019/12/astf-2019-1-25-90-100.pdf>.

21. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І., Максимов С. Б. Про співвідношення показників енергоефективності та екологічності для суден внутрішнього плавання. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2019. № 3 (251). С. 168–175. URL: [http://sazt-snu.in.ua/uploads/BA_3_\(251\).pdf](http://sazt-snu.in.ua/uploads/BA_3_(251).pdf).

22. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Принципи визначення індикаторів енергоефективності для суден внутрішнього плавання. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2018. № 2 (243). С. 203–207. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VSUNU_2018_2_38, [http://sazt-snu.in.ua/uploads/14_05_BA_2_\(243\).pdf](http://sazt-snu.in.ua/uploads/14_05_BA_2_(243).pdf).

23. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Оцінка факторів, що визначають енергоефективність суден внутрішнього плавання. *Автоматизація судових технічних засобів*. 2018. Вип. 24. С. 94–102. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/asts_2018_24_12 (автором сформульовано наукову проблему, мету й завдання дослідження, систематизація первинних даних, виконано первинний текст, формулювання висновків).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

24. **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Параметричне діагностування судових дизелів у задачах оцінювання енергоефективності суден. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2026)*. Збірник матеріалів XVIII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Одеса, 26–28 травня 2026 року). Одеса: Херсонська державна морська академія, 2026. С. 412–415. URL: https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2026/05/MINTT_2026.pdf.

25. **Тарасенко Т. В.** Моніторинг робочого процесу головних двигунів як джерело уточнених даних про ефективну потужність дунайських штовхачів. *Сучасні проблеми двигунобудування, енергетики та інтелектуальної механіки* –

2026. Відкрита науково-практична студентська конференція факультету авіаційних двигунів (ФАД) Національного аерокосмічного університету "ХАІ" (20-21 травня 2026 р. DOI: <https://doi.org/10.32620/FAE.26>).

26. **Tarasenko Tetyana**, Zalozh Vitalii. Comparative analysis of parametric diagnostics-based energy efficiency assessment methods for inland vessels. *The 12th International Scientific Conference SEA-CONF 2026 May 14-16, 2026 – Constantza, Romania*. URL: <https://www.anmb.ro/ro/conferinte/sea-conf2026/brosura20sea20conf202026.pdf>.

27. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.** Енергоефективність дунайських штовхачів з караванами барж у науці й освіті. *Інноваційні підходи до розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення: матеріали X Міжн.наук.-практ. конф. Ізмаїл, 24-25 квітня 2026 р. - Запоріжжя: АА Тандем, 2026. С. 91-94.* URL: <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2020/02/B7-2026-D180.pdf>.

28. Tarasenko T. V. Analysis of the results of the assessment of energy efficiency indicators for inland navigation vessels by labeling levels. *The 5th International Maritime Scientific Conference "Maritime Research and Education in Global Context"* (BSMA, 11-12.12.2025, Batumi, Georgia) URL: <https://drive.google.com/file/d/17dbokNTcG61MiOozv1Q0OknoPAYisGVM/view>.

29. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.** Аналіз актуальної проблематики нормування енергоефективності та переходу до еконавігації у внутрішньому судноплавстві Європи. *ДНІПРОВСЬКІ ЧИТАННЯ-2025: Матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції*. м. Київ, 11 грудня 2025 р. – Київ: вид-во Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій. – С. 97-102. URL: <https://drive.google.com/drive/folders/1usp=sharing>.

30. **Тарасенко Т. В.** Оцінка енергоефективності у внутрішньому судноплавстві та окремі питання її нормування. *Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: матеріали XVI*

Міжн.наук.-практ.конф. (м. Ізмаїл, 5-6 грудня 2025 р.). Пленарна доповідь.
URL: <https://drive.google.com/file/d/1Mex/view>.

31. **Тарасенко Т. В.** Аналіз результатів оцінки індексів енергоефективності суден у внутрішньому судноплаванні. *Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: матеріали XVI Міжн.наук.-практ.конф.* (м. Ізмаїл, 5-6 грудня 2025 р.). Запоріжжя, 2025. с. 362-365. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17811741>.

32. **Тарасенко Т. В.** Деякі питання актуалізації освітньо-професійних програм для морських спеціальностей. *Інноваційні підходи до розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення: матеріали IX Міжн.наук.-практ. конф.* Ізмаїл, 25-26 квітня 2025 р. - Запоріжжя: АА ТанDEM, 2025. С. 74-78.

33. **Tarasenko Tetyana, Zalozh Vitalii.** Comparative analysis of energy transition scenarios in maritime shipping. *The 11th International Scientific Conference SEA-CONF 2025 May 15-17, 2025 – Constantza, Romania.* https://www.anmb.ro/ro/conferinte/sea-conf2025/Program_Sea-Conf_2025.pdf.

34. **T. V. Tarasenko, P. S. Suvorov.** Analytical Look at Possible Energy Transition and Econavigation Scenarios. *VI International Maritime Scientific Conference Marine Power Plants & Operation*, 4 березня 2025 р., м. Одеса, Одеський національний морський університет. <https://2025.depas.od.ua/en/main/>, https://drive.google.com/file/d/1_6FX2C0kytDKrPJ-epXaaCjfW2zjjmw_/view.

35. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.** Окремі питання забезпечення безпеки при використанні альтернативних палив на судах. *ДНІПРОВСЬКІ ЧИТАННЯ-2024: Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції* м. Київ, 5 грудня 2024 р. – Київ: вид-во КІВТ ДУІТ. – С. 104-108. URL: https://drive.google.com/drive/folders/1KE3SENA44TJ8UD0a7Y5c_gBq9HMCwb5I?usp=sharing.

36. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.** Деякі питання застосування альтернативних палив на судах внутрішнього плавання. *Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: матеріали XV*

Міжн.наук.-практ.конф. (м. Ізмаїл, 8-9 грудня 2024 р.). Запоріжжя, 2024. с. 319-322. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14560948>.

37. **Тарасенко Т. В.** Деякі особливості енергетичного переходу у дунайському судноплавстві. *Прикладні науково-технічні дослідження : матеріали VI міжнар. наук.-практ. конф.*, 14-16 трав. 2024 р. – Академія технічних наук України. – Івано-Франківськ : Видавець Кушнір Г. М. – 2024. – с. 213-216. <https://doi.org/10.63048/978-617-7926-61-9.0>.

38. **Тарасенко Т. В.** Аналіз проблематики впровадження питань еконавігації та енергетичного переходу до освітнього процесу. *Інноваційні підходи до розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення: матеріали VIII Міжн.наук.-практ. конф.* Ізмаїл, 19-20 квітня 2024 р. - Запоріжжя: АА Тандем, 2024. С. 71-73.

39. В. І. Залож, **Т. В. Тарасенко**, Р. А. Варбанець. Огляд сучасних тенденцій розвитку систем моніторингу суднових дизельних двигунів. *V International Maritime Scientific Conference Marine Power Plants & Operation*, 5 березня 2024 р., м. Одеса, Одеський національний морський університет. https://drive.google.com/file/d/1tM51ZXS8PMIzhEbZL3_1YCQaKK5aVrPW/view.

40. Залож В. І., **Тарасенко Т. В.** Огляд існуючих систем моніторингу суднових дизельних двигунів. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування CEUTTOO-2024* : матеріали 15-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 13-15 березня 2024 р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2024. С. 60-62. <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2024/03/E-2024.pdf>.

41. **Тарасенко Т. В.** Окремі питання енергоефективності роботи суден-штовхачів з караванами на Дунаї. *Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: матеріали XIV Міжн.наук.-практ.конф.* (м. Ізмаїл, 8-9 грудня 2023 р.). Запоріжжя, 2023. с. 170-175. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33864.49928>.

42. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.** Оцінка основних критеріїв вибору альтернативного пального для суден внутрішнього плавання в експлуатації.

ДНІПРОВСЬКІ ЧИТАННЯ-2023: Матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції м. Київ, 7 грудня 2023 р. – Київ: вид-во Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій. – С. 95-99.

43. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Особливості оцінки енергоефективності суден у внутрішньому судноплавстві. *XXVIII - міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей.* – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2023. С. 43-44.
http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/19154/1/2_5204362209303475801.pdf.

44. **Тарасенко Т. В.** Актуальні питання оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу на внутрішньому водному транспорті. *Інноваційні підходи до розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення: матеріали VII Міжн.наук.-практ. конф. Ізмаїл, 21-22 квітня 2023 р. - Запоріжжя: АА Тандем, 2023. С. 83-88.*
<https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2023/05/zbyrnyk210423.pdf>.

45. Варбанець Р. А., Мінчев Д. С., Залож В. І., **Тарасенко Т. В.**, Абросімов В. Г. Підхід до неруйнівної діагностики системи впорскування палива суднового двигуна з використанням вібродатчиків. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2023* : матеріали 14-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 16-18 березня 2023 р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2023. С. 109-113. <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2023/05/E-2023.pdf>.

46. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.** Деякі аспекти сценаріїв модернізації флоту в умовах енергетичного переходу у внутрішньому водному транспорті. *ДНІПРОВСЬКІ ЧИТАННЯ-2022: Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції* м. Київ, 8 грудня 2022 р. – Київ: вид-во Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій. – С. 124-129.

<https://files.duit.edu.ua/uploads/90/conferences/international-scientific-and-practical-conferences/third-dnipro-reading-materials.pdf>.

47. Суворов П. С., **Тарасенко Т. В.** Енергоефективність суден внутрішнього плавання та Концепція енергетичного переходу *EUROPEAN GREEN DEAL*. Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування *CEUTTOO-2022: матеріали 13-ї Міжнародної науково-практичної конференції*, 07-09 вересня 2022 р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2022. С. 120-122. <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2023/06/E-2022.pdf>.

48. **Tarasenko T.**, Zalozh V., Maksymov S. Approach of using a system of evaluation indicators in determining the efficiency of ships in the Danube shipping. *The 8th International Scientific Conference SEA-CONF 2022, May 19-20, 2022. Constantza, Romania, 2022. P. 19-20.*

49. **Тарасенко Т. В.** Оцінка потенціалу зменшення шкідливих викидів у дунайському судноплавстві. *Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: матеріали XIII Міжн.наук.-практ.конф.* (м. Ізмаїл, 8-9 грудня 2022 р.). Запоріжжя, 2022. с. 166-168. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16687.41120>.

50. Варбанець Р. А., Залож В. І., **Тарасенко Т. В.**, Россомаха О. А. Аналітичні способи визначення положення верхньої мертвої точки поршня. *MPP&O-2022 (Marine Power Plants and Operation): матеріали IV Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету, 18-21 квітня 2022. – Х.: Видавництво Іванченка І. С., 2021. – с. 57-67.*

51. Варбанець Р. А., Залож В. І., **Тарасенко Т. В.** Застосування результатів діагностування головних дизелів для обґрунтування оптимальних режимів експлуатації. *Суднова енергетика: стан та проблеми. Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції, 4–5 листопада 2021 року* Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, 2021. С. 103-107.

52. **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Деякі тенденції розгляду перспектив розвитку внутрішнього водного транспорту у контексті його енергоефективності. *Прогресивні технології засобів транспорту*. Матеріали першої міжнародної науково-технічної конференції, 23-24 вересня 2021 р. Харків-Миргород: УкрДУЗТ, 2021. С. 166 – 167.

53. Варбанець Р. А., Залож В. І., **Тарасенко Т. В.** Підвищення енергоефективності суден внутрішнього плавання із застосуванням системи DERAS D4.0H. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування SEUTTOO-2021*: матеріали 12-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 06-08 вересня 2021 р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2021. С. 33-37.

54. **Тарасенко Т. В.** Навігаційні умови у внутрішньому судноплаванні та енергоефективність. *Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: матеріали XII Міжн.наук.-практ.конф.* (м.Ізмаїл, 9-10 грудня 2021 р.). Запоріжжя, 2021. с. 207-210. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14310.55368>.

55. Р. А. Варбанець, В. І. Залож, **Т. В. Тарасенко**, В. І. Кирнац, В. Г. Клименко, Н. І. Александровська. Застосування системи DERAS D4.0H для підвищення енергоефективності суден. *XXVI - міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей.* – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2021. С. 40-41.

56. **Tarasenko T.**, Zalozh V., Varbanets R., Minchev D. The considerations regarding reducing Danube navigation emissions. *7th International Scientific Conference SEA-CONF 2021, May 21-22, 2021*. Constantza, Romania, 2021. P. 7–8.

57. **Тарасенко Т. В.** Деякі аспекти покращення екологічності та підвищення енергоефективності у дунайському судноплаванні. *Матеріали III Міжнародної науково-практичної морської конференції СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету, квітень 2021.* – Х.: Видавництво Іванченка І.С., 2021. – с.452-455.

58. **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Енергоефективність у дунайському судноплавстві: основні аспекти та проблематика. *Інноваційні підходи розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення: матеріали V Міжн.наук.-практ.конф.* (м.Ізмаїл, 28 червня 2021 р.). Запоріжжя, 2021. с. 234-236.

59. **Тарасенко Т. В.** Управління енергоефективністю та енергоефективний менеджмент у внутрішньому судноплавстві. *Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: матеріали XI Міжн.наук.-практ.конф.* (м.Ізмаїл, 3-4 грудня 2020 р.). Запоріжжя, 2020. С. 234-236. Режим доступу: <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2020/12/tezy041220.pdf>.

60. **Тарасенко Т. В.** Загальні тенденції у сучасній світовій вантажній базі та у світовому міжнародному судноплавстві. *Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: матеріали XI Міжн.наук.-практ.конф.* (м.Ізмаїл, 3-4 грудня 2020 р.). Запоріжжя, 2020. С. 150-155.

61. Zalozh, V., **Tarasenko, T.**, Varbanets, R. Efficiency control improvement of diesel engines conditions by using the method of analytical synchronization of monitored data. *Proceedings of the 7th Technium Conference 2020*, 12 October 2020, Constanta, Romania. Vol. 2 No. 7, 2020. P. 151-159. URL: <https://techniumscience.com/index.php/conference/article/view/1828/689>.

62. **Тарасенко Т. В.** Некоторые аспекты определения транспортной работы большегрузных составов во внутреннем судоходстве. *Сучасні виклики і актуальні проблеми науки, освіти та виробництва: міжгалузеві диспути* [зб. наук. пр.]: матеріали VII міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Київ, 21 серпня 2020 р.). Київ, 2020. 169 с. с. 131-138. <https://openscilab.org/?p=1183>.

63. Варбанець Р. А., Залож В. І., **Тарасенко Т. В.**, Абросімов В. Г., Клименко В. Г., Ваганов О. І. Аналітична синхронізація даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації. *Сучасні*

енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. Матеріали 11-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 08-10 вересня 2020 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія. С. 39-41. https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2021/02/seutto__2020.pdf.

64. **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І. Деякі аспекти оцінки енергоефективності суден-штовхачів великовантажних складів у внутрішньому плаванні. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування*. Матеріали 11-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 08-10 вересня 2020 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія. С. 28-32. https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2021/02/seutto__2020.pdf.

65. Варбанец Р. А., Залож В. І., **Тарасенко Т. В.**, Белоусова Т. П., Єриганов О. В., Клименко В. Г. Метод аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в експлуатації. *XXV - міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей*. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2020. С. 40-41.

66. Варбанець Р. А., Залож В. І., **Тарасенко Т. В.**, Абросимов В. Г., Клименко В. Г. Рішення задачі аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації. *XXV - міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей*. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2020. С. 38-40.

67. **Тарасенко Т. В.**, Залож В. І., Максимов С. Б. Оцінка енергоефективності в умовах невизначеностей обмежувальних факторів у внутрішньому судноплаванні. *Інноваційні підходи розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення*. Матеріали IV Міжн. наук. - практ. конф., 24 квітня 2020 р.- 42-45 с. Режим доступу: <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2020/05/B4.pdf>.

68. Дімоглова О. В., **Тарасенко Т. В.** Сучасний стан професійної підготовки та основні вимоги до майбутніх судових механіків. *Стратегічний потенціал державного та територіального розвитку*: Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (м. Маріуполь, 9-10 жовтня

2019 р.).– Маріуполь; Кривий Ріг: Вид. Р. А. Козлов, 2019. – 371-374 с. Режим доступу: <https://dsum.edu.ua/storage/documents/konf/Konferentsiya-2019-1.pdf>.

69. **Тарасенко Т. В.**, Дімоглова О. В. Система професійної підготовки майбутніх суднових механіків в Україні / Т. В. Тарасенко, О. В. Дімоглова // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. 10-та Міжнародна науково-практична конференція, 12-13 вересня 2019 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія. – 311-314 С. Режим доступу: https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2021/02/seutto_2019_.pdf.

70. Varbanets R., Zalozh V., **Tarasenko T.** The Working Process Monitoring In Transport Diesel Engines Operating. *Achievements of modern society: abstracts of the 4th International scientific and practical conference*, 4-6 December 2019. Cognum Publishing House. Liverpool, United Kingdom. 2019. P.36-41. Режим доступу: https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2019/12/scientific-achievements-of-modern-society_4-6.12.19.pdf.

71. **Tarasenko T.**, Zalozh V. and Maksymov S. The Ways to Improve Energy Efficiency and Eco-friendliness of the Specific Danube Inland Vessels. First Stage. *5th International Scientific Conference SEA-CONF 2019, May 17-8, 2019*. Constantza, Romania, 2019. P. 7–8. https://www.anmb.ro/ro/conferinte/sea-conf/arhiva/program_sea-conf_2019.pdf.

ДОДАТОК В

ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИПОВИХ ШТОВХАЧІВ І БАРЖ ДУНАЙСЬКОГО ФЛОТУ, А ТАКОЖ СХЕМИ ДОПУСТИМИХ ФОРМ КАРАВАНІВ

Таблиця В.1 – Технічні характеристики існуючих типових штовхачів і барж дунайського флоту [7; 12; 22; 40; 44; 50; 102]

Клас суден	Тип / проєкт	Судно-власник або оператор	Потужність ГЕУ, кВт	Робота в караванах	Орієнтовний загальний дедвейт каравану, т	Середній вік, років
Самохідні суховантажні судна	«Капитан Антипов» (M044C/ M044D)	ПрАТ «УДП»	1545 (2 головні двигуни)	5 барж	9000	41
Штовхачі	«Рига/Іваново» (4151/ 4152)	ПрАТ «УДП»	1470 (2 головні двигуни)	6 барж	9000	57
Штовхачі	«Запоріжжя» (H3170)	ПрАТ «УДП»	1800 (2 головні двигуни)	до 6–8 барж	від 9000 до 12000	43
Штовхачі	«Сергій Авдєєнков» (149)	ПрАТ «УДП»	2400 (3 головні двигуни)	до 9 барж	13500	48
Штовхачі	«Ленинград» (190)	ПрАТ «УДП»	1900 (2 головні двигуни)	до 6–8 барж	від 9000 до 12000	37
Баржі, тип «Європа-ІІб»	190, 1792, 20691, 1635, ТП631, Ф099, Р85, К671, К622А	ПрАТ «УДП»	—	Приводяться до руху штовхачем або самохідним судном	від 1300 до 1600	33 (діапазон 2...57)
Штовхачі	Надпотужні, працюють на Східній лінії	DDSG MAHART	від 1985 до 3750	8–12 барж	20500 т проти течії; 11000 т за течією	—
Штовхачі	Верхній Дунай	DDSG MAHART	1150	1–2 баржі	3500 т проти течії	—

Штовхачі	Середній та Нижній Дунай	DDSG MAHART	1545	до 8 барж	11000 т проти течії; 6000 т за течією	—
Буксири-штовхачі	Спеціальні буксири-штовхачі для рятувальних операцій та допомоги в навігації на мілководді	DDSG MAHART	від 1150 до 1470	Є буксирувальний пристрій		—
Самохідні вантажні судна	Робота між портами Середнього Дунаю та портами західної Європи	DDSG MAHART	від 990 до 1500	до 2 барж	3300	—
Баржі, тип «Європа-ІІб»	Різні проекти	DDSG MAHART	—	Приводяться до руху штовхачем або самохідним судном	Вантажо-підйомність від 1210 т до 2400 т кожна	—
Спеціалізовані самохідні судна	Для перевезень виликотоннажних, габаритних вантажів та контейнерів	DDSG MAHART	1250	—	1900	—
Спеціалізовані баржі	Для перевезень виликотоннажних, габаритних вантажів та контейнерів	DDSG MAHART	—	Приводяться до руху штовхачем або самохідним судном	2280	—
Самохідне вантажне судно	«Gustav Koenigs»	Приватні оператори	450	1 баржа	2000	—
Самохідне вантажне судно	«Europasc hiff»	Приватні оператори	750	1 баржа	2000	—
Самохідне вантажне судно	«Large motor vessel»	Приватні оператори	1550	—	3000	—

Баржі наливні	SA-1; UT-1; UT-2; UT-3; UT-4;	Danube Star Shipping	—	Приводяться до руху штовхачем або самохідним судном	1350	—
Баржі сухованта жні	SA-11–17	Danube Star Shipping	—	Приводяться до руху штовхачем або самохідним судном	1700	38
Самохідне сухованта жне судно	«Revel»	Danube Star Shipping	1000	1 баржа	2000	61 (реновація у 2015 р.)
Штовхачі	HRON	Danube Star Shipping	1000	1 баржа	2000	—
Штовхачі	«Rhenus Beograd»	Rhenus PartnerShip Serbia	1900	до 6–8 барж	10000	33
Самохідне сухованта жне судно	«Rhenus Regensburg»	Rhenus PartnerShip Serbia	1300	2 баржі	4700	69
Штовхачі	TR–17	Rhenus PartnerShip Serbia	750	2 баржі	5100	40
Баржі	RSP; Antverpia	Rhenus PartnerShip Serbia	—	Приводяться до руху штовхачем або самохідним судном	від 1300 до 1600	—
Штовхачі (лінійні, Нижній і Середній Дунай)	«Mercur» серія (301–309)	C.N.F.R. NAVROM S.A., Галац	1765–2648 (2×CAT 3512 / KTA 50)	6–9 барж	6000–14000	—
Штовхачі (малої потужності, маневрові)	«Mercur» серія 200	C.N.F.R. NAVROM S.A., Галац	589–662 (2×CAT 3512B)	2–4 баржі	2000–4000	—
Баржі сухованта жні (з	різні проекти	C.N.F.R. NAVROM S.A., Галац	—	Приводяться до руху штовхачем	1000–3000	—

кришками та без)				або самохідним судном		
Баржі-танки наливні	—	C.N.F.R. NAVROM S.A., Галац	—		1300	—
Штовхачі	6 од. для роботи на Верхньому Дунаї	Bulgarian River Shipping J.S.Co., Русе	Модернізовані (двигуни CAT)	—	—	—
Баржі	відкриті, криті, нафтові танки, ро-ро	Bulgarian River Shipping J.S.Co., Русе	—	Приводяться до руху штовхачем або самохідним судном	—	—

Таблиця В.2 – Типові схеми допустимих форм караванів [94]

Клас водного шляху	Штовхані каравани: загальні характеристики				
	Типова схема каравану	Максимальна довжина L , м	Максимальна ширина B , м	Робоча осадка з вантажем d , м	Дедвейт, т
IV		85	9,5	від 2,50 до 2,80	від 1250 до 1450
Va		від 95 до 110	11,4	від 2,50 до 4,50	від 1600 до 3000
Vb		від 172 до 185	11,4	від 2,50 до 4,50	від 3200 до 6000
VIa		від 95 до 110	22,8	від 2,50 до 4,50	від 3200 до 6000
VIb		від 185 до 195	22,8	від 2,50 до 4,50	від 6400 до 12000
VIc		від 270 до 280	22,8	від 2,50 до 4,50	від 9600 до 18000
		від 195 до 200	від 33,0 до 34,2	від 2,50 до 4,50	від 9600 до 18000
VII		від 275 до 285	від 33,0 до 34,2	від 2,50 до 4,50	від 14500 до 27000

Таблиця В.3 – Прогноз кількісного складу типів суден до 2050 р. для ВВШ Європи [40]

Типи суден	Очікувана кількість у 2035 у Європі	Очікувана кількість у 2050 у Європі	Очікувана кількість у 2035 на Рейні та ін. ВВШ	Очікувана кількість у 2050 на Рейні та ін. ВВШ
Штовхачі	690	540	619	484

< 500 кВт				
Штовхачі від 500 кВт до 2000 кВт	540	555	345	354
Штовхачі ≥ 2000 кВт	36	36	25	25
Самохідні суховантажні судна ≥ 110 м	690	750	656	713
Самохідні наливні судна ≥ 110 м	597	627	594	624
Самохідні суховантажні судна від 80 м до 109 м	1762	1732	1675	1646
Самохідні наливні судна від 80 м до 109 м	637	652	621	636
Самохідні судна < 80 м	2813	1688	2701	1621
Каравани	160	175	160	175

ДОДАТОК Г

УЗАГАЛЬНЕНІ ГІДРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУНАЮ

Таблиця Г.1 – Встановлені значення НСРР, ВСР та відповідних витрат $Q_{НСРР}$, $Q_{ВСР}$ для деяких водомірних постів судноплавного Дунаю [15; 17]

Водомірний пост	р. км	Ділянка	НСРР, см	$Q_{НСРР}$, м ³ /с	ВСР, см	$Q_{ВСР}$, м ³ /с	Період
Пассау	2227	Верхній Дунай	415	—	—	—	1971–2020
Ахлейтен	2223	Верхній Дунай	258	750	510	3500	1981–2010
			258	750	485	3420	1991–2020
Лінц	2135	Верхній Дунай	308	765	501	3670	1981–2010
			308	765	486	3490	1991–2020
Грейн	2079	Верхній Дунай	668	910	860	4443	1991–2020
Іббс	2059	Верхній Дунай	179	916	493	4455	1991–2020
Киншток	2015	Верхній Дунай	161	940	601	4770	1991–2020
Відень (Корнойбург)	1941	Верхній Дунай	196	976	537	4707	1971–2000
			191	970	549	5010	1981–2010
			196	970	545	4945	1991–2020
Вільдунгсмауер	1895	Середній Дунай	155	990	605	5000	1991–2020
Девін	1880	Середній Дунай	133	1049	609	5430	1981–2010
			144	1040	630	5220	1991–2020
Тебнештрасль	1879	Середній Дунай	141	1040	633	5220	1991–2020
Сап	1810	Середній Дунай	115	1025	617	4778	1971–2000
			63	1000	634	5000	1991–2020
Медведьов	1806	Середній Дунай	136	1025	635	4778	1971–2000
			116	1010	644	5040	1981–2010

Водомірний пост	р. км	Ділянка	НСРР, см	$Q_{НСРР}$, м³/с	ВСР, см	$Q_{ВСР}$, м³/с	Період
			103	1000	649	5000	1991–2020
Вамошсабаді	1806	Середній Дунай	-5	1000	537	5000	1991–2020
Надьбайч	1801	Середній Дунай	46	1000	557	5000	1991–2020
Кліжська Нема	1792	Середній Дунай	168	1025	639	4778	1971–2000
			167	1075	684	5055	1991–2020
Гьонью	1791	Середній Дунай	5	1075	530	5055	1991–2020
Комарно	1768	Середній Дунай	131	1095	566	4695	1971–2000
			136	1060	588	5052	1981–2010
			129	1075	605	5000	1991–2020
Комаром	1768	Середній Дунай	83	1060	536	5052	1981–2010
			83	1075	538	5055	1991–2020
Іжа	1764	Середній Дунай	83	1170	512	5019	1971–2000
			83	1167	531	5383	1981–2010
			97	1200	543	5265	1991–2020
Естергом	1719	Середній Дунай	60	1170	507	5213	1971–2000
			48	1200	499	5320	1991–2020
Будапешт (Вігадо)	1647	Середній Дунай	-46	1168	533	5052	1981–2010
Мохач	1447	Середній Дунай	144	–	774	–	1981–2010
Бездан	1426	Середній Дунай	-10	1180	602	5280	1981–2010
Ново Село	834	Нижній Дунай	95	2728	787	11988	1981–2010
			77	2740	764	11800	1991–2020
Калафат	795	Нижній Дунай	27	2731	686	12301	1981–2010
			-5	2581	657	11720	1991–2020

Водомірний пост	р. км	Ділянка	НСРР, см	$Q_{НСРР}$, м ³ /с	ВСР, см	$Q_{ВСР}$, м ³ /с	Період
Лом	743	Нижній Дунай	142	2707	853	11894	1981–2010
			144	2830	804	11600	1991–2020
Оряхово	678	Нижній Дунай	52	2768	734	11900	1981–2010
			39	2910	692	11600	1991–2020
Корабія	630	Нижній Дунай	44	2908	632	11839	1971–2000
			18	2731	640	12301	1981–2010
			-10	2640	612	12001	1991–2020
Свиштов	554	Нижній Дунай	68	2895	770	12277	1981–2010
			76	3000	720	12000	1991–2020
Русе	495	Нижній Дунай	52	2898	736	12523	1981–2010
			53	3050	719	12100	1991–2020
Джурджу	493	Нижній Дунай	6	3085	637	12015	1971–2000
			-17	2921	658	12700	1981–2010
			-25	2841	643	12560	1991–2020
Олтениця	430	Нижній Дунай	48	3104	631	12026	1971–2000
			28	2930	683	12891	1981–2010
			19	2881	667	12450	1991–2020
Сілістра	376	Нижній Дунай	86	3004	743	12704	1981–2010
			80	3130	753	12400	1991–2020
Чернавода	300	Нижній Дунай	-42	990	595	7822	1971–2000
			-65	740	622	7610	1981–2010
			-71	652	612	5270	1991–2020
Браїла	170	Нижній Дунай	101	3243	601	12213	1971–2000
			93	3080	623	13101	1981–2010

Водомірний пост	р. км	Ділянка	НСРР, см	$Q_{НСРР}$, м ³ /с	ВСР, см	$Q_{ВСР}$, м ³ /с	Період
			88	3060	627	13000	1991–2020
Галац	150	Нижній Дунай	98	3180	600	13600	1991–2020
Тульча	71	Нижній Дунай	64	1721	389	11248	1971–2000
			57	1590	398	10300	1981–2010
			59	1610	393	6441	1991–2020
Рені	127	Нижній Дунай	60	3170	482	13100	1971–2000
			68	3390	524	13100	1981–2010
			68	3410	524	13600	1991–2020
Ісакча	104	Нижній Дунай	73	3220	481	13801	1991–2020
Ізмаїл	94	Нижній Дунай	58	1990	317	7160	1971–2000
			64	1990	356	7420	1981–2010
			60	1750	350	7240	1991–2020
Вілкове	18	Нижній Дунай	65	1920	149	7360	1971–2000
			68	1850	152	7250	1981–2010
			64	1680	150	7100	1991–2020

Таблиця Г.2 – Оцінка тренду середньорічних рівнів води за критерієм Манна–Кендалла та нахилом Сена по водомірних постах Дунаю (2005–2020)

Водомірний пост	р.км	n, років	Нахил Сена, см/рік	Z	p	Значущий
Sulina	0	10	–0,76	–0,54	0,592	–
Vilkovo	18	14	–0,03	0,00	1,000	–
Tulcea	71	16	–4,66	–1,94	0,053	–
Isaccea	104	12	–6,92	–1,44	0,150	–
Reni	127	14	–2,37	–0,77	0,443	–
Silistra	376	16	–8,63	–1,67	0,096	–
Giurgiu	493	8	5,38	0,12	0,902	–
Zimnicea	554	12	–9,13	–1,58	0,115	–
Svistov	554	15	–5,01	–1,29	0,198	–

Turnu Magurele	597	12	−8,92	−1,44	0,150	—
Nikopol	598	8	−18,08	−2,10	0,035	ТАК
Corabia	630	9	−1,06	−0,10	0,917	—
Oriahovo	678	12	−3,29	−0,34	0,732	—
Bechet	679	12	−9,21	−1,30	0,193	—
Rast	738	7	−7,64	−0,60	0,548	—
Lom	743	16	−7,86	−1,67	0,096	—
Vidin	790	7	−20,30	−2,10	0,035	ТАК
Calafat	795	11	−3,61	−0,47	0,640	—
Cetate	811	10	−9,08	−1,61	0,107	—
Novo Selo	834	13	−3,38	−0,67	0,502	—
Prahovo	861	8	3,70	0,62	0,536	—
Drobeta	931	14	−0,55	−0,66	0,511	—
Drencova	1016	13	0,28	0,18	0,855	—
Veliko Gradiste	1060	15	−0,77	−2,08	0,038	ТАК
Smederevo	1116	15	−2,25	−1,58	0,113	—
Pancevo	1155	15	−2,22	−1,39	0,166	—
Zemun	1173	14	−5,75	−2,30	0,021	ТАК
Slankamen	1216	14	−1,94	−0,88	0,381	—
Novi Sad	1255	15	−2,77	−1,68	0,092	—
Backa Palanka	1299	13	−0,65	−0,31	0,760	—
Ilok	1299	7	6,54	0,60	0,548	—
Vukovar	1333	13	−0,77	−0,43	0,669	—
Bogojevo	1367	12	−1,60	−0,89	0,373	—
Apatin	1402	13	−3,05	−1,28	0,200	—
Bezdan	1426	12	−4,46	−1,17	0,244	—
Mohacs	1447	14	−3,72	−1,31	0,189	—
Baja	1479	14	−4,26	−1,53	0,125	—
Paks	1531	14	−1,47	−0,99	0,324	—
Budapest	1646	15	−3,35	−1,58	0,113	—
Nagymaros	1695	15	−1,92	−1,29	0,198	—
Esztergom	1719	14	−2,05	−1,20	0,228	—
Komarom	1768	14	−2,98	−1,20	0,228	—
Gr-Nyu	1791	13	−0,37	−0,18	0,855	—
Nagybaics	1801	14	−3,02	−1,53	0,125	—
Bratislava	1869	15	0,32	0,30	0,767	—
Wildungsmauer	1895	7	−0,24	0,00	1,000	—
Wien	1941	14	−1,08	−0,55	0,584	—
Kienstock	2015	15	−2,09	−1,29	0,198	—
Linz	2135	15	−0,63	−2,08	0,038	ТАК
Engelhartzell	2201	15	0,05	0,00	1,000	—
Passau Donau	2227	14	−0,87	−1,09	0,274	—
Vilshofen	2249	14	−1,04	−1,97	0,049	ТАК

Hofkirchen	2257	15	-2,01	-1,98	0,048	так
Deggendorf	2284	14	-2,95	-1,86	0,063	—
Pfelling	2306	16	-2,70	-2,12	0,034	так
Straubing	2321	14	-2,99	-2,08	0,037	так
Pfatter	2351	14	-1,16	-1,97	0,049	так
Regensburg	2376	16	-0,61	-2,12	0,034	так
Oberndorf	2397	14	-1,16	-1,97	0,049	так
Kelheim	2415	14	-1,10	-1,42	0,155	—

Примітка. Значущий ($p < 0,05$) низхідний тренд середньорічних рівнів виявлено на 12 із 60 водомірних постів із достатнім рядом спостережень; значущого зростання не виявлено на жодному пості; спадний напрямок тренду характерний для 90 % постів. Медіанний нахил Сена для постів зі значущим спадом становить $-1,59$ см/рік. Пости впорядковано за віддаленням від гирла (Суліна). Розрахунок виконано за середньодобовими рівнями (265 798 записів).

Наявність монотонного тренду середньорічних рівнів води перевірено непараметричним критерієм Манна–Кендалла, а величину тренду оцінено нахилом Сена [61]. Непараметричні методи обрано тому, що вони не вимагають нормальності розподілу й стійкі до викидів, характерних для гідрологічних рядів.

Якщо $x_1, x_2, \dots, x_n$ – ряд середньорічних рівнів поста за n років, то статистика Манна–Кендалла [61]:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \operatorname{sgn}(x_j - x_i)$$

Функція знаку:

$$\operatorname{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1, & \theta > 0 \\ 0, & \theta = 0 \\ -1, & \theta < 0 \end{cases}$$

Додатне S свідчить про висхідний тренд, від’ємне – про низхідний. Дисперсія статистики S з поправкою на однакові значення (зв’язки):

$$\operatorname{Var}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{k=1}^g t_k(t_k-1)(2t_k+5) \right]$$

де g – кількість груп однакових значень, t_k – кількість елементів у k -й групі. Стандартизована статистика (з поправкою на неперервність):

$$Z = \begin{cases} \frac{[S - 1]}{\sqrt{Var(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{[S + 1]}{\sqrt{Var(S)}}, & S < 0 \end{cases}$$

Тренд вважається статистично значущим на рівні $\alpha = 0,05$, якщо $|Z| > 1,96$ (двобічний критерій), що відповідає $p < 0,05$, де $p = 2[1 - \Phi(|Z|)]$, а Φ – функція розподілу стандартного нормального закону.

Величину (швидкість) тренду оцінено нахилом Сена – медіаною попарних нахилів:

$$\beta = med \left\{ \frac{x_j - x_i}{j - i} \right\}, \quad 1 \leq i < j \leq n.$$

Нахил β виражається у см/рік; від’ємне значення відповідає зниженню рівнів. На відміну від коефіцієнта лінійної регресії, медіанна оцінка стійка до викидів.

Розрахунок виконано для кожного водомірного поста окремо за середньорічними рівнями, отриманими усередненням середньодобових значень (усього 265 798 записів за 2005–2020 рр.). До аналізу включено пости з рядом не менше п’яти років; результати наведено в таблиці Г.2.

Пояснення позначень:

S – статистика Манна–Кендалла (сума знаків попарних різниць);

$Var(S)$ – дисперсія S з поправкою на зв’язки;

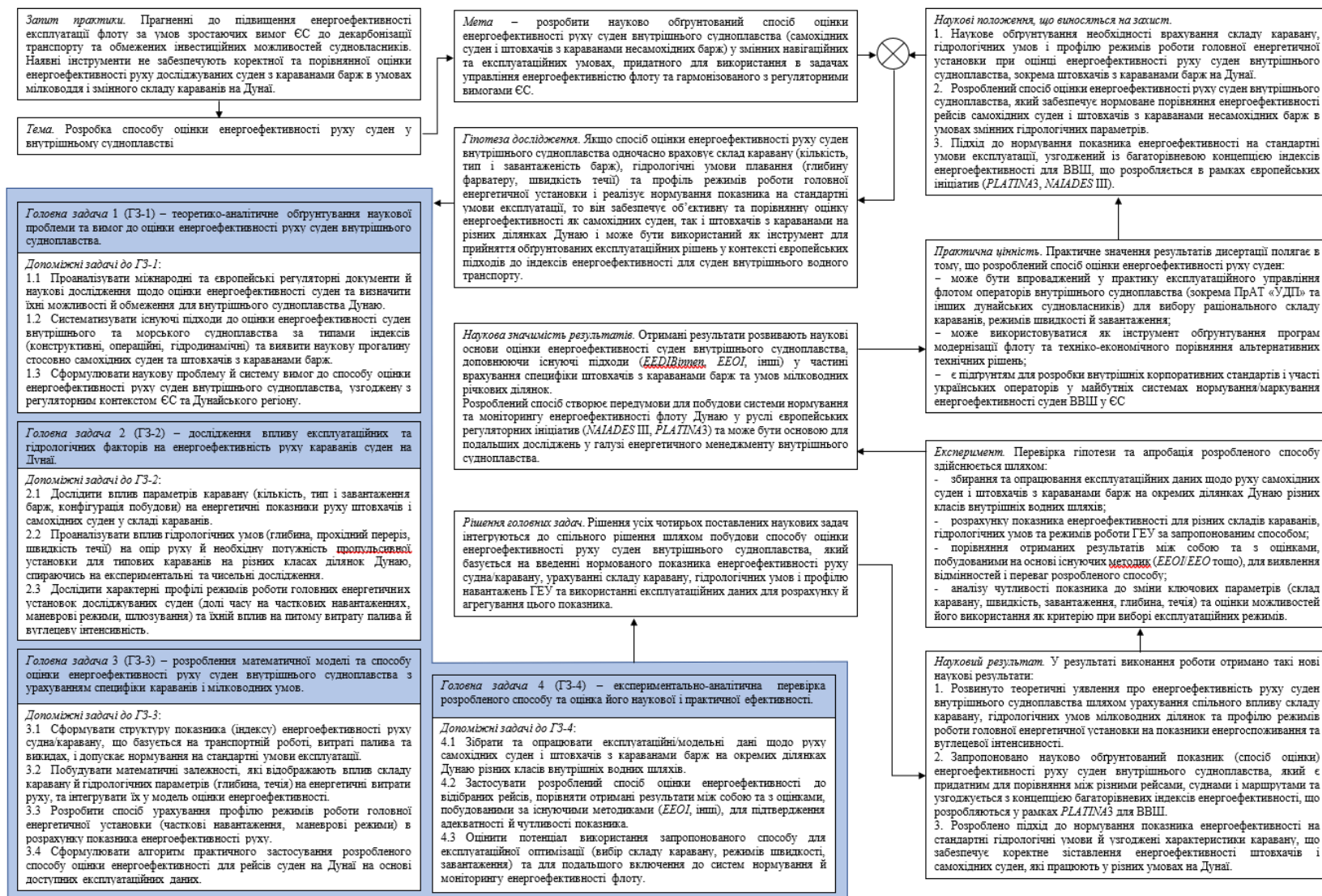
Z – стандартизована статистика; $|Z| > 1,96 \rightarrow$ значущість при $\alpha = 0,05$;

p – досягнутий рівень значущості (двобічний);

β – нахил Сена, см/рік (медіана попарних нахилів);

n – довжина ряду (років); t_k – розміри груп однакових значень.

ТЕХНОЛОГІЧНА КАРТА ДОСЛІДЖЕННЯ



ДОДАТОК Д

ТЕКСТ ПРОГРАМНОГО ПАРСЕРА PDF-ЩОРІЧНИКІВ ДУНАЙСЬКОЇ КОМІСІЇ

Нижче наведено повний текст програмного парсера на мові *Python*, розробленого для автоматизованої вибірці добових рівнів води з річних щорічників Дунайської Комісії за період 2005–2020 рр. Програма забезпечує розпізнавання трьох типів кодування первинних даних, екстракцію метаданих водомірних постів та формування реляційної бази даних обсягом 265 798 записів. Програмний код розроблено із залученням *AI*-асистента (*Claude, Anthropic*) під науковим керівництвом і верифікацією здобувача.

```
"""
Повноцінний парсер на 16 щорічників ДК (2005–2020).
Базується на parser_fast.py з усіма фіксами:
- декодування приватних шрифтів (для 2015 та подібних)
- розпізнавання двох форматів рядків (Формат А: 2010+, Формат В: 2005)
- розпізнавання сторінок з Hydrologische Messstelle або country markers
- fallback на пошук назв постів великими латинськими літерами
"""
```

```
import subprocess
import pandas as pd
import re
import time
```

```
def decode_private_font(text):
    """Декодує приватний шрифт Тип 1 (для 2015):
    цифри 0..9 закодовані як 0x13..0x1C (зсув +0x13).
    Решта тексту не зачіпається.
    """
    out = []
    for ch in text:
        cp = ord(ch)
        if 0x13 <= cp <= 0x1C:
            out.append(chr(0x30 + (cp - 0x13)))
        else:
            out.append(ch)
    return "".join(out)
```

```
def decode_caesar_29_safe(text):
    """Безпечне декодування Цезаря +29 (для 2016).

    Зсуває ТІЛЬКИ ті діапазони, які точно зашифровані:
    - 0x03 → 0x20 (пробіл)
    - 0x13..0x1C → '0'..'9' (цифри)
    - 0x24..0x3D → 'A'..'Z' (великі літери)
    - 0x44..0x5D → 'a'..'z' (малі літери)
    - 0x05, 0x08, 0x0F..0x12, 0x1D..0x1F → пунктуація і спецсимволи

    Звичайні пробіли, кирилиця, цифри і пунктуація НЕ зачіпаються.
    Це означає, що зашифровані рівні води декодуються,
    а нешифровані витрати і дні залишаються як є.
    """
    out = []
    for ch in text:
        cp = ord(ch)
        if cp == 0x03:
            out.append(' ')
        elif 0x13 <= cp <= 0x1C:
            out.append(chr(cp + 0x1D))
        elif 0x24 <= cp <= 0x3D:
            out.append(chr(cp + 0x1D))
        elif 0x44 <= cp <= 0x5D:
            out.append(chr(cp + 0x1D))
        elif cp in (0x05, 0x08, 0x0F, 0x10, 0x11, 0x12, 0x1D, 0x1E, 0x1F):
            out.append(chr(cp + 0x1D))
        else:
            out.append(ch)
    return "".join(out)

def detect_and_decode(text):
    """Автоматично визначає тип шифрування і декодує.

    Тип 0: текст без шифрування (більшість років 2005-2014, 2017-2020).
    Тип 1: тільки цифри 0x13..0x1C закодовані як '0'..'9' (2015).
        Текст шапок частково зашифрований Цезарем, але назви постів
        і табличні заголовки (I, II, III...) - нешифровані ASCII.
    """
```

```

        Декодуємо тільки цифри.
Тип 2: повне шифрування Цезарем +29 (2016). Усе зашифроване,
        включаючи назви постів. Декодуємо всі діапазони Цезаря.
"""
# Тип 2: повне шифрування - впізнаємо за зашифрованим REGENSBURG
# (бо у 2016 він зашифрований, у 2015 - ні)
if "5*(16%85*" in text:
    text = decode_caesar_29_safe(text)
    return text, "type2"

# Тип 1: лише цифри зашифровані (характерно для 2015)
n_type1 = sum(1 for c in text[:20000] if 0x13 <= ord(c) <= 0x1C)
if n_type1 > 50:
    text = decode_private_font(text)
    return text, "type1"

return text, "none"

def parse_metadata(lines):
    md = {}
    full_text = "\n".join(lines[:10])
    # Спробуємо стандартну форму
    m = re.search(
        r"Hydrologische Messstelle\s+([A-ZÄÖÜß][A-ZÄÖÜß\s\-\.\(\)]*?) (?:\s+Beginn|\s{2,}|\$)",
        full_text,
    )
    if m:
        md["name_de"] = m.group(1).strip()
    else:
        # Fallback: шукаємо великі латинські слова в перших рядках
        stop = {"REGENSBURG", "KELHEIM", "OBERNDORF", "PFATTER", "STRAUBING",
            "PFELLING", "DEGGENDORF", "HOFKIRCHEN", "VILSHOFEN",
            "PASSAU", "ACHLEITEN", "ENGELHARTSZELL", "LINZ", "MELK",
            "KIENSTOCK", "WIEN", "ORTH", "WILDUNGSMAUER", "HAINBURG",
            "DEVIN", "BRATISLAVA", "MEDVEDOV", "GABCIKOVO",
            "THEBNERSTRASSL", "NAGYBAICS", "GÖNYU", "KOMAROM",
            "ESZTERGOM", "NAGYMAROS", "BUDAPEST", "DUNAUJVAROS",
            "DUNAFÖLDVAR", "PAKS", "BAJA", "MOHACS",
            "BEZDAN", "BACKA", "PALANKA", "NOVI", "SAD",
            "SLANKAMEN", "ZEMUN", "PANCEVO", "SMEDEREVO",

```

```

        "VELIKO", "GRADISTE", "VINCA", "KLADOVO",
        "PRAHOVO", "TURNU", "SEVERIN", "GRUIA",
        "VIDIN", "LOM", "ORYAHOVO", "RAST",
        "BECHET", "NIKOPOL", "TURNU MAGURELE",
        "SVISTOV", "ZIMNICEA", "RUSSE",
        "OLTENITA", "SILISTRA", "CALARASI",
        "BRAILA", "TULCEA", "ISACCEA",
        "ISMAIL", "RENI", "VILKOVO",
        "SCHWABELWEIS", "MAGURELE",
        "SULINA", "DUNA", "DONAUWORTH"}
for line in lines[:5]:
    matches = re.findall(r"\b[A-ZÄÖÜß]{3,}(?:\s+[A-ZÄÖÜß]{2,})*\b", line)
    for match in matches:
        if match.strip() in stop or any(s in match.strip() for s in stop):
            md["name_de"] = match.strip()
            break
    if "name_de" in md:
        break

m = re.search(r"km\s+km\s+([\d\s]+,\d+)", full_text)
if m:
    md["km_from_sulina"] = float(m.group(1).replace(" ", "").replace(",", "."))
return md

def parse_daily_levels(lines, year, decode_type=None):
    rows = []
    days_in_month = [31, 29, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31]
    if year % 4 == 0 and (year % 100 != 0 or year % 400 == 0):
        days_in_month[1] = 29
    else:
        days_in_month[1] = 28

    header_idx = None
    for i, line in enumerate(lines):
        if re.match(r"^s*I\s+II\s+III\s+IV\s+V\s+VI\s+VII\s+VIII\s+IX\s+X\s+XI\s+XII", line.strip()):
            header_idx = i
            break
    if header_idx is None:
        return rows

```

```

# Карта Цезарівських літер для цифр (формат 2016 на деяких сторінках):
# M=0, N=1, O=2, P=3, Q=4, R=5, S=6, T=7, U=8, V=9
LETTER_DIGITS = str.maketrans("MNOPQRSTUVWXYZ", "0123456789")
# Застосовуємо ТІЛЬКИ для type2 (пік 2016)
apply_letter_decode = (decode_type == "type2")

for j in range(1, 35):
    if header_idx + j >= len(lines):
        break
    line = lines[header_idx + j].strip()

    if apply_letter_decode and re.search(r'\b[MNOPQRSTUVWXYZ]{1,4}\b', line):
        def repl(m):
            w = m.group(0)
            if w in ("MAX", "MIN", "MM", "MV", "Date"):
                return w
            return w.translate(LETTER_DIGITS)
        line = re.sub(r'\b[MNOPQRSTUVWXYZ]{1,4}\b', repl, line)

    nums = re.findall(r"-?\d+", line)
    if not nums:
        continue

    day = None
    levels_part = None

    # Формат В (2005): день на 13-й позиції після 12 рівнів
    if len(nums) >= 13:
        try:
            candidate_day = int(nums[12])
            if 1 <= candidate_day <= 31:
                if all(0 <= int(n) <= 2000 for n in nums[:12]):
                    if 22 <= len(nums) <= 28:
                        day = candidate_day
                        levels_part_full = nums[:12]
                        active_months = [m + 1 for m, dim in enumerate(days_in_month) if dim >= day]
                        levels_part = []
                        for m in active_months:
                            idx = m - 1
                            if idx < len(levels_part_full):
                                levels_part.append(levels_part_full[idx])

```

```

        except (ValueError, IndexError):
            pass

# Формат А (2010+): день у кінці
if day is None:
    try:
        last = int(nums[-1])
        if 1 <= last <= 31:
            day = last
            active_months = [m + 1 for m, dim in enumerate(days_in_month) if dim >= day]
            n_active = len(active_months)
            if len(nums) - 1 >= n_active:
                levels_part = nums[:n_active]
    except ValueError:
        pass

if day is None or levels_part is None:
    continue

active_months = [m + 1 for m, dim in enumerate(days_in_month) if dim >= day]
for month, val_str in zip(active_months, levels_part):
    try:
        val = int(val_str)
    except ValueError:
        continue
    if not (0 <= val <= 2000):
        continue
    rows.append({
        "year": year, "month": month, "day": day,
        "water_level_cm": val,
    })
return rows

def parse_yearbook(pdf_path, year):
    result = subprocess.run(
        ["pdftotext", "-layout", pdf_path, "-"],
        capture_output=True, text=True, timeout=180
    )
    text = result.stdout

```

```

# Декодуємо приватні шрифти, якщо є (підтримує два типи)
text, decode_type = detect_and_decode(text)

pages = text.split("\f")
all_records = []
posts_meta = []
country_markers = ["Deutschland", "Österreich", "Slowakei", "Ungarn",
                   "Kroatien", "Serbien", "Bulgarien", "Rumänien",
                   "Republik Moldau", "Ukraine"]

for p_idx, page_text in enumerate(pages):
    if not re.search(r"\bI\s+II\s+III\s+IV\s+V\s+VI\s+VII\s+VIII\s+IX\s+X\s+XI\s+XII\b", page_text):
        continue
    has_post_marker = (
        "Hydrologische Messstelle" in page_text
        or any(c in page_text for c in country_markers)
    )
    if not has_post_marker:
        continue

    lines = page_text.split("\n")
    md = parse_metadata(lines)
    daily = parse_daily_levels(lines, year=year, decode_type=decode_type)
    if not daily:
        continue

    post_name = md.get("name_de", f"page_{p_idx+1}")
    for r in daily:
        r["post"] = post_name
        r["km_from_sulina"] = md.get("km_from_sulina")
    posts_meta.append({
        "page": p_idx + 1,
        "post_name": post_name,
        "km_from_sulina": md.get("km_from_sulina"),
        "n_records": len(daily),
    })
    all_records.extend(daily)

df = pd.DataFrame(all_records)
meta_df = pd.DataFrame(posts_meta)
return df, meta_df

```

```

def main():
    years = list(range(2005, 2021)) # 2005..2020 = 16 років
    summary = []
    all_data = []
    all_meta = []

    print(f"Парсимо {len(years)} щорічників...")
    print(f"{'Рік':<6} {'Постів':<8} {'Записів':<10} {'Час, с':<8}")
    print("-" * 40)

    for year in years:
        pdf_path = f"/mnt/user-data/uploads/DC_yearbook_{year}.pdf"
        t0 = time.time()
        try:
            df, meta = parse_yearbook(pdf_path, year)
            elapsed = time.time() - t0
            n_posts = len(meta)
            n_records = len(df)
            print(f"{year:<6} {n_posts:<8} {n_records:<10} {elapsed:<8.1f}")

            if n_records > 0:
                all_data.append(df)
                meta["year"] = year
                all_meta.append(meta)
            summary.append({
                "year": year,
                "n_posts": n_posts,
                "n_records": n_records,
                "time_s": round(elapsed, 1),
            })
        except Exception as e:
            elapsed = time.time() - t0
            print(f"{year:<6} ПОМИЛКА: {e}")
            summary.append({"year": year, "n_posts": 0, "n_records": 0, "time_s": elapsed})

    print()
    print("=" * 60)
    print("ПІДСУМКОВА ТАБЛИЦЯ:")
    summary_df = pd.DataFrame(summary)

```



```

print(summary_df.to_string(index=False))
print()
print(f"ВСЬОГО ЗАПИСІВ: {summary_df['n_records'].sum()}")

if all_data:
    combined = pd.concat(all_data, ignore_index=True)

    # Очищення
    # Видаляємо безіменні пости
    before = len(combined)
    combined = combined[~combined.post.str.startswith("page_")].copy()
    # Нормалізуємо назви
    combined["post"] = combined["post"].str.replace(r"\s*-\s*$", "", regex=True).str.strip()
    # Дедуплікація
    combined = combined.drop_duplicates(subset=["post", "year", "month", "day"])
    # Видаляємо некоректні значення
    combined = combined[combined.water_level_cm > 0].copy()
    after = len(combined)
    print(f"Після очищення: {after} записів (видалено {before - after})")
    print(f"Унікальних постів: {combined.post.nunique()}")

    # Зберегти
    combined.to_csv("/home/claude/danube_full_2005_2020.csv", index=False, encoding="utf-8")
    print(f"\nЗбережено: /home/claude/danube_full_2005_2020.csv")

    # Метадані постів
    meta_combined = pd.concat(all_meta, ignore_index=True)
    meta_combined.to_csv("/home/claude/danube_full_meta.csv", index=False, encoding="utf-8")

    return combined, summary_df

return None, summary_df

if __name__ == "__main__":
    main()

```

ДОДАТОК Е

МАТРИЦЯ КОРЕЛЯЦІЙ ВОДОМІРНИХ ПОСТІВ НА ДУНАЇ

Таблиця Е. 1 – Матриця кореляцій водомірних постів на Дунаї. Частина 1 (ACHLEITEN – ENGELHARTSZELL)

Водомірний пост	ACHLEITEN	APATIN	BACKA PALANKA	BAJA	BECHET	BEZDAN	BOGOJEVO	BRATISLAVA	BUDAPEST	CETATE	DEGGENDORF	DRENCOVA	DROBETA	ENGELHARTSZELL
ACHLEITEN	1,000	0,410	0,379	0,487	0,298	0,428	0,398	0,921	0,648	0,320	0,766	-0,175	0,182	0,994
APATIN	0,410	1,000	0,986	0,969	0,732	0,994	0,994	0,475	0,812	0,791	0,428	-0,528	0,407	0,395
BACKA PALANKA	0,379	0,986	1,000	0,925	0,777	0,969	0,992	0,445	0,755	0,828	0,371	-0,526	0,417	0,361
BAJA	0,487	0,969	0,925	1,000	0,659	0,985	0,953	0,565	0,901	0,724	0,530	-0,505	0,387	0,475
BECHET	0,298	0,732	0,777	0,659	1,000	0,699	0,731	0,299	0,528	0,980	0,354	-0,606	0,526	0,294
BEZDAN	0,428	0,994	0,969	0,985	0,699	1,000	0,984	0,491	0,830	0,766	0,486	-0,500	0,372	0,415
BOGOJEVO	0,398	0,994	0,992	0,953	0,731	0,984	1,000	0,477	0,801	0,791	0,395	-0,515	0,392	0,380
BRATISLAVA	0,921	0,475	0,445	0,565	0,299	0,491	0,477	1,000	0,768	0,333	0,757	-0,193	0,185	0,909
BUDAPEST	0,648	0,812	0,755	0,901	0,528	0,830	0,801	0,768	1,000	0,587	0,680	-0,385	0,305	0,631
CETATE	0,320	0,791	0,828	0,724	0,980	0,766	0,791	0,333	0,587	1,000	0,380	-0,633	0,535	0,316
DEGGENDORF	0,766	0,428	0,371	0,530	0,354	0,486	0,395	0,757	0,680	0,380	1,000	-0,146	0,196	0,781
DRENCOVA	-0,175	-0,528	-0,526	-0,505	-0,606	-0,500	-0,515	-0,193	-0,385	-0,633	-0,146	1,000	-0,578	-0,168
DROBETA	0,182	0,407	0,417	0,387	0,526	0,372	0,392	0,185	0,305	0,535	0,196	-0,578	1,000	0,178
ENGELHARTSZELL	0,994	0,395	0,361	0,475	0,294	0,415	0,380	0,909	0,631	0,316	0,781	-0,168	0,178	1,000
ESZTERGOM	0,716	0,746	0,694	0,835	0,493	0,761	0,738	0,846	0,983	0,549	0,726	-0,346	0,279	0,700
GI-NYU	0,820	0,646	0,601	0,733	0,411	0,659	0,641	0,938	0,915	0,456	0,745	-0,264	0,244	0,805
HAIBURG	0,944	0,500	0,472	0,582	0,316	0,518	0,497	0,985	0,767	0,348	0,771	-0,191	0,201	0,934
HOFKIRCHEN	0,776	0,453	0,397	0,562	0,376	0,511	0,422	0,763	0,711	0,402	0,996	-0,172	0,220	0,791
ISACCEA	0,217	0,451	0,493	0,412	0,801	0,399	0,448	0,221	0,347	0,729	0,212	-0,447	0,400	0,219
KELHEIM	0,793	0,306	0,254	0,406	0,261	0,362	0,276	0,739	0,564	0,290	0,950	-0,086	0,169	0,808
KIENSTOCK	0,975	0,425	0,400	0,505	0,271	0,448	0,419	0,952	0,678	0,298	0,759	-0,161	0,186	0,968
KOMAROM	0,770	0,704	0,658	0,790	0,466	0,718	0,698	0,895	0,956	0,517	0,740	-0,313	0,266	0,754

Водомірний пост	ACHLEITE N	APATIN	BACKA PALANKA	BAJA	BECHET	BEZDAN	BOGOJEVO	BRATISLA VA	BUDAPEST	CETATE	DEGGEND ORF	DRENCOV A	DROBETA	ENGELHA RTSZELL
LINZ	0,987	0,348	0,315	0,428	0,258	0,365	0,334	0,909	0,594	0,276	0,758	-0,139	0,145	0,991
LOM	0,284	0,759	0,802	0,691	0,994	0,732	0,759	0,309	0,552	0,992	0,368	-0,614	0,517	0,282
MELK	0,975	0,434	0,411	0,511	0,279	0,460	0,430	0,944	0,679	0,307	0,758	-0,168	0,189	0,967
MOHACS	0,451	0,985	0,950	0,995	0,693	0,997	0,971	0,523	0,865	0,756	0,502	-0,521	0,401	0,441
NAGYBAICS	0,850	0,624	0,583	0,707	0,402	0,637	0,617	0,953	0,888	0,441	0,760	-0,249	0,243	0,835
NAGYMAROS	0,692	0,769	0,714	0,863	0,499	0,786	0,760	0,817	0,993	0,556	0,703	-0,353	0,287	0,676
NIKOPOL	0,304	0,704	0,749	0,632	0,995	0,666	0,701	0,300	0,512	0,963	0,347	-0,594	0,535	0,300
NOVI SAD	0,364	0,964	0,985	0,896	0,856	0,946	0,965	0,416	0,719	0,898	0,394	-0,567	0,480	0,353
NOVO SELO	0,305	0,799	0,834	0,736	0,972	0,775	0,799	0,337	0,596	0,998	0,379	-0,638	0,555	0,301
OBERNDORF	0,752	0,280	0,226	0,385	0,243	0,338	0,246	0,702	0,541	0,273	0,949	-0,072	0,163	0,769
ORIAHOVO	0,274	0,732	0,779	0,660	0,999	0,699	0,734	0,298	0,528	0,980	0,345	-0,602	0,523	0,270
ORTH	0,952	0,493	0,459	0,568	0,329	0,507	0,481	0,969	0,737	0,355	0,766	-0,182	0,201	0,943
PAKS	0,519	0,922	0,866	0,984	0,577	0,944	0,907	0,616	0,949	0,644	0,563	-0,441	0,344	0,507
PANCEVO	0,310	0,824	0,853	0,759	0,937	0,799	0,823	0,344	0,615	0,966	0,397	-0,602	0,592	0,307
PASSAU DONAU	0,990	0,431	0,399	0,525	0,306	0,465	0,421	0,921	0,696	0,335	0,850	-0,180	0,197	0,989
PFATTER	0,681	0,267	0,209	0,368	0,240	0,323	0,227	0,651	0,520	0,268	0,937	-0,054	0,155	0,698
PFELLING	0,699	0,345	0,288	0,450	0,315	0,410	0,308	0,672	0,597	0,339	0,982	-0,117	0,202	0,720
PRAHOVO	0,340	0,820	0,850	0,760	0,953	0,799	0,820	0,372	0,628	0,986	0,414	-0,628	0,596	0,337
RAST	0,326	0,749	0,796	0,677	0,995	0,723	0,752	0,329	0,551	0,991	0,378	-0,612	0,521	0,323
REGENSBURG	0,675	0,247	0,192	0,345	0,228	0,302	0,209	0,642	0,494	0,254	0,920	-0,046	0,149	0,692
RENI	0,203	0,519	0,569	0,471	0,855	0,477	0,523	0,220	0,383	0,789	0,245	-0,469	0,411	0,204
SILISTRA	0,219	0,566	0,617	0,510	0,926	0,526	0,565	0,232	0,409	0,865	0,288	-0,504	0,473	0,219
SLANKAMEN	0,391	0,911	0,933	0,851	0,916	0,896	0,908	0,420	0,695	0,950	0,429	-0,600	0,544	0,385
SMEDEREVO	0,288	0,784	0,819	0,722	0,926	0,759	0,785	0,327	0,580	0,948	0,370	-0,573	0,611	0,284
STRAUBING	0,691	0,325	0,267	0,423	0,306	0,387	0,285	0,658	0,562	0,330	0,973	-0,105	0,194	0,713
SULINA	0,290	0,386	0,405	0,387	0,560	0,366	0,387	0,292	0,376	0,528	0,324	-0,331	0,252	0,296
SVISTOV	0,268	0,679	0,730	0,611	0,988	0,642	0,682	0,287	0,494	0,950	0,327	-0,574	0,526	0,264
THEBNERSTRASSL	0,926	0,534	0,505	0,615	0,345	0,550	0,534	0,991	0,801	0,381	0,769	-0,221	0,217	0,913

Водомірний пост	ACHLEITEN	APATIN	BACKA PALANKA	BAJA	BECHET	BEZDAN	BOGOJEVO	BRATISLAVA	BUDAPEST	CETATE	DEGGENDORF	DRENCOVA	DROBETA	ENGELHARTSZELL
TULCEA	0,248	0,520	0,571	0,476	0,823	0,475	0,526	0,258	0,400	0,756	0,227	-0,454	0,393	0,246
TURNU MAGURELE	0,303	0,699	0,743	0,631	0,994	0,659	0,695	0,295	0,512	0,960	0,346	-0,590	0,535	0,299
VELIKO GRADISTE	0,246	0,616	0,653	0,560	0,796	0,578	0,617	0,257	0,449	0,810	0,306	-0,328	0,573	0,250
VIDIN	0,317	0,779	0,816	0,711	0,986	0,752	0,777	0,325	0,574	0,998	0,382	-0,625	0,528	0,314
VILKOVO	0,276	0,436	0,470	0,421	0,707	0,405	0,438	0,269	0,381	0,657	0,337	-0,422	0,365	0,285
VILSHOFEN	0,738	0,384	0,318	0,500	0,314	0,439	0,345	0,742	0,668	0,341	0,986	-0,125	0,187	0,755
VUKOVAR	0,379	0,987	0,999	0,926	0,760	0,971	0,995	0,440	0,757	0,814	0,366	-0,519	0,403	0,361
WIEN	0,969	0,427	0,392	0,503	0,287	0,440	0,415	0,970	0,679	0,310	0,756	-0,160	0,174	0,962
WILDUNGSMAUER	0,953	0,483	0,456	0,563	0,305	0,500	0,479	0,977	0,744	0,335	0,763	-0,183	0,197	0,943
ZEMUN	0,308	0,837	0,866	0,772	0,936	0,816	0,838	0,346	0,623	0,968	0,397	-0,605	0,576	0,304
ZIMNICEA	0,292	0,680	0,727	0,607	0,987	0,638	0,678	0,287	0,492	0,948	0,333	-0,573	0,525	0,287

Таблиця Е. 2 – Матриця кореляцій водомірних постів на Дунаї. Частина 2 (ESZTERGOM – NAGYMAROS)

Водомірний пост	ESZTERGOM	GI-NYU	HAIBURG	HOFKIRCH EN	ISACCEA	KELHEIM	KIENSTOCK	KOMAROM	LINZ	LOM	MELK	MOHACS	NAGYBAICS	NAGYMAROS
ACHLEITEN	0,716	0,820	0,944	0,776	0,217	0,793	0,975	0,770	0,987	0,284	0,975	0,451	0,850	0,692
APATIN	0,746	0,646	0,500	0,453	0,451	0,306	0,425	0,704	0,348	0,759	0,434	0,985	0,624	0,769
BACKA PALANKA	0,694	0,601	0,472	0,397	0,493	0,254	0,400	0,658	0,315	0,802	0,411	0,950	0,583	0,714
BAJA	0,835	0,733	0,582	0,562	0,412	0,406	0,505	0,790	0,428	0,691	0,511	0,995	0,707	0,863
BECHET	0,493	0,411	0,316	0,376	0,801	0,261	0,271	0,466	0,258	0,994	0,279	0,693	0,402	0,499
BEZDAN	0,761	0,659	0,518	0,511	0,399	0,362	0,448	0,718	0,365	0,732	0,460	0,997	0,637	0,786
BOGOJEVO	0,738	0,641	0,497	0,422	0,448	0,276	0,419	0,698	0,334	0,759	0,430	0,971	0,617	0,760
BRATISLAVA	0,846	0,938	0,985	0,763	0,221	0,739	0,952	0,895	0,909	0,309	0,944	0,523	0,953	0,817
BUDAPEST	0,983	0,915	0,767	0,711	0,347	0,564	0,678	0,956	0,594	0,552	0,679	0,865	0,888	0,993
CETATE	0,549	0,456	0,348	0,402	0,729	0,290	0,298	0,517	0,276	0,992	0,307	0,756	0,441	0,556
DEGGENDORF	0,726	0,745	0,771	0,996	0,212	0,950	0,759	0,740	0,758	0,368	0,758	0,502	0,760	0,703
DRENCOVA	-0,346	-0,264	-0,191	-0,172	-0,447	-0,086	-0,161	-0,313	-0,139	-0,614	-0,168	-0,521	-0,249	-0,353

Водомірний пост	ESZTERGO M	GF–NYU	HAINBURG	HOFKIRCH EN	ISACCEA	KELHEIM	KIENSTOC K	KOMARO M	LINZ	LOM	MELK	MOHACS	NAGYBAIC S	NAGYMAR OS
DROBETA	0,279	0,244	0,201	0,220	0,400	0,169	0,186	0,266	0,145	0,517	0,189	0,401	0,243	0,287
ENGELHARTSZELL	0,700	0,805	0,934	0,791	0,219	0,808	0,968	0,754	0,991	0,282	0,967	0,441	0,835	0,676
ESZTERGOM	1,000	0,964	0,839	0,752	0,327	0,625	0,752	0,991	0,670	0,512	0,751	0,797	0,942	0,996
GF–NYU	0,964	1,000	0,934	0,765	0,276	0,671	0,860	0,989	0,784	0,417	0,855	0,692	0,995	0,948
HAINBURG	0,839	0,934	1,000	0,780	0,241	0,755	0,980	0,890	0,923	0,325	0,975	0,544	0,957	0,814
HOFKIRCHEN	0,752	0,765	0,780	1,000	0,251	0,935	0,764	0,762	0,763	0,395	0,763	0,532	0,778	0,732
ISACCEA	0,327	0,276	0,241	0,251	1,000	0,122	0,215	0,316	0,197	0,764	0,218	0,429	0,277	0,333
KELHEIM	0,625	0,671	0,755	0,935	0,122	1,000	0,773	0,651	0,791	0,282	0,771	0,378	0,698	0,597
KIENSTOCK	0,752	0,860	0,980	0,764	0,215	0,773	1,000	0,808	0,961	0,278	0,999	0,468	0,893	0,726
KOMAROM	0,991	0,989	0,890	0,762	0,316	0,651	0,808	1,000	0,727	0,479	0,805	0,751	0,975	0,979
LINZ	0,670	0,784	0,923	0,763	0,197	0,791	0,961	0,727	1,000	0,243	0,957	0,394	0,816	0,643
LOM	0,512	0,417	0,325	0,395	0,764	0,282	0,278	0,479	0,243	1,000	0,287	0,724	0,404	0,521
MELK	0,751	0,855	0,975	0,763	0,218	0,771	0,999	0,805	0,957	0,287	1,000	0,475	0,888	0,725
MOHACS	0,797	0,692	0,544	0,532	0,429	0,378	0,468	0,751	0,394	0,724	0,475	1,000	0,667	0,823
NAGYBAICS	0,942	0,995	0,957	0,778	0,277	0,698	0,893	0,975	0,816	0,404	0,888	0,667	1,000	0,923
NAGYMAROS	0,996	0,948	0,814	0,732	0,333	0,597	0,726	0,979	0,643	0,521	0,725	0,823	0,923	1,000
NIKOPOL	0,480	0,405	0,318	0,371	0,838	0,254	0,276	0,456	0,265	0,981	0,283	0,664	0,398	0,485
NOVI SAD	0,661	0,564	0,445	0,423	0,568	0,285	0,379	0,624	0,303	0,878	0,391	0,927	0,549	0,678
NOVO SELO	0,554	0,454	0,351	0,406	0,721	0,294	0,301	0,519	0,259	0,986	0,309	0,767	0,437	0,565
OBERNDORF	0,600	0,638	0,713	0,931	0,093	0,992	0,729	0,621	0,756	0,266	0,726	0,358	0,662	0,572
ORIAHOVO	0,490	0,401	0,314	0,373	0,801	0,258	0,268	0,460	0,232	0,994	0,277	0,693	0,389	0,498
ORTH	0,806	0,909	0,996	0,781	0,241	0,763	0,989	0,861	0,931	0,318	0,986	0,532	0,937	0,781
PAKS	0,889	0,791	0,628	0,595	0,351	0,439	0,543	0,845	0,461	0,612	0,548	0,964	0,759	0,919
PANCEVO	0,573	0,472	0,358	0,419	0,649	0,312	0,306	0,536	0,260	0,953	0,316	0,791	0,455	0,579
PASSAU DONAU	0,761	0,846	0,946	0,854	0,228	0,853	0,969	0,805	0,976	0,317	0,969	0,488	0,873	0,738
PFATTER	0,575	0,602	0,658	0,914	0,070	0,962	0,665	0,592	0,687	0,257	0,662	0,344	0,623	0,547
PFELLING	0,643	0,655	0,691	0,975	0,179	0,960	0,689	0,654	0,691	0,336	0,688	0,425	0,674	0,619
PRAHOVO	0,591	0,499	0,387	0,437	0,689	0,321	0,331	0,559	0,293	0,970	0,340	0,790	0,482	0,597

Водомірний пост	ESZTERGO M	GI-NYU	HAIBURG	HOFKIRCH EN	ISACCEA	KELHEIM	KIENSTOC K	KOMARO M	LINZ	LOM	MELK	MOHACS	NAGYBAIC S	NAGYMAR OS
RAST	0,520	0,440	0,350	0,398	0,759	0,289	0,313	0,495	0,280	0,999	0,326	0,710	0,429	0,524
REGENSBURG	0,552	0,583	0,647	0,895	0,055	0,959	0,658	0,570	0,684	0,244	0,655	0,322	0,604	0,525
RENI	0,358	0,293	0,232	0,276	0,973	0,139	0,196	0,340	0,182	0,823	0,203	0,494	0,284	0,365
SILISTRA	0,381	0,310	0,249	0,320	0,939	0,191	0,213	0,360	0,192	0,897	0,220	0,537	0,304	0,388
SLANKAMEN	0,646	0,555	0,445	0,457	0,638	0,333	0,388	0,613	0,336	0,931	0,397	0,881	0,541	0,660
SMEDEREVO	0,539	0,442	0,339	0,393	0,642	0,291	0,290	0,505	0,237	0,938	0,300	0,753	0,426	0,549
STRAUBING	0,610	0,629	0,679	0,961	0,160	0,969	0,684	0,625	0,687	0,322	0,684	0,400	0,650	0,585
SULINA	0,371	0,332	0,298	0,344	0,700	0,232	0,272	0,359	0,285	0,538	0,277	0,391	0,325	0,378
SVISTOV	0,460	0,381	0,305	0,358	0,859	0,238	0,263	0,435	0,229	0,971	0,270	0,642	0,372	0,468
THEBNERSTRASSL	0,871	0,953	0,995	0,779	0,252	0,745	0,964	0,917	0,903	0,356	0,959	0,577	0,970	0,845
TULCEA	0,379	0,327	0,276	0,262	0,976	0,122	0,242	0,367	0,224	0,789	0,248	0,494	0,322	0,386
TURNU MAGURELE	0,480	0,405	0,313	0,369	0,843	0,251	0,271	0,455	0,263	0,979	0,279	0,661	0,398	0,485
VELIKO GRADISTE	0,419	0,352	0,276	0,321	0,538	0,262	0,244	0,398	0,206	0,805	0,251	0,586	0,340	0,431
VIDIN	0,537	0,445	0,341	0,404	0,741	0,294	0,293	0,505	0,274	0,996	0,301	0,744	0,432	0,544
VILKOVO	0,371	0,324	0,282	0,363	0,843	0,245	0,257	0,359	0,264	0,686	0,262	0,433	0,319	0,376
VILSHOFEN	0,713	0,729	0,745	0,985	0,175	0,932	0,730	0,723	0,736	0,328	0,726	0,468	0,741	0,691
VUKOVAR	0,697	0,605	0,464	0,386	0,469	0,244	0,390	0,660	0,317	0,783	0,402	0,952	0,585	0,715
WIEN	0,757	0,872	0,986	0,764	0,204	0,770	0,996	0,817	0,960	0,270	0,992	0,467	0,903	0,727
WILDUNGSMAUER	0,816	0,916	0,998	0,772	0,240	0,753	0,987	0,869	0,933	0,313	0,983	0,525	0,943	0,791
ZEMUN	0,580	0,476	0,357	0,419	0,642	0,309	0,302	0,542	0,259	0,954	0,312	0,805	0,457	0,587
ZIMNICEA	0,462	0,390	0,304	0,356	0,861	0,237	0,263	0,440	0,254	0,969	0,270	0,639	0,384	0,466

Таблиця Е. 3 – Матриця кореляцій водомірних постів на Дунаї. Частина 3 (NIKOPOL – REGENSBURG)

Водомірний пост	NIKOPOL	NOVI SAD	NOVO SELO	OBERNDORF	ORIANOV O	ORTH	PAKS	PANCEVO	PASSAU DONAU	PFATTER	PFELLING	PRAHOVO	RAST	REGENSBURG
ACHLEITEN	0,304	0,364	0,305	0,752	0,274	0,952	0,519	0,310	0,990	0,681	0,699	0,340	0,326	0,675
APATIN	0,704	0,964	0,799	0,280	0,732	0,493	0,922	0,824	0,431	0,267	0,345	0,820	0,749	0,247
BACKA PALANKA	0,749	0,985	0,834	0,226	0,779	0,459	0,866	0,853	0,399	0,209	0,288	0,850	0,796	0,192

Водомірний пост	NIKOPOL	NOVI SAD	NOVO SELO	OBERNDORF	ORIAHOVO	ORTH	PAKS	PANCEVO	PASSAU DONAU	PFATTER	PFELLING	PRAHOVO	RAST	REGENSBURG
BAJA	0,632	0,896	0,736	0,385	0,660	0,568	0,984	0,759	0,525	0,368	0,450	0,760	0,677	0,345
BECHET	0,995	0,856	0,972	0,243	0,999	0,329	0,577	0,937	0,306	0,240	0,315	0,953	0,995	0,228
BEZDAN	0,666	0,946	0,775	0,338	0,699	0,507	0,944	0,799	0,465	0,323	0,410	0,799	0,723	0,302
BOGOJEVO	0,701	0,965	0,799	0,246	0,734	0,481	0,907	0,823	0,421	0,227	0,308	0,820	0,752	0,209
BRATISLAVA	0,300	0,416	0,337	0,702	0,298	0,969	0,616	0,344	0,921	0,651	0,672	0,372	0,329	0,642
BUDAPEST	0,512	0,719	0,596	0,541	0,528	0,737	0,949	0,615	0,696	0,520	0,597	0,628	0,551	0,494
CETATE	0,963	0,898	0,998	0,273	0,980	0,355	0,644	0,966	0,335	0,268	0,339	0,986	0,991	0,254
DEGGENDORF	0,347	0,394	0,379	0,949	0,345	0,766	0,563	0,397	0,850	0,937	0,982	0,414	0,378	0,920
DRENCOVA	-0,594	-0,567	-0,638	-0,072	-0,602	-0,182	-0,441	-0,602	-0,180	-0,054	-0,117	-0,628	-0,612	-0,046
DROBETA	0,535	0,480	0,555	0,163	0,523	0,201	0,344	0,592	0,197	0,155	0,202	0,596	0,521	0,149
ENGELHARTSZELL	0,300	0,353	0,301	0,769	0,270	0,943	0,507	0,307	0,989	0,698	0,720	0,337	0,323	0,692
ESZTERGOM	0,480	0,661	0,554	0,600	0,490	0,806	0,889	0,573	0,761	0,575	0,643	0,591	0,520	0,552
GF-NYU	0,405	0,564	0,454	0,638	0,401	0,909	0,791	0,472	0,846	0,602	0,655	0,499	0,440	0,583
HAINBURG	0,318	0,445	0,351	0,713	0,314	0,996	0,628	0,358	0,946	0,658	0,691	0,387	0,350	0,647
HOFKIRCHEN	0,371	0,423	0,406	0,931	0,373	0,781	0,595	0,419	0,854	0,914	0,975	0,437	0,398	0,895
ISACCEA	0,838	0,568	0,721	0,093	0,801	0,241	0,351	0,649	0,228	0,070	0,179	0,689	0,759	0,055
KELHEIM	0,254	0,285	0,294	0,992	0,258	0,763	0,439	0,312	0,853	0,962	0,960	0,321	0,289	0,959
KIENSTOCK	0,276	0,379	0,301	0,729	0,268	0,989	0,543	0,306	0,969	0,665	0,689	0,331	0,313	0,658
KOMAROM	0,456	0,624	0,519	0,621	0,460	0,861	0,845	0,536	0,805	0,592	0,654	0,559	0,495	0,570
LINZ	0,265	0,303	0,259	0,756	0,232	0,931	0,461	0,260	0,976	0,687	0,691	0,293	0,280	0,684
LOM	0,981	0,878	0,986	0,266	0,994	0,318	0,612	0,953	0,317	0,257	0,336	0,970	0,999	0,244
MELK	0,283	0,391	0,309	0,726	0,277	0,986	0,548	0,316	0,969	0,662	0,688	0,340	0,326	0,655
MOHACS	0,664	0,927	0,767	0,358	0,693	0,532	0,964	0,791	0,488	0,344	0,425	0,790	0,710	0,322
NAGYBAICS	0,398	0,549	0,437	0,662	0,389	0,937	0,759	0,455	0,873	0,623	0,674	0,482	0,429	0,604
NAGYMAROS	0,485	0,678	0,565	0,572	0,498	0,781	0,919	0,579	0,738	0,547	0,619	0,597	0,524	0,525
NIKOPOL	1,000	0,830	0,955	0,235	0,994	0,333	0,554	0,917	0,309	0,229	0,308	0,936	0,983	0,217
NOVI SAD	0,830	1,000	0,903	0,260	0,858	0,435	0,827	0,921	0,392	0,245	0,329	0,915	0,873	0,228
NOVO SELO	0,955	0,903	1,000	0,277	0,973	0,342	0,661	0,970	0,337	0,267	0,344	0,992	0,985	0,253

Водомірний пост	NIKOPOL	NOVI SAD	NOVO SELO	OBERNDORF	ORIAHOVO	ORTH	PAKS	PANCEVO	PASSAU DONAU	PFATTER	PFELLING	PRAHOVO	RAST	REGENSBURG
OBERNDORF	0,235	0,260	0,277	1,000	0,241	0,719	0,417	0,297	0,819	0,985	0,964	0,304	0,267	0,982
ORIAHOVO	0,994	0,858	0,973	0,241	1,000	0,307	0,581	0,941	0,303	0,230	0,312	0,955	0,996	0,218
ORTH	0,333	0,435	0,342	0,719	0,307	1,000	0,606	0,356	0,954	0,658	0,697	0,386	0,361	0,648
PAKS	0,554	0,827	0,661	0,417	0,581	0,606	1,000	0,681	0,562	0,398	0,482	0,684	0,605	0,378
PANCEVO	0,917	0,921	0,970	0,297	0,941	0,356	0,681	1,000	0,338	0,294	0,366	0,978	0,950	0,280
PASSAU DONAU	0,309	0,392	0,337	0,819	0,303	0,954	0,562	0,338	1,000	0,763	0,785	0,363	0,339	0,753
PFATTER	0,229	0,245	0,267	0,985	0,230	0,658	0,398	0,294	0,763	1,000	0,956	0,297	0,256	0,994
PFELLING	0,308	0,329	0,344	0,964	0,312	0,697	0,482	0,366	0,785	0,956	1,000	0,375	0,339	0,942
PRAHOVO	0,936	0,915	0,992	0,304	0,955	0,386	0,684	0,978	0,363	0,297	0,375	1,000	0,967	0,283
RAST	0,983	0,873	0,985	0,267	0,996	0,361	0,605	0,950	0,339	0,256	0,339	0,967	1,000	0,248
REGENSBURG	0,217	0,228	0,253	0,982	0,218	0,648	0,378	0,280	0,753	0,994	0,942	0,283	0,248	1,000
RENI	0,883	0,639	0,780	0,117	0,854	0,226	0,408	0,713	0,223	0,106	0,205	0,751	0,822	0,093
SILISTRA	0,950	0,702	0,855	0,173	0,925	0,246	0,440	0,795	0,244	0,162	0,260	0,827	0,895	0,150
SLANKAMEN	0,896	0,978	0,952	0,311	0,915	0,444	0,780	0,967	0,414	0,298	0,378	0,962	0,929	0,281
SMEDEREVO	0,907	0,889	0,950	0,278	0,928	0,329	0,652	0,986	0,320	0,275	0,344	0,958	0,939	0,265
STRAUBING	0,299	0,310	0,331	0,974	0,299	0,685	0,453	0,357	0,779	0,965	0,997	0,364	0,331	0,956
SULINA	0,576	0,441	0,513	0,215	0,552	0,292	0,342	0,473	0,312	0,209	0,275	0,516	0,529	0,201
SVISTOV	0,998	0,812	0,942	0,219	0,988	0,300	0,537	0,900	0,294	0,206	0,294	0,921	0,973	0,194
THEBNERSTRASSL	0,344	0,477	0,385	0,705	0,343	0,985	0,662	0,397	0,930	0,653	0,688	0,422	0,380	0,642
TULCEA	0,854	0,628	0,747	0,093	0,822	0,273	0,418	0,676	0,257	0,075	0,175	0,719	0,789	0,062
TURNU MAGURELE	1,000	0,825	0,952	0,232	0,993	0,333	0,553	0,913	0,305	0,226	0,306	0,932	0,981	0,214
VELIKO GRADISTE	0,782	0,726	0,812	0,253	0,799	0,273	0,508	0,868	0,272	0,255	0,297	0,823	0,805	0,251
VIDIN	0,970	0,890	0,995	0,277	0,986	0,350	0,631	0,963	0,332	0,272	0,344	0,981	0,995	0,259
VILKOVO	0,731	0,535	0,653	0,228	0,708	0,278	0,365	0,599	0,306	0,221	0,302	0,637	0,677	0,211
VILSHOFEN	0,308	0,344	0,339	0,943	0,304	0,735	0,538	0,357	0,829	0,943	0,968	0,371	0,327	0,923
VUKOVAR	0,732	0,979	0,818	0,216	0,760	0,459	0,866	0,841	0,389	0,206	0,276	0,836	0,779	0,189
WIEN	0,292	0,370	0,293	0,729	0,261	0,990	0,539	0,308	0,964	0,666	0,686	0,338	0,319	0,659
WILDUNGMAUER	0,308	0,430	0,338	0,711	0,303	0,999	0,606	0,343	0,952	0,652	0,684	0,372	0,339	0,642

Водомірний пост	NIKOPOL	NOVI SAD	NOVO SELO	OBERNDORF	ORIAHOVO	ORTH	PAKS	PANCEVO	PASSAU DONAU	PFATTER	PFELLING	PRAHOVO	RAST	REGENSBURG
ZEMUN	0,914	0,930	0,972	0,294	0,940	0,352	0,693	0,998	0,336	0,291	0,362	0,980	0,951	0,277
ZIMNICEA	0,997	0,809	0,940	0,217	0,986	0,321	0,528	0,898	0,294	0,213	0,293	0,919	0,971	0,201

Таблиця Е. 4 – Матриця кореляцій водомірних постів на Дунаї. Частина 4 (RENI – VILSHOFEN)

Водомірний пост	RENI	SILISTRA	SLANKAMEN	SMEDERVO	STRAUBING	SULINA	SVISTOV	THEBNERS TRASSL	TULCEA	TURNU MAGURELE	VELIKO GRADISTE	VIDIN	VILKOVO	VILSHOFEN
ACHLEITEN	0,203	0,219	0,391	0,288	0,691	0,290	0,268	0,926	0,248	0,303	0,246	0,317	0,276	0,738
APATIN	0,519	0,566	0,911	0,784	0,325	0,386	0,679	0,534	0,520	0,699	0,616	0,779	0,436	0,384
BACKA PALANKA	0,569	0,617	0,933	0,819	0,267	0,405	0,730	0,505	0,571	0,743	0,653	0,816	0,470	0,318
BAJA	0,471	0,510	0,851	0,722	0,423	0,387	0,611	0,615	0,476	0,631	0,560	0,711	0,421	0,500
BECHET	0,855	0,926	0,916	0,926	0,306	0,560	0,988	0,345	0,823	0,994	0,796	0,986	0,707	0,314
BEZDAN	0,477	0,526	0,896	0,759	0,387	0,366	0,642	0,550	0,475	0,659	0,578	0,752	0,405	0,439
BOGOJEVO	0,523	0,565	0,908	0,785	0,285	0,387	0,682	0,534	0,526	0,695	0,617	0,777	0,438	0,345
BRATISLAVA	0,220	0,232	0,420	0,327	0,658	0,292	0,287	0,991	0,258	0,295	0,257	0,325	0,269	0,742
BUDAPEST	0,383	0,409	0,695	0,580	0,562	0,376	0,494	0,801	0,400	0,512	0,449	0,574	0,381	0,668
CETATE	0,789	0,865	0,950	0,948	0,330	0,528	0,950	0,381	0,756	0,960	0,810	0,998	0,657	0,341
DEGGENDORF	0,245	0,288	0,429	0,370	0,973	0,324	0,327	0,769	0,227	0,346	0,306	0,382	0,337	0,986
DRENCOVA	-0,469	-0,504	-0,600	-0,573	-0,105	-0,331	-0,574	-0,221	-0,454	-0,590	-0,328	-0,625	-0,422	-0,125
DROBETA	0,411	0,473	0,544	0,611	0,194	0,252	0,526	0,217	0,393	0,535	0,573	0,528	0,365	0,187
ENGELHARTSZELL	0,204	0,219	0,385	0,284	0,713	0,296	0,264	0,913	0,246	0,299	0,250	0,314	0,285	0,755
ESZTERGOM	0,358	0,381	0,646	0,539	0,610	0,371	0,460	0,871	0,379	0,480	0,419	0,537	0,371	0,713
GI-NYU	0,293	0,310	0,555	0,442	0,629	0,332	0,381	0,953	0,327	0,405	0,352	0,445	0,324	0,729
HAINBURG	0,232	0,249	0,445	0,339	0,679	0,298	0,305	0,995	0,276	0,313	0,276	0,341	0,282	0,745
HOFKIRCHEN	0,276	0,320	0,457	0,393	0,961	0,344	0,358	0,779	0,262	0,369	0,321	0,404	0,363	0,985
ISACCEA	0,973	0,939	0,638	0,642	0,160	0,700	0,859	0,252	0,976	0,843	0,538	0,741	0,843	0,175
KELHEIM	0,139	0,191	0,333	0,291	0,969	0,232	0,238	0,745	0,122	0,251	0,262	0,294	0,245	0,932
KIENSTOCK	0,196	0,213	0,388	0,290	0,684	0,272	0,263	0,964	0,242	0,271	0,244	0,293	0,257	0,730

Водомірний пост	RENI	SILISTRA	SLANKAM EN	SMEDERE VO	STRAUBIN G	SULINA	SVISTOV	THEBNERS TRASSL	TULCEA	TURNU MAGUREL E	VELIKO GRADISTE	VIDIN	VILKOVO	VILSHOFE N
KOMAROM	0,340	0,360	0,613	0,505	0,625	0,359	0,435	0,917	0,367	0,455	0,398	0,505	0,359	0,723
LINZ	0,182	0,192	0,336	0,237	0,687	0,285	0,229	0,903	0,224	0,263	0,206	0,274	0,264	0,736
LOM	0,823	0,897	0,931	0,938	0,322	0,538	0,971	0,356	0,789	0,979	0,805	0,996	0,686	0,328
MELK	0,203	0,220	0,397	0,300	0,684	0,277	0,270	0,959	0,248	0,279	0,251	0,301	0,262	0,726
MOHACS	0,494	0,537	0,881	0,753	0,400	0,391	0,642	0,577	0,494	0,661	0,586	0,744	0,433	0,468
NAGYBAICS	0,284	0,304	0,541	0,426	0,650	0,325	0,372	0,970	0,322	0,398	0,340	0,432	0,319	0,741
NAGYMAROS	0,365	0,388	0,660	0,549	0,585	0,378	0,468	0,845	0,386	0,485	0,431	0,544	0,376	0,691
NIKOPOL	0,883	0,950	0,896	0,907	0,299	0,576	0,998	0,344	0,854	1,000	0,782	0,970	0,731	0,308
NOVI SAD	0,639	0,702	0,978	0,889	0,310	0,441	0,812	0,477	0,628	0,825	0,726	0,890	0,535	0,344
NOVO SELO	0,780	0,855	0,952	0,950	0,331	0,513	0,942	0,385	0,747	0,952	0,812	0,995	0,653	0,339
OBERNDORF	0,117	0,173	0,311	0,278	0,974	0,215	0,219	0,705	0,093	0,232	0,253	0,277	0,228	0,943
ORIAHOVO	0,854	0,925	0,915	0,928	0,299	0,552	0,988	0,343	0,822	0,993	0,799	0,986	0,708	0,304
ORTH	0,226	0,246	0,444	0,329	0,685	0,292	0,300	0,985	0,273	0,333	0,273	0,350	0,278	0,735
PAKS	0,408	0,440	0,780	0,652	0,453	0,342	0,537	0,662	0,418	0,553	0,508	0,631	0,365	0,538
PANCEVO	0,713	0,795	0,967	0,986	0,357	0,473	0,900	0,397	0,676	0,913	0,868	0,963	0,599	0,357
PASSAU DONAU	0,223	0,244	0,414	0,320	0,779	0,312	0,294	0,930	0,257	0,305	0,272	0,332	0,306	0,829
PFATTER	0,106	0,162	0,298	0,275	0,965	0,209	0,206	0,653	0,075	0,226	0,255	0,272	0,221	0,943
PFELLING	0,205	0,260	0,378	0,344	0,997	0,275	0,294	0,688	0,175	0,306	0,297	0,344	0,302	0,968
PRAHOVO	0,751	0,827	0,962	0,958	0,364	0,516	0,921	0,422	0,719	0,932	0,823	0,981	0,637	0,371
RAST	0,822	0,895	0,929	0,939	0,331	0,529	0,973	0,380	0,789	0,981	0,805	0,995	0,677	0,327
REGENSBURG	0,093	0,150	0,281	0,265	0,956	0,201	0,194	0,642	0,062	0,214	0,251	0,259	0,211	0,923
RENI	1,000	0,971	0,697	0,709	0,185	0,707	0,902	0,252	0,990	0,887	0,597	0,799	0,858	0,201
SILISTRA	0,971	1,000	0,769	0,792	0,243	0,629	0,965	0,269	0,946	0,954	0,682	0,875	0,805	0,249
SLANKAMEN	0,697	0,769	1,000	0,938	0,364	0,494	0,875	0,476	0,680	0,892	0,794	0,946	0,597	0,387
SMEDEREVO	0,709	0,792	0,938	1,000	0,333	0,440	0,890	0,377	0,673	0,904	0,895	0,945	0,583	0,327
STRAUBING	0,185	0,243	0,364	0,333	1,000	0,259	0,279	0,674	0,154	0,297	0,295	0,335	0,285	0,956
SULINA	0,707	0,629	0,494	0,440	0,259	1,000	0,581	0,307	0,731	0,575	0,340	0,534	0,919	0,292
SVISTOV	0,902	0,965	0,875	0,890	0,279	0,581	1,000	0,330	0,873	0,998	0,769	0,957	0,746	0,286

Водомірний пост	RENI	SILISTRA	SLANKAM EN	SMEDERE VO	STRAUBIN G	SULINA	SVISTOV	THEBNERS TRASSL	TULCEA	TURNU MAGUREL E	VELIKO GRADISTE	VIDIN	VILKOVO	VILSHOF E
THEBNERSTRASSL	0,252	0,269	0,476	0,377	0,674	0,307	0,330	1,000	0,291	0,339	0,303	0,372	0,294	0,744
TULCEA	0,990	0,946	0,680	0,673	0,154	0,731	0,873	0,291	1,000	0,857	0,565	0,765	0,864	0,181
TURNU MAGURELE	0,887	0,954	0,892	0,904	0,297	0,575	0,998	0,339	0,857	1,000	0,779	0,967	0,735	0,306
VELIKO GRADISTE	0,597	0,682	0,794	0,895	0,295	0,340	0,769	0,303	0,565	0,779	1,000	0,810	0,471	0,279
VIDIN	0,799	0,875	0,946	0,945	0,335	0,534	0,957	0,372	0,765	0,967	0,810	1,000	0,667	0,343
VILKOVO	0,858	0,805	0,597	0,583	0,285	0,919	0,746	0,294	0,864	0,735	0,471	0,667	1,000	0,304
VILSHOFEN	0,201	0,249	0,387	0,327	0,956	0,292	0,286	0,744	0,181	0,306	0,279	0,343	0,304	1,000
VUKOVAR	0,548	0,593	0,922	0,804	0,259	0,398	0,708	0,499	0,549	0,727	0,641	0,801	0,451	0,315
WIEN	0,191	0,206	0,389	0,281	0,678	0,274	0,255	0,973	0,235	0,291	0,236	0,305	0,251	0,729
WILDUNGSMAUER	0,226	0,242	0,432	0,324	0,674	0,297	0,296	0,988	0,273	0,304	0,266	0,328	0,280	0,736
ZEMUN	0,712	0,791	0,971	0,982	0,352	0,476	0,897	0,397	0,674	0,911	0,855	0,964	0,598	0,357
ZIMNICEA	0,904	0,966	0,875	0,888	0,285	0,587	1,000	0,329	0,876	0,998	0,767	0,955	0,748	0,292

Таблиця Е. 5 – Матриця кореляцій водомірних постів на Дунаї. Частина 5 (VUKOVAR – ZIMNICEA)

Водомірний пост	VUKOVAR	WIEN	WILDUNG SMAUER	ZEMUN	ZIMNICEA
ACHLEITEN	0,379	0,969	0,953	0,308	0,292
APATIN	0,987	0,427	0,483	0,837	0,680
BACKA PALANKA	0,999	0,392	0,456	0,866	0,727
BAJA	0,926	0,503	0,563	0,772	0,607
BECHET	0,760	0,287	0,305	0,936	0,987
BEZDAN	0,971	0,440	0,500	0,816	0,638
BOGOJEVO	0,995	0,415	0,479	0,838	0,678
BRATISLAVA	0,440	0,970	0,977	0,346	0,287
BUDAPEST	0,757	0,679	0,744	0,623	0,492
CETATE	0,814	0,310	0,335	0,968	0,948
DEGGENDORF	0,366	0,756	0,763	0,397	0,333

Водомірний пост	VUKOVAR	WIEN	WILDUNG SMAUER	ZEMUN	ZIMNICEA
DRENCOVA	-0,519	-0,160	-0,183	-0,605	-0,573
DROBETA	0,403	0,174	0,197	0,576	0,525
ENGELHARTSZELL	0,361	0,962	0,943	0,304	0,287
ESZTERGOM	0,697	0,757	0,816	0,580	0,462
GI-NYU	0,605	0,872	0,916	0,476	0,390
HAINBURG	0,464	0,986	0,998	0,357	0,304
HOFKIRCHEN	0,386	0,764	0,772	0,419	0,356
ISACCEA	0,469	0,204	0,240	0,642	0,861
KELHEIM	0,244	0,770	0,753	0,309	0,237
KIENSTOCK	0,390	0,996	0,987	0,302	0,263
KOMAROM	0,660	0,817	0,869	0,542	0,440

Водомірний пост	VUKOVAR	WIEN	WILDUNG SMAUER	ZEMUN	ZIMNICEA
LINZ	0,317	0,960	0,933	0,259	0,254
LOM	0,783	0,270	0,313	0,954	0,969
MELK	0,402	0,992	0,983	0,312	0,270
MOHACS	0,952	0,467	0,525	0,805	0,639
NAGYBAICS	0,585	0,903	0,943	0,457	0,384
NAGYMAROS	0,715	0,727	0,791	0,587	0,466
NIKOPOL	0,732	0,292	0,308	0,914	0,997
NOVI SAD	0,979	0,370	0,430	0,930	0,809
NOVO SELO	0,818	0,293	0,338	0,972	0,940
OBERNDORF	0,216	0,729	0,711	0,294	0,217
ORIAHOVO	0,760	0,261	0,303	0,940	0,986
ORTH	0,459	0,990	0,999	0,352	0,321
PAKS	0,866	0,539	0,606	0,693	0,528
PANCEVO	0,841	0,308	0,343	0,998	0,898
PASSAU DONAU	0,389	0,964	0,952	0,336	0,294
PFATTER	0,206	0,666	0,652	0,291	0,213
PFELLING	0,276	0,686	0,684	0,362	0,293
PRAHOVO	0,836	0,338	0,372	0,980	0,919
RAST	0,779	0,319	0,339	0,951	0,971
REGENSBURG	0,189	0,659	0,642	0,277	0,201

Водомірний пост	VUKOVAR	WIEN	WILDUNG SMAUER	ZEMUN	ZIMNICEA
RENI	0,548	0,191	0,226	0,712	0,904
SILISTRA	0,593	0,206	0,242	0,791	0,966
SLANKAMEN	0,922	0,389	0,432	0,971	0,875
SMEDEREVO	0,804	0,281	0,324	0,982	0,888
STRAUBING	0,259	0,678	0,674	0,352	0,285
SULINA	0,398	0,274	0,297	0,476	0,587
SVISTOV	0,708	0,255	0,296	0,897	1,000
THEBNERSTRASSL	0,499	0,973	0,988	0,397	0,329
TULCEA	0,549	0,235	0,273	0,674	0,876
TURNU MAGURELE	0,727	0,291	0,304	0,911	0,998
VELIKO GRADISTE	0,641	0,236	0,266	0,855	0,767
VIDIN	0,801	0,305	0,328	0,964	0,955
VILKOVO	0,451	0,251	0,280	0,598	0,748
VILSHOFEN	0,315	0,729	0,736	0,357	0,292
VUKOVAR	1,000	0,396	0,447	0,855	0,711
WIEN	0,396	1,000	0,991	0,306	0,280
WILDUNGSMAUER	0,447	0,991	1,000	0,340	0,295
ZEMUN	0,855	0,306	0,340	1,000	0,895
ZIMNICEA	0,711	0,280	0,295	0,895	1,000

Кореляційну матрицю побудовано за даними 2020 р. – року з найповнішим покриттям мережі (61 пост із повним річним рядом, максимум за 2005–2020 рр.). Перевірка на 13 опорних постах із наскрізним покриттям за 2005–2020 рр. (уся довжина судноплавного Дунаю) підтвердила стійкість просторової структури (медіана подібності $\approx 0,9$); детальний полірічний аналіз виходить за межі задач роботи й не наводиться.

ДОВІДКОВА ТАБЛИЦЯ РЕКОМЕНДОВАНИХ ЗНАЧЕНЬ ГІДРОЛОГІЧНОГО МНОЖНИКА k_H

Програмна реалізація способу оцінки енергоефективності передбачає введення фактичних значень гідрологічного множника k_H для кожної ділянки рейсу. Однак на практиці оператор флоту може не мати оперативного доступу до актуальних даних про глибину фарватеру, особливо при плануванні рейсу заздалегідь. Для таких випадків нижче наведено довідкову таблицю рекомендованих значень k_H для трьох ділянок Дунаю (згідно з поділом п. 2.1.2, табл. Є.1) та двох сезонів року, побудовану автором на основі офіційних значень нижчого і вищого судноплавних рівнів (НСРР та ВСР), які наведені у зведеній таблиці IV.1.1 річного щорічника Дунайської Комісії, та 16-річної бази добових рівнів води [17].

Таблиця Є.1 – Рекомендовані значення k_H для дунайських ділянок та сезонів року при типовій приведеній осадці каравану $d = 2,0$ м

Ділянка	Сезон	Середнє H/d	k_H	
			Параметризація А	Параметризація В
Верхній Дунай	Зимово-весняний	$1,32 \pm 0,27$	$1,21 \pm 0,06$	$1,38 \pm 0,14$
Верхній Дунай	Літньо-осінній	$1,28 \pm 0,31$	$1,23 \pm 0,08$	$1,42 \pm 0,17$
Середній Дунай	Зимово-весняний	$1,36 \pm 0,30$	$1,21 \pm 0,07$	$1,37 \pm 0,14$
Середній Дунай	Літньо-осінній	$1,26 \pm 0,32$	$1,23 \pm 0,08$	$1,43 \pm 0,17$
Нижній Дунай	Зимово-весняний	$1,47 \pm 0,35$	$1,19 \pm 0,07$	$1,33 \pm 0,15$
Нижній Дунай	Літньо-осінній	$1,23 \pm 0,32$	$1,25 \pm 0,09$	$1,46 \pm 0,19$
Значення наведені як середнє $\pm$ стандартне відхилення				

Методологічні засади побудови таблиці рекомендованих значень k_H .

Розрахунок виконано за такою послідовністю.

По-перше, для кожного водомірного поста, для якого офіційно нормовано НСРР та ВСР за період 1981–2010 рр. (зведена таблиця IV.1.1 щорічників ДК [17]), побудовано лінійне відображення $W \leftrightarrow H$ за двома опорними точками: відмітка нижчого судноплавного рівня (НСРР, RNW) – глибина фарватеру $H_{RNW} = 1,8$ м (стандартна навігаційна конвенція ДК); відмітка вищого судноплавного рівня (ВСР, HSW) – глибина фарватеру $H_{HSW} = 4,5$ м. З двох умов $H_{RNW} = a + b \cdot W_{RNW}$ та $H_{HSW} = a + b \cdot W_{HSW}$ отримуємо систему лінійних рівнянь, розв’язок якої дає (W у см, H у м):

$$b = \frac{H_{HSW} - H_{RNW}}{W_{HSW} - W_{RNW}} = \frac{2,7}{W_{HSW} - W_{RNW}},$$

$$a = H_{RNW} - b \cdot W_{RNW} = 1,8 - b \cdot W_{RNW}.$$

Значення калібрувальних коефіцієнтів a , b за водомірними постами наведені у табл. Є.2.

По-друге, для кожного добового запису з 16-річної бази обчислено відношення H/d при типовій приведеній осадці каравану $d = 2,0$ м (середнє значення для повністю завантажених штовханих складів; меншу осадку 1,5 м у мілководних умовах розглядають окремо). Всього у розрахунку використано 148 113 добових записів за 33 водомірними постами.

По-третє, до отриманої вибірки відношень H/d застосовано дві параметризації функції $k_H \left(\frac{H}{d} \right)$:

– параметризація А [77, 78]: $k_H = 1 + \alpha \cdot \left(\frac{d}{H} \right)^\beta$, з $\alpha = 0,30$, $\beta = 1,5$ (рекомендована для дунайських штовханих складів плоскодонної форми);

– параметризація В [56]: $k_H = 1 + 0,57 \cdot \left(\frac{d}{H} \right)^{1,79}$ (поправка для форм-фактору на мілководді; консервативніша оцінка, відповідає дослідженням з повноформними корпусами).

Сезонний поділ року: «зимово-весняний» – місяці XII–V (грудень–травень); «літньо-осінній» – місяці VI–XI (червень–листопад). Поділ ділянок Дунаю відповідає традиційному поділу за п. 2.1.2: Верхній Дунай (Кельхайм –

Гьонью), Середній Дунай (Гьонью – гідровузли «Залізні ворота»), Нижній Дунай («Залізні ворота» – дельта).

Інтерпретація таблиці рекомендованих значень k_H та зауваження щодо застосування. Аналіз отриманих значень виявляє декілька закономірностей. По-перше, середнє відношення H/d у дунайських умовах експлуатації знаходиться у діапазоні 1,23–1,47, що відповідає типовому режиму обмеженого мілководдя за класифікацією міжнародної гідродинаміки ($H/d < 4$). По-друге, у літньо-осінній сезон відношення H/d систематично нижче, ніж у зимово-весняний, на всіх трьох ділянках Дунаю – внаслідок чого значення k_H зростає на 1–4 % (за обома параметризаціями). Найвиразнішим цей сезонний контраст є для Нижнього Дунаю (1,47 проти 1,23 – різниця ~ 16 %), що узгоджується з його гідрологічним режимом, залежним від карпатсько-балканських приток і характеризується тривалим посушливим періодом у літньо-осінній сезон. По-третє, параметризація B дає систематично вищі значення k_H , ніж параметризація A – у середньому на 0,13–0,15, що відображає більш консервативну оцінку додаткового опору на мілководді. Вибір конкретної параметризації залежить від форми корпусу: для штовхальних складів плоскодонних баржей рекомендована параметризація A ; для одиночних вантажних самохідних суден з повноформним носом – параметризація B .

Зауваження щодо обмежень. Наведені значення є середніми по ділянці і не враховують внутрішньої варіативності між постами однієї ділянки (зокрема, перекатів і вузьких місць русла з характерними локальними значеннями глибини). Для більш точних розрахунків рекомендується користуватися фактичними даними про глибину фарватеру з оперативних повідомлень судноплавства; таблицю слід застосовувати лише за відсутності актуальних даних або при попередньому плануванні рейсу. Стандартні відхилення k_H у таблиці характеризують природну варіативність режиму всередині кожної (ділянка $\times$ сезон) комбінації і можуть використовуватись як вхідні дані для імовірнісної постановки задачі (підрозділ 3.4 дисертації).

Таблиця Є.2 – Калібрувальні коефіцієнти a , b за водомірними постами

Водомірний пост	Ділянка, р. км від гирла	НСРР, см	ВСР, см	a , м	b , м
REGENSBURG	Верхній Дунай, 2376	292	472	-2,5800	0,015000
PFELLING	Верхній Дунай, 2306	290	659	-0,3220	0,007317
HOFKIRCHEN	Верхній Дунай, 2257	207	514	-0,0205	0,008795
ACHLEITEN	Верхній Дунай, 2223	258	510	-0,9643	0,010714
ENGELHARTSZELL	Верхній Дунай, 2201	298	599	-0,8731	0,008970
LINZ	Верхній Дунай, 2135	308	501	-2,5088	0,013990
KIENSTOCK	Верхній Дунай, 2015	164	618	0,8247	0,005947
WIEN	Верхній Дунай, 1941	191	549	0,3595	0,007542
BRATISLAVA	Верхній Дунай, 1869	130	600	1,0532	0,005745
ESZTERGOM	Середній Дунай, 1719	59	503	1,4412	0,006081
BUDAPEST	Середній Дунай, 1646	102	600	1,2470	0,005422
DUNAÚJVÁROS	Середній Дунай, 1581	-20	466	1,9111	0,005556
BAJA	Середній Дунай, 1479	126	765	1,2676	0,004225
BEZDAN	Середній Дунай, 1426	-10	602	1,8441	0,004412
APATIN	Середній Дунай, 1402	47	674	1,5976	0,004306
BOGOJEVO	Середній Дунай, 1367	11	596	1,7492	0,004615
VUKOVAR	Середній Дунай, 1333	17	544	1,7129	0,005123
NOVI SAD	Середній Дунай, 1255	57	573	1,5017	0,005233
SLANKAMEN	Середній Дунай, 1216	117	623	1,1757	0,005336
ZEMUN	Середній Дунай, 1173	213	632	0,4274	0,006444

PANCEVO	Середній Дунай, 1155	252	622	-0,0389	0,007297
SMEDEREVO	Середній Дунай, 1116	439	680	-3,1183	0,011203
NOVO SELO	Нижній Дунай, 834	95	787	1,4293	0,003902
CALAFAT	Нижній Дунай, 795	27	686	1,6894	0,004097
LOM	Нижній Дунай, 743	142	853	1,2608	0,003797
ORIAHOVO	Нижній Дунай, 678	52	734	1,5941	0,003959
CORABIA	Нижній Дунай, 630	18	640	1,7219	0,004341
SVISTOV	Нижній Дунай, 554	68	770	1,5385	0,003846
SILISTRA	Нижній Дунай, 376	86	743	1,4466	0,004110
RENI	Нижній Дунай, 127	68	524	1,3974	0,005921
ISACCEA	Нижній Дунай, 104	72	478	1,3212	0,006650
TULCEA	Нижній Дунай, 71	57	398	1,3487	0,007918
VILKOVO	Нижній Дунай, 18	68	152	-0,3857	0,032143

Застосування. Довідкові значення з табл. Є.1 застосовуються у Правилі 3 підпункту 4.2.4 (як альтернатива при відсутності фактичних гідрологічних даних) та в підрозділі 4.4 (як вбудована довідкова база програмної реалізації способу). Калібрувальні коефіцієнти a , b з табл. Є.2 призначені для перерахунку фактичних рівнів води W (см) у глибину фарватеру H (м) для кожного конкретного водомірного поста за формулою $H = a + b \cdot W$.

Кліматологічні середні значення k_H для відомих значень співвідношення H/d (для референтної осадки $d = 2,0$ м) наведені у табл. Є.3.

Таблиця Є.3 – Значення гідрологічного множника k_H за параметризаціями А і В для діапазону відносних глибин H/d (референтна осадка $d = 2,0$ м)

H/d	Режим мілководдя	k_H (А)	k_H (В)	$k_H(B) - k_H(A)$
4,00	глибока вода	1,038	1,048	0,010
3,75	помірне мілководдя	1,041	1,054	0,013
3,50	помірне мілководдя	1,046	1,061	0,015
3,25	помірне мілководдя	1,051	1,069	0,018
3,00	помірне мілководдя	1,058	1,080	0,022
2,75	помірне мілководдя	1,066	1,093	0,027
2,50	помірне мілководдя	1,076	1,111	0,035
2,25	помірне мілководдя	1,089	1,133	0,044
2,00	помірне мілководдя	1,106	1,165	0,059
1,75	виражене мілководдя	1,130	1,209	0,079
1,50	виражене мілководдя	1,163	1,276	0,113
1,25	виражене мілководдя	1,215	1,382	0,167
1,10	критичне (навіг. обмежене)	1,260	1,481	0,221

Табл. Є.3 є доповненням для довідкової табл. Є.1, що дає значення k_H за кліматологічними середніми для ділянок і сезонів. Значення для $H/d < 1,2$ є екстраполяцією у приграничну зону посадки на ґрунт: реальний приріст опору може перевищувати наведений, а судноплавство на таких глибинах зазвичай обмежене, тому ці значення слід застосовувати лише як орієнтовну консервативну оцінку. Параметризація А рекомендована для плоскодонних штовханих складів, параметризація В (поправка *Raven*) – для повноформних одиночних суден. На рис. Є.1 наведено графіки кривих $k_H = f(H/d)$ для обох параметризацій. У всьому діапазоні $1,1 \leq H/d \leq 4$ крива В лежить вище А, тобто дає консервативнішу (більшу) оцінку додаткового опору на мілководді (рис. Є.1).

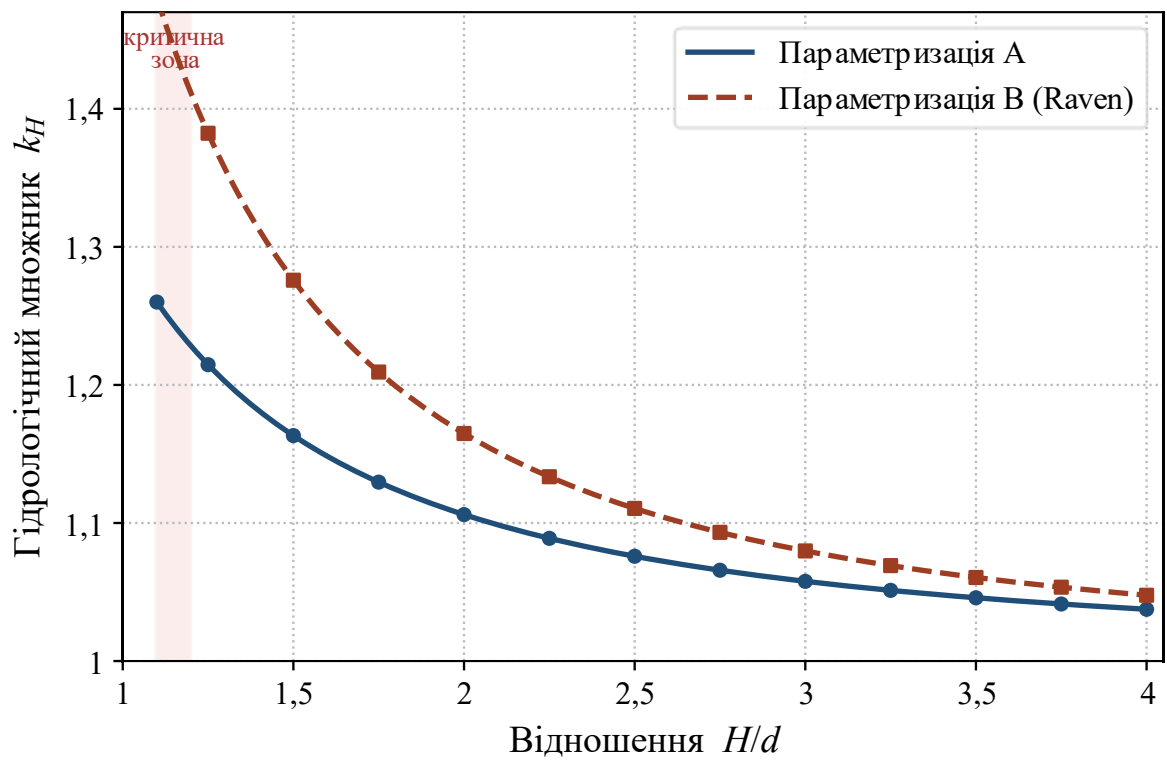


Рисунок Є.1 – Залежність гідрологічного множника k_H від відносної глибини H/d за параметризаціями А і В

Таблиця Є.4 – Гідрологічний множник для ділянок прикладу апробації (п. 5.1.2, $d = 2,0$ м)

Ділянка	H , м	H/d	k_H (А)	k_H (В)
Δ1	6,5	3,25	1,051	1,069
Δ2	4,5	2,25	1,089	1,133
Δ3	3,2	1,60	1,148	1,246
Δ4	3,8	1,90	1,115	1,181
Δ5	3,5	1,75	1,130	1,209

АЛГОРИТМИ ОБГРУНТУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РІШЕНЬ

У додатку Ж наведені узагальнені схемні подання трьох алгоритмів обґрунтування експлуатаційних рішень, розроблених у підрозділі 4.3. Рисунки Ж.1–Ж.3 відображають, відповідно, алгоритм ретроспективного аналізу та корекції політики експлуатації (п. 4.3.4), алгоритм проспективного планування рейсу (п. 4.3.5) та алгоритм оперативної корекції рішень у ході рейсу (п. 4.3.6). Схеми виконують довідкову функцію та можуть використовуватися як візуальний алгоритмічний опис запропонованого способу управління енергоефективністю рейсів суден з караванами.

Алгоритм ретроспективного аналізу та корекції політики експлуатації (п. 4.3.4)

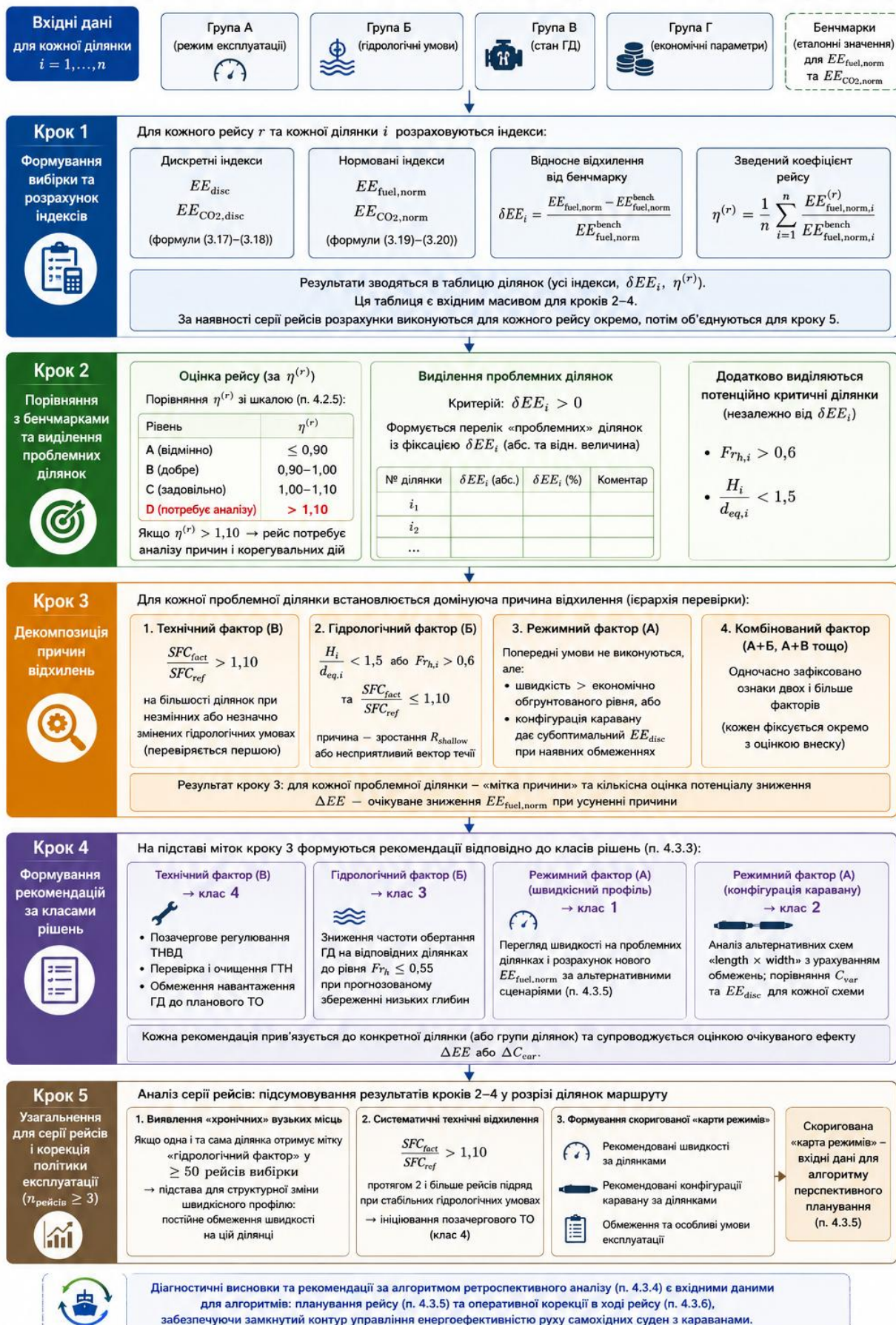


Рисунок Ж.1 – Алгоритм ретроспективного аналізу

Алгоритм підтримки рішень при плануванні рейсу (п. 4.3.5)

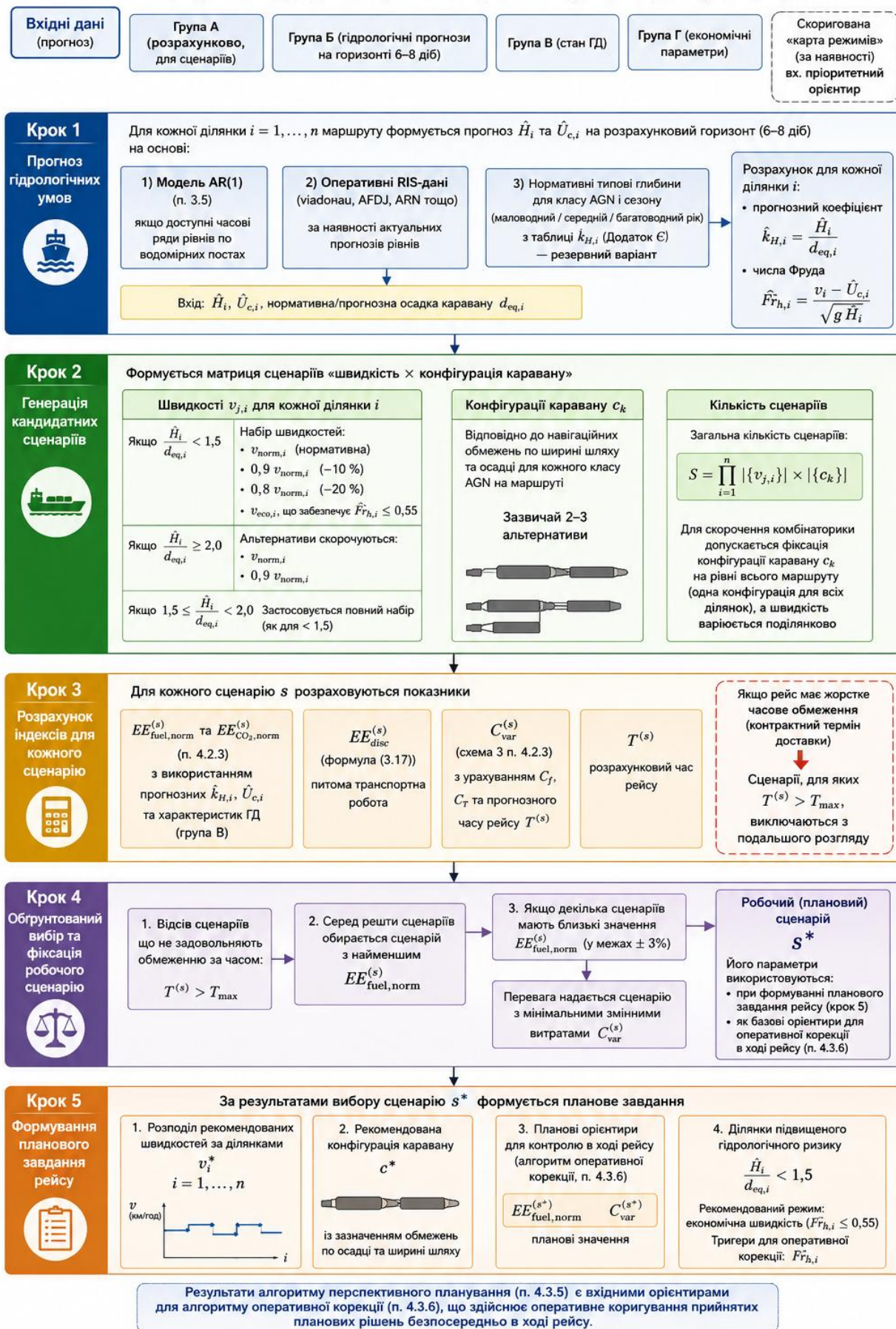


Рисунок Ж.2 – Алгоритм перспективного аналізу

4.3.6 Алгоритм оперативної корекції в ході рейсу

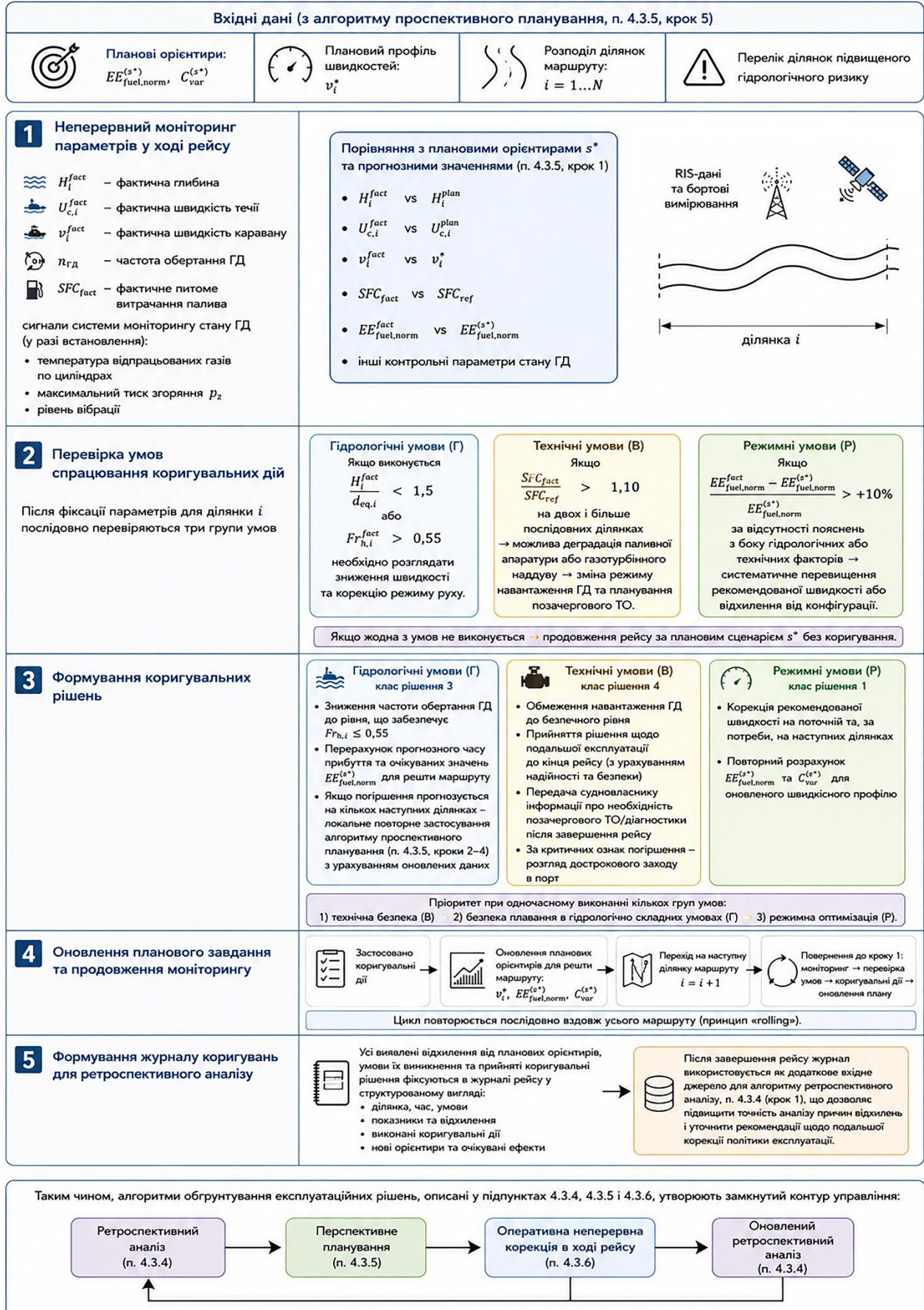


Рисунок Ж.3 – Алгоритм оперативної корекції рішень у ході рейсу

ІНТЕРФЕЙС ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ СПОСОБУ ОЦІНКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Вхідні дані рейсу																
2	Як користуватись: 1) Заповніть жовті клітинки заголовка (ідентифікатор, маса вантажу M_{total} , осадку d , ціну палива, SFC_{ref} , EE_{ref} , параметризацію k_H , СПРАВА — тип самохідного судна, власний вантаж m_{ship} для типу «Вантажне», кількість барж N_{barges}). 2) У таблиці нижче заповніть сегменти рейсу: довжину, тривалість, оберти, FC , масу вантажу, глибину, ділянку Дунаю, сезон. У колонках O і P оберіть тип руху і конфігурацію. Для типу «Проводка» вводьте FC за один прохід штовхача з 1 баржею — інструмент сам помножить на $(2N-1)$. 3) Якщо рейс баластний ($M_{total} = 0$, всі $m_i = 0$), EE -показники не визначаються; на «Результатах» з'явиться окремий Блок 4 з діагностикою стану ГД (SFC_{act} , Клас 4). 4) Перевірте «Результати»; для фіксації рейсу в журналі — скопіюйте рядок 17 «Журналу рейсів» як значення.																
3																	
4																	
5	Параметри рейсу																
6	Ідентифікатор рейсу (дата, судно, маршрут): Механік Сінілов, Ізмаїл - 61 миля							Тип самохідного судна:		Вантажне							
7	Дата рейсу: 2018-03-22							Власний вантаж m_{ship} т:		1 500							
8	Кількість сегментів n:							Кількість барж у каравані N_{barges} :		5							
9	Загальна маса вантажу каравану M_{total} т:							9 970,0									
10	Осадка каравану d , м:							1,80									
11	Ціна палива C_p , грн/т (необов'язково):							30 000,00									
12	Опорна питома витрата SFC_{ref} , г/(кВт·год) (необов'язково):							220,0									
13	Опорна енергоефективність EE_{ref} , кг/(т·км) (необов'язково):							0,0020									
14	Параметризація k_H (A або B):							A									
15	Таблиця сегментів рейсу																
16	№	Назва ділянки	Довжина D_i , км	Тривалість t_i , год	Оберти ГД n , об/хв	Витрата палива FC_i , кг	Маса вантажу m_i , т	Глибина H_i , м (опц.)	Швидкість течії U_c , км/год (опц.)	Ділянка Дунаю	Сезон	Факт. k_H (опц.)	Інд. потужн. N_i , кВт (опц.)	Коментар	Тип руху	Конфігурація каравану	
17	1	97–101 км (поз. 1)	3,80	1,00	645	71,72	9 970,00	19,00	5,80	Нижній Дунай	Зимово-весняний		276,8	Ст. Ізмаїл	Сталий	3:2	
18	2	103–107 км (поз. 2)	3,20	1,00	645	71,72	9 970,00	15,00	5,50	Нижній Дунай	Зимово-весняний			Ст. Ізмаїл	Сталий	Оберіть зі списку конфігурацію формат M:N, що означає M рядів барж у поперечному напрямку та N рядів барж у подовжньому напрямку (за рухом каравану); наприклад, 2:3 – два ряди в ширину і три в довжину, тобто 6 барж)	
19	3	112–113 км (поз. 3)	2,05	0,50	680	41,35	9 970,00	11,00	6,50	Нижній Дунай	Зимово-весняний		239,6	Ст. Ізмаїл; FC у пропорції до часу	Сталий		
20	4	114 км – 44,4 миля (поз. 4)	4,10	1,00	700	92,82	9 970,00	18,50	5,50	Нижній Дунай	Зимово-весняний		386,2	Перехід до ст. Рені	Сталий		
21	5	46–48 миля (поз. 5)	3,90	1,00	700	93,66	9 970,00	14,00	4,60	Нижній Дунай	Зимово-весняний		474,1	Ст. Рені	Сталий		3:2
22	6	48–50,3 миля (поз. 6)	3,40	1,00	700	92,82	9 970,00	21,00	4,70	Нижній Дунай	Зимово-весняний		428,3	Ст. Рені	Сталий	3:2	
23	7	52–54,2 миля (поз. 7)	4,80	1,00	700	92,82	9 970,00	11,50	4,90	Нижній Дунай	Зимово-весняний		441,7	Ст. Рені	Сталий	3:2	
24																	

Вхідні дані рейсу
Довідкові k_H
Розрахунки
Результати
Графіки
Журнал рейсів
Графіки журналу
Порівняння рейсів
Буфер сегментів
Архів сегментів

Рисунок 3.1 – Аркуш «Вхідні дані рейсу» (приклад для рейсу УДП Р 1)

1	A	B	C	D	E	F	G
2	Результати оцінки енергоефективності рейсу						
3	Рейс: Zaporozhye, Ізмаїл - Смедерево, УДП Р 8						
4	Блок 1. Числові показники енергоефективності						
5	Показник	Формула			Значення	Од. виміру	
6	EE _{diac}	ΣFC / ΣW			0,0022	кг палива / (т·км)	
7	EE _{CO2, diac}	ΣCO ₂ / ΣW			0,0087	кг CO ₂ / (т·км)	
8	EE _{fuel, norm}	ΣFC / Σ(W·k _H)			0,0018	кг палива / (т·км)	
9	EE _{CO2, norm}	ΣCO ₂ / Σ(W·k _H)			0,0057	кг CO ₂ / (т·км)	
10	C _{var}	EE _{fuel, norm} · C _F / 1000			0,0545	грн / (т·км)	
11	Загальна відстань Σ D	сума D _i			1 019,0	км	
12	Загальний час Σ t	сума t _i			97,5	год	
13	Загальна витрата Σ FC	сума FC _i			4 895,2	кг	
14	Загальні викиди Σ CO ₂	сума CO _{2i}			15,244	т	
15							
16							
17	Блок 2. Оцінка ефективності за критерієм η = EE _{fuel, norm} / EE _{ref}						
18	Значення η:	0,909			Прийнятна (близько до базової лінії)		
19							
20	Шкала:	η ≤ 0,90 — висока ефективність	0,90 < η ≤ 1,10 — прийнятна	1,10 < η ≤ 1,30 — задовільна з резервами	η > 1,30 — неефективний		
21							
22	Порівняння з іншим рейсом за δEE _{fuel, norm}						
23	Рейс А (базис):				EE _{fuel, norm} (А):		
24	Рейс В (порівнюваний):				EE _{fuel, norm} (В):		
25	Рейсів у журналі:	8					
26	δEE _{fuel, norm} , %:	Вибірть два рейси з журналу			Інтерпретація:	—	
27							
28	Блок 3. Діагностика сегментів і рекомендації						
29	Найкращий сегмент:	№ 4—Оряхово - 700 (675 - 700 р. км) (η = 0,857)					
30	Найгірший сегмент:	№ 1—Ізмаїл - Рені (97 - 127 р. км) (η = 0,953)					
31							
32	Активні класи рішень:						
33	Клас 1: не активований						
34	Клас 3: не активований						
35	Клас 4: не активований						
36							
37	Примітка: тригер Класу 3 використовує фактичну осадку d, введenu у заголовку рейсу. Для баластних рейсів (M _{ball} = 0, всі t _i = 0; Σ W = 0) Класи 1, 2 і 3 не активуються, оскільки η та EE _{norm} не визначені. Активним лишається лише Клас 4 (SFC _{act}), що дозволяє діагностувати стан ГД на основі питомої витрати палива.						
38							
39	Блок 4. Діагностика баластного рейсу						
40	Активний лише для рейсів без транспортної роботи (M _{ball} = 0, всі t _i = 0). EE-показники не визначені; оцінка обмежена діагностикою стану ГД.						
41	Середньозважений SFC _{act} , г/(кВт·год):	—					
42	δ _{SFC} = SFC _{act} / SFC _{ref} :	—					
43	Активний клас:	—					
44	Σ FC, кг:	—					
45	Σ CO ₂ , т:	—					
46							
47							
48							
49							
50							
51							
		Вхідні дані рейсу	Довідкові k _H	Розрахунки	Результати	Графіки	Журнал

Рисунок 3.2 – Аркуш «Результати» для типового рейсу УДП Р 8 «Zaporozhye»

1	A	B	C	D	E	F	G	H
2	Результати оцінки енергоефективності рейсу							
3	Рейс: Знаменка, Ізмаїл - Смедерево, УДП Р 5							
4	Блок 1. Числові показники енергоефективності							
5	Показник	Формула			Значення	Од. виміру		
6	EE _{diac}	SFC / ΣW			0,0063	кг палива / (т·км)		
7	EE _{CO2, diac}	ΣCO ₂ / ΣW			0,0195	кг CO ₂ / (т·км)		
8	EE _{fuel, norm}	SFC / Σ(W·k _H)			0,0051	кг палива / (т·км)		
9	EE _{CO2, norm}	ΣCO ₂ / Σ(W·k _H)			0,0160	кг CO ₂ / (т·км)		
10	C _{var}	EE _{fuel, norm} · C _F / 1000			0,1542	грн / (т·км)		
11	Загальна відстань Σ D	сума D _i			1 019,0	км		
12	Загальний час Σ t	сума t _i			97,5	год		
13	Загальна витрата Σ FC	сума FC _i			36 807,6	кг		
14	Загальні викиди Σ CO ₂	сума CO _{2i}			114,619	т		
15								
16								
17	Блок 2. Оцінка ефективності за критерієм η = EE _{fuel, norm} / EE _{ref}							
18	Значення η:	2,569			Неефективний — потрібен аналіз сегментів			
19								
20	Шкала:	η ≤ 0,90 — висока ефективність	0,90 < η ≤ 1,10 — прийнятна	1,10 < η ≤ 1,30 — задовільна з резервами	η > 1,30 — неефективний			
21								
22	Порівняння з іншим рейсом за δEE _{fuel, norm}							
23	Рейс А (база):	УДП Р 1			EE _{fuel, norm} (А):	0,0069		
24	Рейс В (порівнюваний):	УДП Р 2			EE _{fuel, norm} (В):	0,0068		
25	Рейсів у журналі:	2						
26	δEE _{fuel, norm} , %:	-1,5			Інтерпретація:	Несуттєва різниця		
27								
28	Блок 3. Діагностика сегментів і рекомендації							
29	Найкращий сегмент:	№ 9—Залізні ворота 1 - Смедерево (942 - 1116 р. км) (η = 0,038)						
30	Найгірший сегмент:	№ 5—700 - Залізні ворота 2 (700 - 863 р. км) (η = 10,405)						
31								
32	Активні класи рішень:							
33	Клас 1: не активований							
34	Клас 3 (мала глибина): виявлено 1 сегментів з H/d < 1,5							
35	Клас 4: не активований							
36								
37	Примітка: тригер Класу 3 використовує фактичну осадку d, введено у заголовку рейсу. Для баластних рейсів (M _{ball} = 0, всі m _i = 0; Σ W = 0) Класи 1, 2 і 3 не активуються, оскільки η та EE _{norm} не визначені. Активним лишається лише Клас 4 (SFC _{act}), що дозволяє діагностувати стан ГД на основі питомої витрати палива.							
38								
39	Блок 4. Діагностика баластного рейсу							
40	Активний лише для рейсів без транспортної роботи (M _{ball} = 0, всі m _i = 0). EE-показники не визначені; оцінка обмежена діагностикою стану ГД.							
41	Середньозважений SFC _{act} , г/(кВт·год):	—						
42	δ _{SFC} = SFC _{act} / SFC _{ref} :	—						
43	Активний клас:	—						
44	Σ FC, кг:	—						
45	Σ CO ₂ , т:	—						
46								
47								
48								
49								
50								
51								
		Вхідні дані рейсу		Довідкові k _H		Розрахунки		Результати
						Графіки		Журнал

Рисунок 3.3 – Аркуш «Результати» для типового рейсу УДП Р 5 «Знаменка»

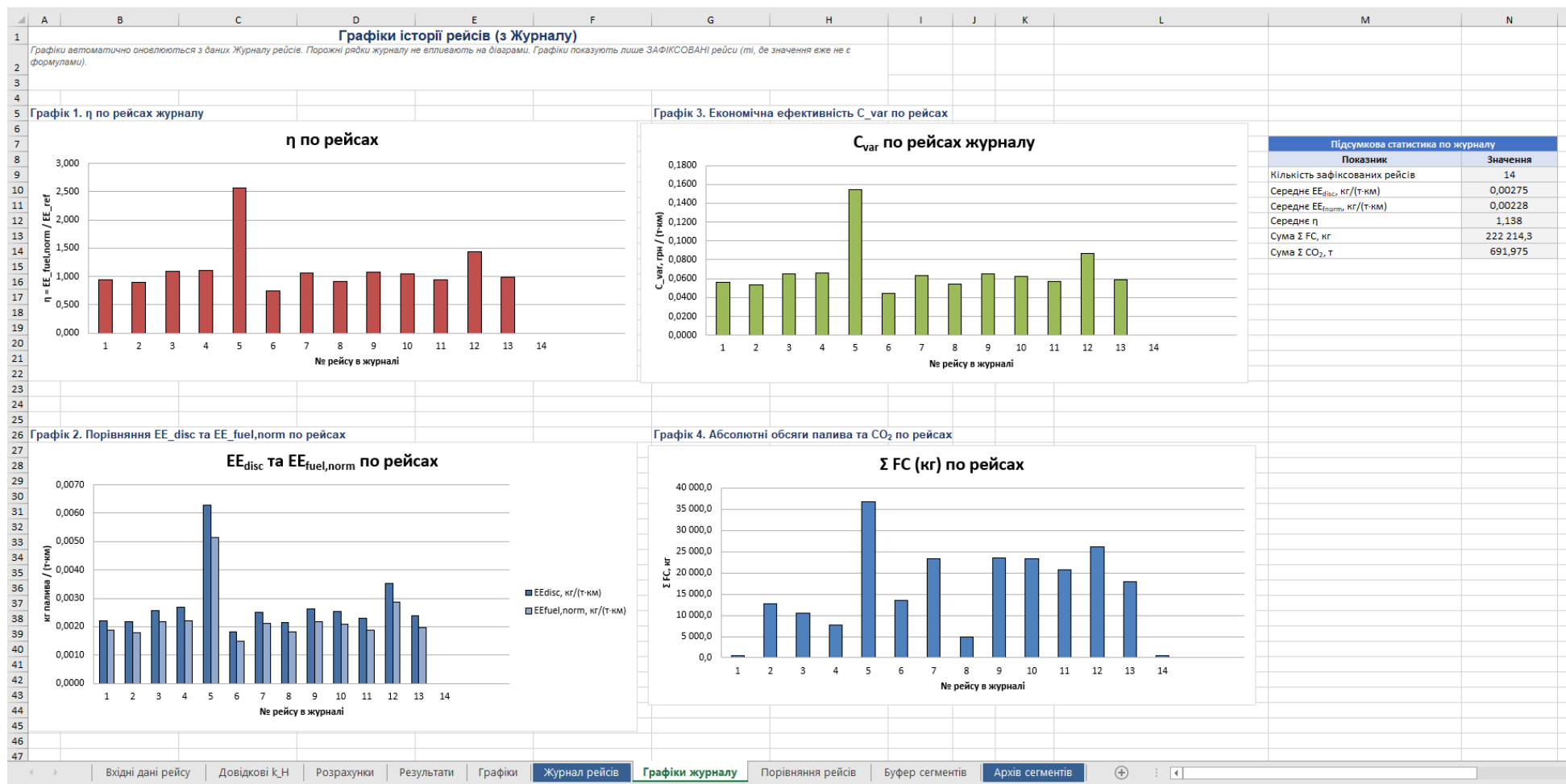


Рисунок 3.4 – Аркуш «Графіки журналу» зі зведеними діаграмами масиву апробації

ДОДАТОК І

ВИХІДНІ ДАНІ ТА РОЗРАХУНОК ДЛЯ ПАСАЖИРСЬКОГО СУДНА

	A	B	C	D	E
1	Константи та критерії оцінки				
2					
3	ФІЗИЧНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ КОНСТАНТИ				
4	Густина дизельного палива	0,84	кг/л		
5	Пасажиромісткість (повна)	152	пас.		
6	Пасажиромісткість (фактична)	145	пас.		
7	CO ₂ від згоряння (TtW)	3,114	кг CO ₂ /кг		
8	Коефіцієнт WtW/TtW (судновий дизель)	1,270	—	умовне значення (узгоджено з §5.4.2)	
9	Еталонна SFC	190	г/(кВт·год)		
10	Номінальна потужність 1 ГД	783	кВт		
11	Осадка судна d	1,50	м		
12	Прискорення g	9,81	м/с ²		
13					
14	КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ (порогові значення)				
15	δSFC, поріг ТО (клас 4)	1,10	—	позачергове ТО при δSFC > 1,10	
16	F _{гн} , поріг класу 1	0,60	—	швидкісний профіль	
17	F _{гн} , поріг класу 3	0,55	—	економічний хід	
18	H/d, поріг класу 3	1,50	—	мілководдя	
19	η(t), поріг класу 1	1,10	—	відносна ефективність рейсу	
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					

Рисунок І.1 – Аркуш аркуш констант і критеріїв оцінки

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
1	Дані сегментів m/v Lisabelle																							
2	№	Дата	Час	Хід	Район / км	Водомірний пост	W _{posts} см	HCPP _{posts} см	H _{rec,posts} м	H _{i,echo} м	H _{i,posts} м	V _{g,echo} км/год	V _{g,ais} км/год	FC _{ME1} л/год	RPM _{ME1}	LOAD _{ME1} %	FC _{ME2} л/год	RPM _{ME2}	LOAD _{ME2} %	V _{g,cales} км/год	H _{i,cales} м	U _{es} км/год	H/d	k _H
3	1	04.05.2026		уверх	Пассау (підхід)	Passau Donau	513	415	2,9		3,880			147	1450	83	37	975	30	17,00	3,88	3,5	2,587	1,073
4	2	04.05.2026		уверх	Пассау (підхід)	Passau Donau	510	415	2,9		3,850			18	726	10	127	1381	73	17,00	3,85	3,5	2,567	1,073
5	3	05.05.2026		униз	Надьмарош, 1702	Nagymaros	147	4	2,5		3,930			59	1104	34	0	0	0	18,52	3,93	1,5	2,620	1,071
6	4	05.06.2026		уверх	2079, Відень–Пассау	Linz	378	308	2,5		3,200			46	985	48	125	1356	72	10,19	3,20	4,8	2,133	1,097
7	5	05.06.2026		уверх	2080, Відень–Пассау	Linz	379	308	2,5		3,210			72	1196	30	72	1196	30	13,70	3,21	1,3	2,140	1,096
8	6	07.06.2026	19:56	вниз	2106, Au an der Donau	Kienstock	217	164	2,5		3,030		22,41	125	1411	71	125	1411	71	22,41	3,03	3,5	2,020	1,104
9	7	07.06.2026	20:27	вниз	2102, Au an der Donau	Kienstock	216	164	2,5	7,30	3,020	13,90		125	1411	71	125	1411	71	13,90	7,30	1	4,867	1,000
10	8	08.06.2026	06:02	вниз	1945, Корнойбург	Корнойбург	228	191	2,5	3,40	2,870	21,90	21,67	125	1397	70	104	1438	59	21,67	3,40	3	2,267	1,088
11																								
12																								
13																								
14																								
15																								
16																								
17																								
18																								
19																								
20																								
21																								
22																								
23																								
24																								
25																								
26																								
		Константи		Дані	Індекси	Критерії, класи																		

Рисунок І.2 – Аркуш вихідних даних по сегментах

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	Індекси енергоефективності та діагностика ГД (формули)																	
2	№	FC_{lh}, л/год	FC_h, кг/год	FC_{km}, кг/км	CO₂ на судно-км, кгCO₂/км	EE_{рах} (152), г пал/(пас·км)	EE_{рах} (145), г пал/(пас·км)	EE_{норм}, г пал/(пас·км)	EE_{рах,CO₂} TtW, гCO₂/(пас·км)	EE_{рах,CO₂e} WtW, гCO₂/(пас·км)	P_{ME1}, кВт	SFC_{ME1}, г/(кВт·год)	δSFC_{ME1}	P_{ME2}, кВт	SFC_{ME2}, г/(кВт·год)	δSFC_{ME2}	Fr_h	
3	1	184	154,6	9,092	28,312	59,8	62,7	55,7	186,3	236,6	650	190,0	1,000	235	132,3	0,696	0,765	
4	2	145	121,8	7,165	22,311	47,1	49,4	43,9	146,8	186,4	78	193,1	1,016	572	186,6	0,982	0,768	
5	3	118	99,1	5,352	16,666	35,2	36,9	32,9	109,6	139,3	266	186,2	0,980	462	107,3	0,565	0,829	
6	4	171	143,6	14,096	43,895	92,7	97,2	84,5	288,8	366,8	376	102,8	0,541	564	186,2	0,980	0,505	
7	5	144	121,0	8,829	27,494	58,1	60,9	53,0	180,9	229,7	235	257,5	1,355	235	257,5	1,355	0,678	
8	6	250	210,0	9,371	29,181	61,7	64,6	55,8	192,0	243,8	556	188,9	0,994	556	188,9	0,994	1,142	
9	7	250	210,0	15,108	47,046	99,4	104,2	99,4	309,5	393,1	556	188,9	0,994	556	188,9	0,994	0,456	
10	8	229	192,4	8,877	27,642	58,4	61,2	53,7	181,9	231,0	548	191,6	1,008	462	189,1	0,995	1,042	
11	МІН					35,2				139,3								
12	МАКС					99,4				393,1								
13																		
14	<i>EE_{рах} — титова витрата палива на пас·км; EE_{норм} = EE_{рах}/k_H; CO₂e WtW = EE_{рах}×3,114×1,27. SFC = FC×згустина×1000/P; P = LOAD%×783. Fr_h = (v_{g,calc}/3,6)/√(g·H_{i,calc}).</i>																	
15																		
16																		
17																		
18																		
19																		
20																		
21																		
22																		
23																		
24																		

Рисунок І.3 – Аркуш розрахованих індексів енергоефективності та діагностики головних двигунів

	A	B	C	D	E	F
1	Критерії оцінки та класи експлуатаційних рішень					
2						
3	КЛАСИ РІШЕНЬ					
4	Клас	Назва	Тригер	Дія	Застосовність (пас. судно)	
5	1	Швидкісний профіль	$\eta(r) > 1,10$ або $Fr_h > 0,60$	Зниження швидкості (eco-speed)	Так	
6	2	Конфігурація каравану	EE_{disc} , C_{var} ; уникнення проводок	Добір складу/завантаження барж	Ні (одиначне судно)	
7	3	Економний хід	$H/d < 1,50$ або $Fr_h > 0,55$	Перехід на економічну швидкість	Так	
8	4	ТО / корекція ГД	$\delta SFC > 1,10$ (2+ сегменти підряд)	Позачергове ТО паливної апаратури	Так	
9						
10						
11	ПОСЕГМЕНТНІ ПРАПОРЦІ РІШЕНЬ					
12	№	δSFC_{max}	Fr_h	H/d	клас	
13	1	1,000	0,765	2,587	Клас 1 (швидкість)	
14	2	1,016	0,768	2,567	Клас 1 (швидкість)	
15	3	0,980	0,829	2,620	Клас 1 (швидкість)	
16	4	0,980	0,505	2,133	—	
17	5	1,355	0,678	2,140	Клас 4 (ТО)	
18	6	0,994	1,142	2,020	Клас 1 (швидкість)	
19	7	0,994	0,456	4,867	—	
20	8	1,008	1,042	2,267	Клас 1 (швидкість)	
21						
22	<i>δSFC_{max} — максимум по двох ГД у сегменті; критерій класу 4 спрацьовує при стійкому перевищенні 1,10 (2+ сегменти підряд).</i>					
23	<i>Клас 2 (конфігурація каравану) до одиночного пасажирського судна не застосовний; $\eta(r)$ для класу 1 розраховується на рівні рейсу і тут не оцінюється посегментно.</i>					
24	<i>Усі пороги — на аркуші «Константи» (B15:B19); зміна порогу автоматично оновлює прапорці.</i>					
25						
26						
27						
28						

Рисунок І.4 – Аркуш критеріїв та класів експлуатаційних рішень з посегментними прапорцями