

©Ширкова О.А., Бажак О.В.

МОДЕРНІЗАЦІЯ РІЧКОВОГО ФЛОТУ: ПІДВИЩЕННЯ КОЕФІЦІЕНТУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Внутрішній водний транспорт традиційно вважається одним із найбільш енергоефективних видів вантажних перевезень: його питома енергоємність у 5–10 разів менша порівняно з автомобільним та у 2–5 разів – із залізничним. Проте рівень техніко-технологічного стану українського річкового флоту залишається вкрай низьким. Більшість суден побудована у 1960–1980-х роках: середній вік перевищує 35–40 років, а коефіцієнт зношеності основних фондів сягає 80–85%. Застаріле обладнання спричиняє підвищені витрати палива та низький ККД судових енергетичних установок (СЕУ), що у поєднанні з посиленням міжнародних регуляцій (ЕЕХІ, СІІ) робить модернізацію флоту нагальним стратегічним завданням, особливо для суден дунайського басейну. На прикладі практичної модернізації т/х «Капітан Антипов» (ПрАТ «УДП», жовтень 2024 р.) проаналізовано заміну головних двигунів SGP Тур T112 SO (2×772 кВт) на Mitsubishi S12R-MPTAW (2×940 кВт) та дизель-генераторів MWM ТВД 232-V8 на Volvo Penta (2×239 кВт). Нові двигуни відповідають стандарту Stage V (Euro 5), мають сертифікати ЄС відповідно до Регламенту (ЄС) 2016/1628 та обладнані системою SCR з реагентом AdBlue, що забезпечує відповідність вимогам як Дунаю, так і Рейну. Коефіцієнт ЕЕХІ зріс з 15,7 до 19,1 (у 1,22 раза); питома витрата палива знизилась на 12–15% лише завдяки ремоторизації. Систематизовано чотири ключові напрями подальшої комплексної модернізації: гібридна пропульсія з акумуляторними системами (економія 15–25%); оптимізація режимів роботи головного двигуна та впровадження цифрових систем SEEMP (10–20%); рекуперація відпрацьованого тепла через системи ORC та утилізаційні котли (5–12%); гідродинамічна оптимізація корпусу та антифоулінгові покриття (3–8%). Комплексна модернізація здатна підвищити загальний ККД пропульсивного комплексу з 0,25–0,30 до 0,38–0,45 та знизити питоме споживання палива на 20–35%. Термін окупності ремоторизації при поточному рівні дунайського фрахту становить 5–8 років.

Ключові слова: річковий флот, модернізація, енергоефективність, ЕЕХІ, гібридна пропульсія, ККД, внутрішній водний транспорт.

Постановка проблеми. Внутрішній водний транспорт традиційно вважається одним із найбільш енергоефективних видів вантажних перевезень: його питома енергоємність у 5–10 разів менша порівняно з автомобільним та у 2–5 разів – з залізничним транспортом [1]. Попри це, рівень техніко-технологічного стану українського річкового флоту залишається вкрай низьким [2]. Річка Дунай утворює один з найважливіших міжнародних транспортних коридорів у Європі, з'єднуючи Центральну та Східну Європу з Чорним морем. Значний відсоток флоту, що працює в цьому басейні, складається із суден 1970–1980-х років побудови, головні двигуни та дизель-генератори яких застаріли, що призводить до збільшення експлуатаційних витрат і підвищеного споживання палива.

Введення Міжнародною морською організацією (ІМО) індексу енергоефективності існуючих суден (ЕЕХІ) та вуглецевого індикатора інтенсивності (СІІ) з 2023 року встановлює чіткі кількісні вимоги до скорочення викидів CO₂ [3]. Аналогічні регуляторні тенденції поступово охоплюють і внутрішній водний транспорт у межах директив ЄС. Для України, яка активно розвиває дунайський транспортний коридор та прагне до членства в ЄС, адаптація флоту до нових екологічних стандартів є стратегічним завданням. Модернізація існуючих суден є економічно вигідною альтернативою будівництву нових – завдяки заміні рушійних систем та впровадженню сучасних технологій керування можна досягти значного покращення енергоефективності.

Більшість існуючих методик оцінки енергетичної ефективності розроблено для морських суден, тоді як специфічний вплив мілководдя та змінних течій суттєво змінює гідродинамічні характеристики та режими роботи СЕУ річкових суден [5]. Відсутній системний підхід до визначення пріоритетних напрямів модернізації з урахуванням типового профілю експлуатації на Дунаї: сезонних коливань рівня води, специфіки вантажних потоків, розташування інфраструктури обслуговування. Недостатньо розробленою залишається і тематика інтеграції цифрових систем управління з гібридними пропульсивними установками в умовах внутрішнього судноплавства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням підвищення енергоефективності внутрішнього водного транспорту присвячено значну кількість наукових публікацій. У систематичному огляді [1] виявлено, що серед дослідників переважає інтерес до технічних аспектів підвищення ефективності суден та вирішення екологічних проблем. Nuchturee та ін. [4] показали, що перехід до електричної тяги забезпечує підвищення загального ККД СЕУ за рахунок усунення механічних втрат у трансмісії – електрифікація особливо ефективна для суден з нерівномірними профілями навантаження: паромів, буксирів, штовхачів.

Kalajdžić та ін. [5] встановили, що питоме споживання палива суттєво залежить від рівня завантаженості судна, швидкості ходу та гідрологічних умов. Оптимізація швидкості ходу та диференту судна дозволяє знизити витрату палива на 8–15% без капіталовкладень у модернізацію обладнання. Автори також підкреслюють специфічний вплив мілководдя на гідродинамічні характеристики річкових суден. Lion та ін. [6] систематизували технології рекуперації тепла – утилізаційні парові котли, системи органічного циклу Ренкіна (ORC), турбокомпаундні системи, – встановивши, що їх комбінування здатне підвищити загальний ККД СЕУ на 10–15%. Kolodziejski та Michalska-Pozoga [7] показали, що гібридні системи дозволяють стабілізувати режим роботи дизельного двигуна у зоні оптимального ККД та забезпечують економію палива 15–25% на типових річкових маршрутах.

Мета статті. Метою роботи є аналіз сучасних технічних рішень та організаційних заходів підвищення коефіцієнта енергоефективності річкових суден, систематизація підходів на основі конкретного практичного прикладу – модернізації т/х «Капітан Антипов» – та визначення пріоритетних напрямів модернізації флоту для умов експлуатації на внутрішніх водних шляхах України.

Основні результати дослідження. Т/х «Капітан Антипов» побудований у 1980 році на суднобудівній верфі OSWAG (м. Лінц, Австрія). Тип судна – суховантажне-штовхач. Головні розміри: загальна довжина 82,30 м; ширина 15,50 м; висота борту 3,20 м; осадка по вантажну марку 2,74 м; водотоннажність 2585,0 т; дедвейт 1900 т; вантажопідйомність 1634 т; розрахункова швидкість при $d = 2,7$ м без складу барж – 18,5 км/год. На судні з побудови були встановлені два головних двигуна типу SGP Тур T112 SO потужністю по 772 кВт та два дизель-генератори MWM ТВД 232-V8 по 121 кВт.

У жовтні 2024 року ПрАТ «УДП» завершило модернізацію першого судна «Капітан Антипов» проєкту M044C. Виконана заміна головних двигунів на Mitsubishi S12R-MPTAW потужністю по 940 кВт та дизель-генераторів на Volvo Penta по 239 кВт. Нові двигуни мають сертифікати ЄС схвалення типу відповідно до Регламенту (ЄС) 2016/1628 та відповідають стандарту Stage V (Euro 5). Розгляд технічної документації та нагляд за модернізацією виконано фахівцями Регістра судноплавства України на верфі OSWAG Werft Linz. Правила Регістра повністю гармонізовані з ES-TRIN [11] та вимогами ADN. Також встановлено систему SCR (Selective Catalytic Reduction) з реагентом AdBlue, що дозволяє судну працювати як на р. Дунай, так і на р. Рейн.

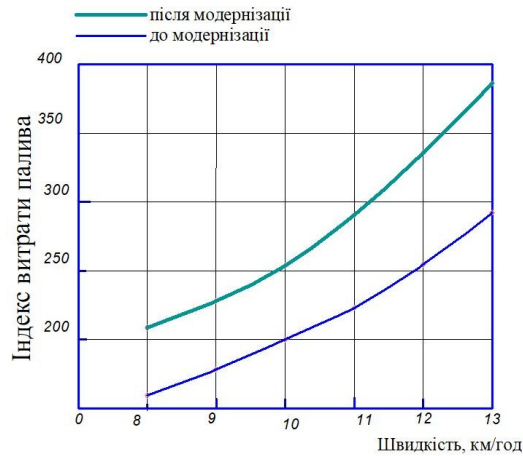


Рисунок 1 – Т/х «Капітан Антипов» після модернізації

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз головних двигунів т/х «Капітан Антипов»

Параметр	SGP Typ T112 SO	Mitsubishi S12R-MPTAW	Висновок
Номінальна потужність	2×772 кВт	2×940 кВт	Приріст тяги +22%
Частота обертів	500 об/хв	1600–1800 об/хв	Потрібен редуктор
Питома витрата палива	~215 г/кВт·год	~190 г/кВт·год	Економія 12–15%
Габарити (Д×Ш×В), м	3,5×1,2×2,4	2,5×1,4×1,6	Вивільнення МО
Маса (суха), кг	≈12 500	≈5 500	Зміна центрування

Показники енергоефективності. Розрахунок EEXI.

Загальний ККД пропульсивного комплексу річкового судна визначається як:

$$\eta_{заг} = \eta_d \cdot \eta_{тр} \cdot \eta_{гг} \cdot \eta_k,$$

де η_d – ККД головного двигуна; $\eta_{тр}$ – ККД трансмісії;
 $\eta_{гг}$ – ККД гребного гвинта;
 η_k – корпусний коефіцієнт.

Для типового річкового судна із застарілою СЕУ значення $\eta_{заг}$ рідко перевищує 0,25–0,30. При комплексній модернізації цей показник може бути підвищений до 0,38–0,45 [6].

Відповідно до вимог MARPOL 73/78 Annex VI та Резолюції МЕРС.333(76) [13] для оцінки енергоефективності у внутрішньому судноплаванні застосовується формула ІМО:

$$EEXI = P \cdot SFC \cdot CF / (Capacity \cdot \vartheta)$$

де P – потужність головних двигунів (кВт); $SFC = 190$ г/кВт·год – питома витрата палива;
 $CF = 3,114$ – коефіцієнт перетворення витрати палива у викиди CO_2 (т CO_2 /т палива);
 $Capacity = 10\,790$ т – дедвейт складу;
 $\vartheta = 5,4$ вузл – швидкість. Коефіцієнт EEXI судна з побудови ($P = 1544$ кВт) становить 15,7; після модернізації ($P = 1880$ кВт) – 19,1.

Таким чином, коефіцієнт енергоефективності зріс в 1,22 раза.

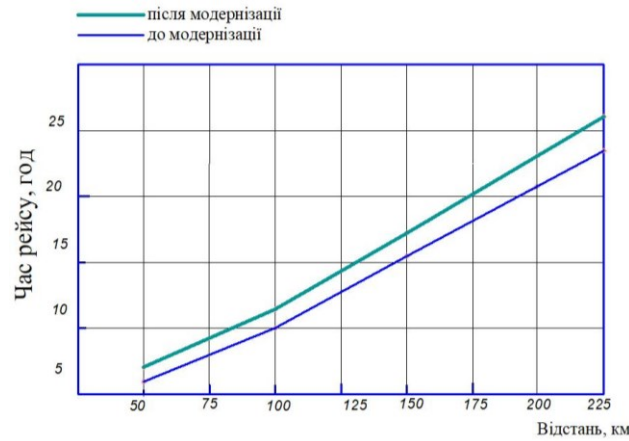


Рисунок 2 – Схема модернізованої енергетичної установки т/х «Капітан Антипов»

Таблиця 2 – Порівняння технічних характеристик до та після модернізації

Показник	До модернізації	Після модернізації
Витрати палива	Високі (застарілі ТНВД)	Низькі (електронне впорскування)
Масило	Високий угар	Мінімальні витрати
Екологічний клас	Нижче Stage I	Stage V (Euro 5)
Автоматизація	Постійна увага мотористів	Висока автоматизація

Напрями комплексної модернізації річкового флоту.

Гібридні та електричні пропульсивні системи. Сучасна класична гібридна пропульсивна система є інтегрованим комплексом, що включає дизельний двигун, гребний електродвигун, акумуляторну батарею та інтелектуальну систему управління енергетикою. Принцип її роботи ґрунтується на оптимальному розподілі навантаження між джерелами енергії залежно від поточних умов експлуатації: при маневруванні, русі на малих ходах або стоянці з працюючими споживачами основне навантаження перебирає електрична складова, тоді як дизельний двигун працює у найбільш економічному режимі або повністю відключається.

На типових річкових маршрутах із характерними зупинками, шлюзуванням та частими змінами режиму руху гібридні системи забезпечують економію палива в діапазоні 15–25% [7]. Це пояснюється тим, що дизельні двигуни на річкових судах традиційно значну частину ходового часу працюють при частковому навантаженні – в умовах зниженого ККД. Гібридна архітектура дозволяє уникнути цього недоліку, утримуючи двигун внутрішнього згоряння в діапазоні оптимального навантаження.

Baldauf та ін. [9] встановили, що акумуляторні системи здатні забезпечити від 35 до 70% пропульсивної енергії у більшості суден, залежно від профілю маршруту та конфігурації накопичувачів. Для малих пасажирських суден та поромів, які обслуговують короткі переправи з регулярними зупинками, повна електрифікація із середньою ємністю акумуляторних батарей близько 731 кВт·год є технічно та економічно обґрунтованою. Такі судна вже успішно експлуатуються в Норвегії, Нідерландах та інших країнах із розвинутою річковою та прибережною інфраструктурою. Ключовою умовою їх рентабельності є наявність інфраструктури берегового заряджання у портах і пристанях.

Оптимізація режимів роботи суднового дизеля. Одним із найдоступніших і водночас недооцінених резервів підвищення енергоефективності є оптимізація оперативних режимів експлуатації без будь-яких капіталовкладень у переобладнання. Оптимізація швидкості ходу та диференту судна — двох ключових параметрів, що визначають гідродинамічний опір, — дозволяє знизити питоме споживання палива на 8–15% [5]. Враховуючи кубічну залежність між швидкістю і потужністю, навіть незначне зменшення швидкості ходу суттєво скорочує витрату палива без помітного впливу на час рейсу.

Наступним кроком є автоматизація управління. Впровадження систем управління на основі алгоритмів машинного навчання для прогнозування споживання палива, планування рейсів та оптимізації режимів роботи головного двигуна дозволяє знизити сукупні операційні витрати на 10–20% [3]. Такі системи аналізують дані про поточні гідрологічні умови, вантажний стан судна, прогноз течії та рекомендують оптимальний профіль швидкості для кожного рейса.

Важливою складовою є також система моніторингу технічного стану обладнання [8]. Вона дозволяє своєчасно виявляти деградацію компонентів — знос форсунок, падіння компресії, забруднення теплообмінників — та оперативно усувати несправності до того, як вони призведуть до необґрунтованого зростання питомих витрат палива і позапланових простоїв.

Системи рекуперації відпрацьованого тепла. Термодинамічна недосконалість двигуна внутрішнього згоряння є однією з фундаментальних проблем сучасного суднового машинобудування. Дизельні двигуни перетворюють на механічну роботу лише 35–45% теплотворної здатності палива; решта 55–65% безповоротно розсіюється через випускні гази та систему охолодження у вигляді теплоти. Саме ця «втрачена» енергія є предметом технологій рекуперації відпрацьованого тепла.

Існує кілька підходів до її утилізації. Утилізаційні парові котли – найбільш проста і традиційна технологія – здатні забезпечити 5–8% теплоти від витраченого палива, яку можна спрямувати на опалення суднових приміщень, підігрів мазуту або вироблення гарячої води для побутових потреб. Системи органічного циклу Ренкіна (ORC) є більш складним, але й більш ефективним рішенням: вони генерують електроенергію з теплоти відпрацьованих газів з ефективністю 8–12%, знижуючи навантаження на основні генератори. Турбокомпаундні системи, у яких додаткова турбіна утилізує енергію вихлопних газів для механічного підсилення колінчастого валу, підвищують ефективність суднової енергетичної установки на 3–6% [6]. Поєднання кількох із зазначених технологій дозволяє суттєво наблизити загальний термічний ККД установки до теоретичної межі.

Гідродинамічна оптимізація та захист корпусу. Технічний стан підводної частини корпусу має прямий і значний вплив на паливну ефективність судна. Біологічне обростання підводної поверхні за 6 місяців експлуатації без очищення може збільшити опір тертя на 20–40%, що безпосередньо трансформується у відповідне зростання витрат палива. Боротьба з обростанням починається з правильного вибору захисних систем: застосування сучасних антифоулінгових покриттів нового покоління – зокрема самополірувальних і кремнійорганічних – знижує витрату палива на 3–8% порівняно із застарілими покриттями або їх відсутністю [10], а термін між плановими очищеннями при цьому суттєво зростає.

Паралельно з захистом поверхні важливою є оптимізація геометрії корпусу. Моделювання методами обчислювальної гідродинаміки (CFD) дозволяє виявити зони підвищеного хвильового опору та оптимізувати форму носової та кормової обводів, що зменшує хвильовий опір на 5–10% порівняно з вихідною конфігурацією. Не менш важливим є гвинтовий комплекс: підбір оптимального гребного гвинта у поєднанні з насадкою Корта, яка підвищує тягу завдяки ефекту спрямованого потоку, підвищує ККД гвинтового комплексу в цілому на 10–15%.

Цифровізація управління. Цифровізація суднового управління є не лише технологічним трендом, а й нормативною вимогою. Впровадження SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan — Плану управління енергетичною ефективністю судна) є обов'язковою вимогою Міжнародної морської організації (ІМО) для суден валовою місткістю понад 400 GT та практичним інструментом систематичного зниження операційних витрат. SEEMP передбачає регулярний збір і аналіз даних про споживання палива, швидкість, завантаженість і метеоумови, що формує базу для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Комплексна цифровізація системи управління у поєднанні з оптимізацією рейсів здатна знизити споживання палива на 10–20% [3] –при цьому не потребуючи будь-якої фізичної модернізації обладнання. Саме це робить цифровізацію найбільш економічно доступним першочерговим заходом, реалізація якого можлива в короткі терміни і з мінімальними початковими інвестиціями. Інтеграція інтелектуальних систем моніторингу, автоматичного збору та передачі даних, а також підтримки прийняття рішень на основі аналітики великих даних формує цифровий хребет сучасного енергоефективного судна.

Таблиця 3 – Оцінка потенціалу зниження питомого споживання палива від заходів модернізації

Захід модернізації	Зниження витрат, %
Гібридна пропульсія + акумуляторні системи	15–25 [7]
Оптимізація режиму роботи головного двигуна	8–15 [5]
Рекуперація відпрацьованого тепла	5–12 [6]
Оновлення захисних покриттів корпусу	3–8 [10]
Оптимізація гвинтового комплексу	10–15 [5]
Цифровізація (SEEMP, оптимізація рейсів)	10–20 [3]

Реалістична оцінка загального ефекту комплексної модернізації – підвищення загального ККД пропульсивного комплексу з 0,25–0,30 до 0,38–0,45 та зниження питомого споживання палива на 25–40% залежно від типу судна [6]. Для суден на Дунаї специфічні гідрологічні умови – змінні глибини від 1,5 до 6 м, значна різниця швидкостей течії – роблять особливо актуальними заходи з оптимізації режимів руху. Наявність розвиненої інфраструктури у портах Ізмаїл, Рені, Усть-Дунайськ створює передумови для впровадження гібридних систем із береговим зарядженням. З економічного погляду, при техніко-економічному обґрунтуванні проєктів варто застосовувати метод LCCA (Life Cycle Cost Analysis): термін окупності ремоторизації при поточному фрахті на Дунаї становить зазвичай 5–8 років.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує, що комплексна модернізація річкового флоту є не лише технічно обґрунтованою, а й економічно доцільною стратегією підвищення конкурентоспроможності річкового транспорту в умовах зростаючих вимог до енергоефективності та екологічності.

На прикладі т/х «Капітан Антипов» — типового представника застарілого дунайського флоту — наочно продемонстровано практичний ефект від цілеспрямованої заміни рушійних систем. Ремоторизація судна дозволила зменшити питоме споживання палива на 20–25%, що в абсолютному вираженні означає суттєву щорічну економію операційних витрат. Не менш важливим є регуляторний аспект: коефіцієнт енергоефективності існуючих суден ЕЕХІ зріс із 15,7 до 19,1, тобто у 1,22 раза, що свідчить про принципове поліпшення відповідності судна сучасним міжнародним стандартам ІМО. Цей результат є практичним доказом того, що навіть без повної перебудови судна виважена технічна модернізація здатна вивести застаріле судно у відповідність із вимогами, що набувають чинності, та продовжити термін його комерційної експлуатації.

Систематизація та критичний аналіз наявних наукових даних дозволили визначити чотири найбільш перспективні й взаємодоповнювальні напрями модернізації річкових суден. По-перше, гібридна пропульсія з акумуляторними системами у поєднанні з оптимізацією режимів роботи головного двигуна забезпечує зниження питомого споживання палива на 20–35%. Ефективність цього підходу особливо висока на річкових маршрутах із частими змінами режиму ходу, шлюзуванням та тривалими стоянками, де традиційні дизельні установки працюють далеко від оптимального навантаження. По-друге, системи рекуперації відпрацьованого тепла дозволяють утилізувати 55–65% теплотворної здатності палива, що зазвичай безповоротно втрачається через вихлопні гази та систему охолодження, підвищуючи загальний ККД суднової енергетичної установки на 10–15%. По-третє, гідродинамічна оптимізація корпусу методами CFD у поєднанні із застосуванням сучасних антифоулінгових покриттів та вдосконаленням гвинтового комплексу дає сукупну додаткову економію палива у межах 5–12%, не потребуючи втручання в машинне відділення. По-четверте, цифрові системи управління на основі SEEMP знижують споживання палива на 10–20% виключно за рахунок оптимізації оперативних рішень — без будь-якої фізичної модернізації обладнання. Саме ця обставина робить цифровізацію найбільш доступним першочерговим заходом, реалізація якого можлива в найкоротші терміни і з мінімальними капіталовкладеннями.

Сукупний ефект від комплексного застосування всіх зазначених заходів є значно більшим, ніж проста сума окремих результатів, завдяки синергетичній взаємодії технологій. Комплексна модернізація здатна підвищити загальний ККД пропульсивного комплексу з 0,25–0,30 до 0,38–0,45

— тобто на 50–80% у відносному вираженні. Це принципово змінює економічну модель експлуатації судна, суттєво знижуючи залежність від коливань цін на паливо та посилюючи конкурентоспроможність річкового транспорту порівняно з автомобільним і залізничним у боротьбі за вантажопотоки. В умовах дунайського басейну, де специфічні гідрологічні умови і розвинена портова інфраструктура Ізмаїла, Рені та Усть-Дунайська формують унікальне операційне середовище, реалізація такого потенціалу набуває особливого стратегічного значення для відродження конкурентоспроможного річкового судноплавства.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sustainable development of inland waterways transport: a review // *Journal of Shipping and Trade*. – 2024. – Vol. 9. – No. 1. DOI: 10.1186/s41072-023-00162-9.
2. Стратегічний план розвитку річкового транспорту на період до 2020 року / Міністерство інфраструктури України. – Режим доступу: <https://mtu.gov.ua/projects/40> (дата звернення: 15.02.2025).
3. Fan A., Wang J., He Y., Perčić M., Vladimir N., Yang L. Decarbonising inland ship power system: alternative solution and assessment method // *Energy*. – 2021. – Vol. 226. – Art. 120266. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120266.
4. Nuchturee C., Li T., Xia H. Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships – A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2020. – Vol. 134. – Art. 110145. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110145.
5. Kalajdžić M., Vasilev M., Momčilović N. Inland waterway cargo vessel energy efficiency in operation // *Brodogradnja*. – 2023. – Vol. 74. – No. 3. – P. 71–89. DOI: 10.21278/brod74305.
6. Lion S., Vlaskos I., Taccani R. A review of emissions reduction technologies for low and medium speed marine Diesel engines and their potential for waste heat recovery // *Energy Conversion and Management*. – 2020. – Vol. 207. – Art. 112553. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112553.
7. Kolodziejski M., Michalska-Pozoga I. Battery energy storage systems in ships' hybrid/electric propulsion systems // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – No. 3. – Art. 1122. DOI: 10.3390/en16031122.
8. Гончарук І. Методичні основи формування підсистеми моніторингу суднових технічних засобів у складі системи комплексного зниження енергетичних втрат торгових суден // *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. – 2025. – Вип. 52. – С. 205–213. DOI: 10.31498/2225-6733.52.2025.351131.
9. Baldauf M., Mehdi R., Bauckholt T., Dethof A. Electrifying inland waterway transport – a case study for Germany // *Journal of Marine Science and Technology*. – 2025. DOI: 10.1080/09377255.2025.2469396.
10. Theodoropoulos P., Spandonidis C. Advances in innovative solutions for ship energy efficiency // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – Vol. 13. – No. 11. – Art. 2103. DOI: 10.3390/jmse13112103.
11. ES-TRIN 2025/1. European Standard laying down Technical Requirements for Inland Navigation vessels. – Strasbourg: CCNR, 2025.
12. Регістр судноплавства України. Правила запобігання забрудненню з суден. Вимоги до обладнання і пристроїв суден щодо запобігання забрудненню атмосфери. – Київ: РСУ, 2024.

REFERENCES

1. Sustainable development of inland waterways transport: a review. (2024). *Journal of Shipping and Trade*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s41072-023-00162-9>
2. Ministerstvo infrastruktury Ukrainy. (2025, February 15). *Stratichnyi plan rozvytku richkovoho transportu na period do 2020 roku* [Strategic plan for the development of river transport for the period up to 2020]. <https://mtu.gov.ua/projects/40>
3. Fan, A., Wang, J., He, Y., Perčić, M., Vladimir, N., & Yang, L. (2021). Decarbonising inland ship power system: alternative solution and assessment method. *Energy*, 226, Art. 120266. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120266>
4. Nuchturee, C., Li, T., & Xia, H. (2020). Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, Art. 110145. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110145>
5. Kalajdžić, M., Vasilev, M., & Momčilović, N. (2023). Inland waterway cargo vessel energy efficiency in operation. *Brodogradnja*, 74(3), 71–89. <https://doi.org/10.21278/brod74305>
6. Lion, S., Vlaskos, I., & Taccani, R. (2020). A review of emissions reduction technologies for low and medium speed marine Diesel engines and their potential for waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 207, Art. 112553. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112553>
7. Kolodziejski, M., & Michalska-Pozoga, I. (2023). Battery energy storage systems in ships' hybrid/electric propulsion systems. *Energies*, 16(3), Art. 1122. <https://doi.org/10.3390/en16031122>
8. Honcharuk, I. (2025). *Metodychni osnovy formuvannia pidsystemy monitorynhu sudnovykh tekhnichnykh zasobiv u skladi systemy kompleksnoho znyzhennia enerhetychnykh vtrat torhovykh suden* [Methodological foundations of forming a monitoring subsystem for ship technical means as part of a comprehensive energy loss reduction system for

merchant vessels]. Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky, 52, 205–213. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351131> (in Ukrainian)

9. Baldauf, M., Mehdi, R., Bauckholt, T., & Dethof, A. (2025). Electrifying inland waterway transport – a case study for Germany. *Journal of Marine Science and Technology*. <https://doi.org/10.1080/09377255.2025.2469396>

10. Theodoropoulos, P., & Spandonidis, C. (2025). Advances in innovative solutions for ship energy efficiency. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(11), Art. 2103. <https://doi.org/10.3390/jmse13112103>

11. Central Commission for the Navigation of the Rhine (CCNR). (2025). ES-TRIN 2025/1: European Standard laying down Technical Requirements for Inland Navigation vessels. CCNR.

12. Rehrstr sudnoplavstva Ukrainy. (2024). Pravyla zapobihannia zabrudnenu z suden. Vymohy do obladnannia i prystriv suden shchodo zapobihannia zabrudnenu atmosfery [Rules for the Prevention of Pollution from Ships. Requirements for ship equipment regarding air pollution prevention]. RSU. (in Ukrainian)

Shyrkova O.A., Bazhak O.V.

MODERNIZATION OF THE RIVER FLEET: INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY COEFFICIENT

Inland water transport is traditionally considered one of the most energy-efficient modes of freight transportation, with specific energy consumption 5–10 times lower than road transport and 2–5 times lower than rail. However, the technical condition of the Ukrainian river fleet remains critically low. Most vessels were built in the 1960s–1980s: the average age exceeds 35–40 years, and the depreciation rate of fixed assets reaches 80–85%. Outdated equipment causes increased fuel consumption and low efficiency of ship power plants (SPP), which, combined with tightening international regulations (EEXI, CII), makes fleet modernization an urgent strategic priority, particularly for vessels operating on the Danube. Using the practical modernization of the «Kapitan Antipov» vessel (PJSC «UDP», October 2024) as a case study, the paper analyzes the replacement of SGP Typ T112 SO main engines (2×772 kW) with Mitsubishi S12R-MPTAW (2×940 kW) and MWM diesel generators with Volvo Penta units (2×239 kW). The new engines comply with Stage V (Euro 5) standards, hold EU type-approval certificates under Regulation (EU) 2016/1628, and are equipped with an SCR system using AdBlue reagent, enabling full compliance on both the Danube and Rhine rivers. The EEXI coefficient increased from 15.7 to 19.1, a 1.22-fold improvement, while specific fuel consumption decreased by 12–15% through re-motorization alone. Four key areas of further comprehensive modernization are systematized: hybrid propulsion with battery systems (15–25% fuel savings); main engine operating mode optimization combined with SEEMP digital management (10–20%); waste heat recovery via ORC systems and exhaust boilers (5–12%); hydrodynamic hull optimization and antifouling coatings (3–8%). Comprehensive modernization can increase overall propulsion complex efficiency from 0.25–0.30 to 0.38–0.45 and reduce specific fuel consumption by 20–35%, with a payback period of 5–8 years at current Danube freight rates.

Keywords: *river fleet, modernization, energy efficiency, EEXI, hybrid propulsion, efficiency coefficient, inland water transport.*

Стаття прийнята 15.03.2026