

УДК 629.5.03
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.2\(505\).12](https://doi.org/10.15589/znp2026.2(505).12)

CURRENT TRENDS IN POWER PLANTS OF VARIOUS PASSENGER SHIP TYPES

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ПАСАЖИРСЬКИХ СУДЕН РІЗНИХ ТИПІВ

Volodymyr V. Slyusarenko
volodymyr.slyusarenko@gmail.com
ORCID: 0009-0004-4518-0612

В. В. Слюсаренко,
аспірант

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. Purpose. To analyze the current state of power plants of passenger vessels of various types and to identify trends and prospects for their modernization, taking into account the operational, energy, and environmental features of seagoing cruise ships, river cruise ships, and small passenger vessels.

Methodology. The study employed methods of analysis and generalization of scientific and technical publications, systematization of data on marine power plants, classification of vessels according to operating conditions and energy demands, comparative analysis of conventional and promising solutions, as well as technical and environmental assessment of the possibilities for implementing hybrid, battery, and fuel-cell systems.

Results. It was established that the development of power plants for passenger vessels is differentiated depending on the vessel type. Seagoing cruise ships are characterized by the predominance of high-power diesel-electric and dual-fuel systems, while further development of this segment is associated with improved energy efficiency, the use of liquefied natural gas, waste heat recovery, partial hybridization, and the introduction of fuel cells. River cruise ships have greater potential for the implementation of hybrid, battery, and fuel-cell systems due to lower loads, limited routes, and stricter environmental requirements. Small passenger vessels are the most prepared for the application of battery-electric and hydrogen-fuel systems, which is confirmed by experimental and demonstration projects. The comparative analysis made it possible to identify differences in the level of technological readiness of these vessel groups for the energy transition.

Scientific novelty. A comparative analysis of the state and development trends of power plants for passenger vessels of various types was carried out within a unified system of technical, operational, and environmental parameters. The differences in the trajectories of the energy transition for seagoing cruise ships, river cruise ships, and small passenger vessels were substantiated. It was established that the greatest practical potential for the use of fuel cells is characteristic of river cruise ships and small passenger vessels.

Practical significance. The results can be used to select promising concepts of power plants for passenger vessels at the stages of design, modernization, and techno-economic assessment.

Key words: diesel-electric propulsion; dual-fuel power systems; hybridization of marine power plants; battery-electric solutions; hydrogen fuel cells.

Анотація. Мета. Аналіз сучасного стану енергетичних установок пасажирських суден різних типів і визначення тенденцій та перспектив їх модернізації з урахуванням експлуатаційних, енергетичних і екологічних особливостей морських круїзних, річкових круїзних і малих пасажирських суден.

Методика. Використано методи аналізу й узагальнення науково-технічних публікацій, систематизації даних про суднові енергетичні установки, класифікації суден за умовами експлуатації та енергетичними потребами, порівняльного аналізу традиційних і перспективних рішень, а також техніко-екологічної оцінки можливостей впровадження гібридних, акумуляторних систем і паливних елементів.

Результати. Встановлено, що розвиток енергетичних установок пасажирських суден має диференційований характер залежно від типу судна. Для морських круїзних суден характерне переважання високопотужних дизель-електричних і двопаливних систем, а подальший розвиток пов'язаний із підвищенням енергоефективності, використанням зрідженого природного газу, утилізацією теплоти, частковою гібридизацією та впровадженням паливних елементів. Річкові круїзні судна мають вищий потенціал для впровадження гібридних, акумуляторних систем і паливних елементів завдяки меншим навантаженням, обмеженим маршрутам і екологічним вимогам. Малі пасажирські судна найбільш підготовлені до застосування акумуляторно-електричних і воднево-паливних систем, що підтверджується експериментальними та демонстраційними проєктами. Порів-

няльний аналіз дозволив виявити відмінності в рівні технологічної готовності цих груп суден до енергетичного переходу.

Наукова новизна. Виконано порівняльний аналіз стану й тенденцій розвитку енергетичних установок пасажирських суден різних типів у єдиній системі технічних, експлуатаційних і екологічних параметрів. Обґрунтовано відмінності траєкторій енергетичного переходу для морських круїзних, річкових круїзних і малих пасажирських суден. Встановлено, що найбільший практичний потенціал застосування паливних елементів характерний для річкових круїзних і малих пасажирських суден.

Практична значимість. Результати можуть бути використані для вибору перспективних концепцій енергетичних установок пасажирських суден на етапах проєктування, модернізації та техніко-економічної оцінки.

Ключові слова: дизель-електрична пропульсія; двопаливні енергетичні системи; гібридизація судових установок; акумуляторно-електричні рішення; водневі паливні елементи.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сучасний розвиток пасажирського судноплавства пов'язаний з ростом вимог щодо енергоефективності, екологічної безпеки та надійності суден. За цих умов енергетична установка визначає не лише ходові та маневрові характеристики судна, а й рівень шкідливих викидів, автономність плавання, техніко-економічні показники та комфорт пасажирів [1; 2].

Внаслідок тенденції на декарбонізацію транспорту та посилення міжнародних екологічних вимог у суднобудуванні відбувається поступовий перехід від традиційних дизельних установок до дизель-електричних, двопаливних, гібридних, акумуляторних і воднево-паливних систем. Але темпи такого переходу суттєво залежать від типу судна, його експлуатаційних режимів, рівня встановленої потужності та вимог до дальності плавання [2; 4].

Морські круїзні, річкові круїзні та малі пасажирські судна мають значно відмінні за характером енергетичні потреби, тому застосування єдиного підходу до оцінки перспектив їх модернізації є недостатньо обґрунтованим. Важливим науково-практичним завданням є аналіз сучасного стану енергетичних установок цих трьох сегментів і визначення найбільш доцільних напрямів їх подальшого розвитку. [5; 6].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблема розвитку енергетичних установок пасажирських суден стала особливо актуальною через жорсткіші вимоги до зменшення викидів і підвищення енергоефективності судноплавства [1; 2]. У сучасних працях судові енергетичні установки розглядаються як інтегровані системи, що забезпечують як рух, так і роботу допоміжних і готельних споживачів [3; 4].

Значна частина наукових досліджень присвячена великим морським пасажирським суднам, що в якості головних енергетичних установок використовують дизельні, дизель-електричні, LNG- та двопаливні рішення [3; 5; 6]. Також окремий напрям становлять роботи стосовно збільшення енергоефективності, оптимізації режимів роботи генераторів і зниження викидів шкідливих речовин [5; 7].

Щодо річкових і малих пасажирських суден у літературі останнім часом більшу увагу приділено

гібридним, акумуляторним і воднево-паливним системам. Саме в цих класах суден проявляються переваги коротких маршрутів, менших потужностей та більш жорстких екологічних вимог. Це робить їх більш придатними до енергетичної модернізації та поступового впровадження паливних елементів [8; 9; 16].

Отже у світовій літературі достатньо повно розкриті окремі напрями розвитку судових енергетичних установок, однак комплексне порівняння сучасного стану та тенденцій розвитку енергетичних установок пасажирських суден різних типів залишається представленим недостатньо повно [9; 15; 18]. Водночас у новіших оглядових працях дедалі чіткіше підкреслюється, що для великих круїзних, річкових і малих пасажирських суден потрібні різні шляхи декарбонізації [18; 21].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Аналіз потрібних для вирішення запропонованої проблеми наукових публікацій показує, що більшість із них зосереджена або на окремих типах енергетичних систем, або на певних сегментах флоту. Питання порівняльного аналізу енергетичних рішень для пасажирських суден різних типів у межах єдиної техніко-експлуатаційної та екологічної системи оцінювання розкрито недостатньо [3; 6; 9].

Також недостатньо систематизовано вплив експлуатаційних умов на вибір перспективної енергетичної установки. У наявних працях не повною мірою узагальнено, як саме дальність рейсу, рівень готельного навантаження, частота зміни маневрових режимів, вимоги до локальних викидів і доступність інфраструктури впливають на доцільність застосування дизельних, дизель-електричних, гібридних, акумуляторних і воднево-паливних рішень [1; 2; 9].

Отже, невирішеною частиною загальної проблеми є відсутність порівняльного аналізу стану та тенденцій розвитку енергетичних установок пасажирських суден різних типів в сучасних умовах і недостатнє обґрунтування перспектив впровадження паливних елементів насамперед для річкових і малих пасажирських суден [10; 14; 15].

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є аналіз сучасного стану енергетичних установок пасажирських суден різних типів та визначення загальних тенденцій і перспектив їх розвитку з урахуванням експлуатаційних, енергетичних та екологічних особливостей морських круїзних суден, річкових круїзних суден і малих пасажирських суден.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

У роботі використано аналіз і узагальнення науково-технічних публікацій, систематизацію сучасних технічних рішень у сфері суднової енергетики, а також порівняльний аналіз енергетичних установок пасажирських суден за технічними, експлуатаційними та екологічними показниками [3; 8; 9]. Окремо було проведено класифікацію пасажирських суден за умовами експлуатації та енергетичними потребами. Джерела добиралися з урахуванням їх актуальності, наукової значущості, наявності даних про сучасні типи енергетичних установок і належності до профільних міжнародних видань та звітів. Під час порівняння трьох груп пасажирських суден враховувалися експлуатаційні умови, рівень встановленої потужності, структура енергоспоживання, екологічні вимоги та можливості впровадження низькоемісійних технологій [9; 10; 13].

Об'єктом дослідження є енергетичні установки пасажирських суден різних типів.

Предметом дослідження є сучасний стан, особливості застосування, тенденції розвитку та перспективи модернізації енергетичних установок морських круїзних, річкових круїзних і малих пасажирських суден.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

1. Особливості енергетичних потреб пасажирських суден різних типів

Енергетичні потреби пасажирських суден визначаються їхнім призначенням, розмірами, районами плавання, тривалістю рейсу, кількістю пасажирів і структурою бортового навантаження [3; 4]. Особливістю пасажирських суден є поєднання пропульсивного навантаження зі значним споживанням енергії допоміжними та готельними системами. З огляду на це енергетична установка повинна забезпечувати як рух судна, так і безперебійне живлення бортових споживачів [3; 5].

Для морських круїзних суден характерні великі встановлені потужності, тривала автономна робота та значне готельне навантаження, тому для них найбільш доцільними є високопотужні дизельні або дизель-електричні установки. Для річкових круїзних суден більш характерні менші потужності, обмежені маршрути та вищі вимоги до зниження шуму й локальних викидів. Натомість малі пасажирські

судна, які працюють на коротких маршрутах, найкраще підходять для електрифікації та впровадження воднево-паливних рішень [8; 13; 15].

Вибір енергетичної установки також визначається доступністю паливної та берегової енергетичної інфраструктури. Для морських круїзних суден ключовими залишаються автономність і висока щільність запасеної енергії. Для річкових і малих пасажирських суден більш практичними є рішення з підзарядкою акумуляторних систем, використанням берегового електроживлення та поступовим розвитком водневої інфраструктури [6; 14; 15].

Отже, енергетичні потреби пасажирських суден різних типів визначаються поєднанням експлуатаційних, технічних і екологічних чинників, що дає підстави розглядати морські круїзні, річкові круїзні та малі пасажирські судна як окремі об'єкти порівняльного аналізу.

2. Сучасний стан та тенденції розвитку енергетичних установок морських круїзних суден

Подальший розвиток енергетичних установок морських круїзних суден пов'язаний із підвищенням енергоефективності, упровадженням систем енергоменеджменту, утилізацією теплоти та частковою гібридизацією за рахунок допоміжних акумуляторних систем. У цьому сегменті паливні елементи наразі переважно розглядаються як складова допоміжних або комбінованих енергетичних контурів, а не як повноцінна заміна основним високопотужним дизель-електричним установкам [10; 17; 19].

На сучасному етапі для морських круїзних суден найпоширенішими залишаються дизельні та дизель-електричні енергетичні установки. Для великих лайнерів провідне місце посідає саме дизель-електрична схема, оскільки вона дає змогу раціонально розподіляти навантаження між генераторними агрегатами, зручно поєднується з електричною пропульсією та краще працює за змінного навантаження [3; 6].

Помітною тенденцією останніх років стало використання зрідженого природного газу та поширення двопаливних енергетичних установок. LNG- і двопаливні рішення розглядаються як один із реальних напрямів модернізації морських круїзних суден, однак їх упровадження потребує розвиненішої паливної інфраструктури, додаткових заходів безпеки та продуманої компоновки паливних танків [6; 7; 12].

3. Сучасний стан та перспективи розвитку енергетичних установок річкових круїзних суден

Річкові круїзні судна експлуатуються у внутрішніх водах і характеризуються меншими встановленими потужностями, обмеженням маршрутів та підвищеними екологічними вимогами на узбережжі та урбанізованих зонах [13; 14]. Саме тому їхні енергетичні установки повинні об'єднувати достатню надійність і економічність із можливістю зниження шуму, локальних викидів і витрат палива.

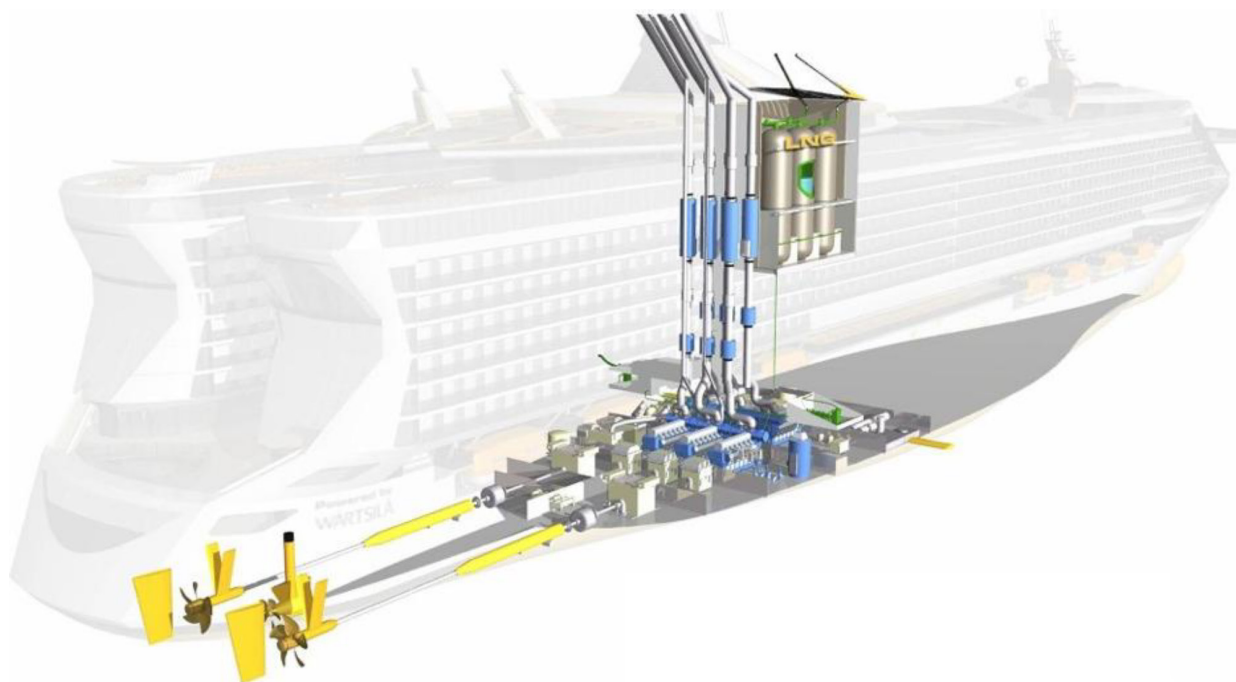


Рис. 1. Концептуальна архітектура енергетичної установки морського круїзного судна на зрідженому природному газі (LNG)

Нині для річкових круїзних суден найбільш типовими залишаються дизельні та дизель-електричні установки середньої потужності. Разом із тим саме цей сегмент є більш придатним для впровадження гібридних архітектур та акумуляторних систем, які можуть використовуватися під час пікових навантажень, маневрування, стоянки та проходження окремих ділянок маршруту [8; 14].

Перспективи застосування паливних елементів на річкових круїзних суднах пов'язані з нижчими вимогами до встановленої потужності, більш передбачуваним характером навантаження та кращими можливостями для розвитку берегової інфраструктури. Водночас їх упровадження стримують висока вартість обладнання, недостатній розвиток водневої інфраструктури та потреба в удосконаленні нормативної бази. Разом із тим сучасні дослідження показують, що одним із ключових напрямів підвищення ефективності для пасажирських суден із відносно обмеженими маршрутами є оптимізація топології та систем керування гібридними паливно-елементними установками [10; 11; 20].

4. Сучасний стан та перспективи розвитку енергетичних установок малих пасажирських суден

Для малих пасажирських суден типовими є короткі маршрути, часті маневрові режими та експлуатація у прибережних, міських або туристичних акваторіях [8; 15]. У цьому сегменті особливо важливими є економічність, низький рівень шуму, скорочення локальних викидів і зручність у щоденній експлуатації.

На сучасному етапі на малих пасажирських суднах поряд із традиційними дизельними установками

дедалі ширше застосовуються електричні та гібридні системи. Для коротких маршрутів акумуляторно-електричні рішення є технічно доцільними, оскільки дають змогу усунути локальні викиди, знизити рівень шуму та полегшити маневрування [8; 10; 15].

У цьому сегменті також активно розвиваються гібридні архітектури, у яких акумуляторні системи поєднуються з дизель-генераторами або іншими допоміжними джерелами енергії. Такі рішення забезпечують більшу гнучкість експлуатації та зменшують залежність від повноцінної берегової зарядної інфраструктури [8; 10].

Паливні елементи належать до найперспективніших напрямів розвитку енергетичних установок для малих пасажирських суден. Наявність демонстраційних і дослідних проєктів свідчить про поступовий перехід таких рішень від експериментальної стадії до практичного застосування. Водночас їх широке впровадження й надалі стримують висока вартість обладнання, вимоги до інфраструктури та безпечного зберігання палива [9; 11; 15]. Узагальнювальні огляди також підтверджують, що саме малі судна та short-sea сегмент є найбільш придатними для швидкого впровадження паливно-елементних систем за умови розвитку локальної інфраструктури [18; 20; 21].

5. Порівняльний аналіз енергетичних установок пасажирських суден різних типів

Порівняльний аналіз свідчить, що енергетичні установки пасажирських суден різних типів істотно відрізняються за рівнем встановленої потужності, структурою енергоспоживання, умовами експлуатації, екологічними вимогами та можливостями



Рис. 2. Концептуальна архітектура енергетичної установки річного круїзного судна з інтегрованими танками рідкого водню та паливними елементами

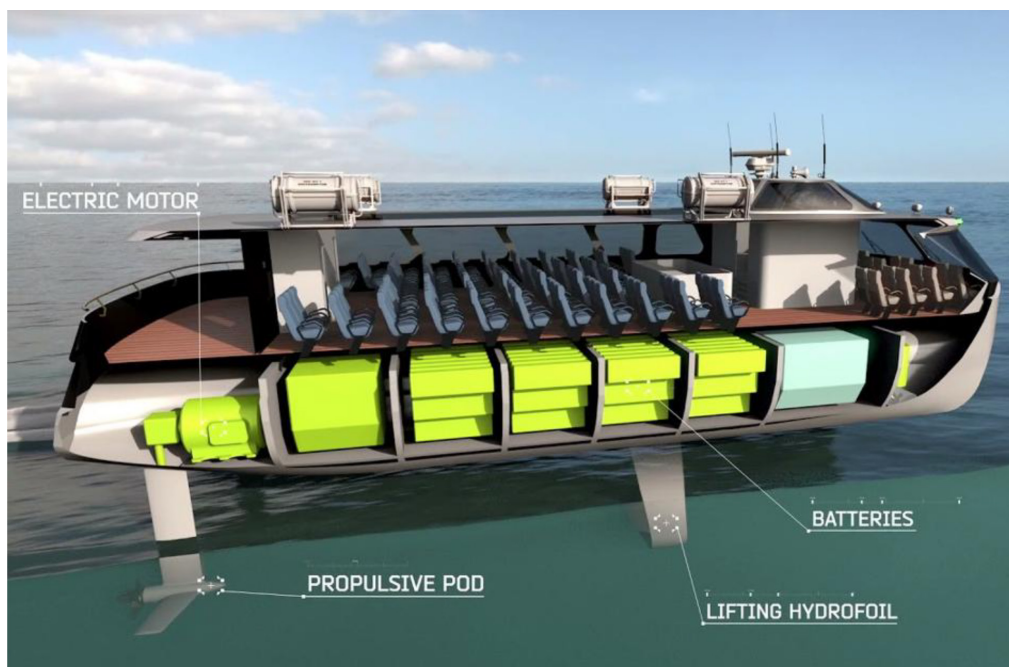


Рис. 3. Концепт електричного порому на підводних крилах

подальшої модернізації [3; 5; 13]. Саме тому доцільність застосування традиційних, дизель-електричних, двопаливних, гібридних, акумуляторних і паливно-елементних рішень для них є різною.

Для морських круїзних суден переважають високопотужні дизельні, дизель-електричні та двопаливні установки, які забезпечують потрібний рівень автономності й надійності. Для річкових круїзних суден більш доцільними є дизель-електричні, гібридні та акумуляторні рішення. Водночас малі пасажирські судна мають найкращі передумови для електрифікації та впровадження паливних елементів [8; 14; 15].

Отримані результати доцільно узагальнити в таблиці 1 «Порівняльна характеристика енергетичних установок пасажирських суден різних типів» і в таблиці 2

«Перспективність застосування різних енергетичних рішень для пасажирських суден різних типів».

Дані, наведені в табл. 1, свідчать, що морські круїзні судна й надалі залишаються найбільш енергоємним і технологічно складним сегментом пасажирського флоту. Водночас річкові круїзні та малі пасажирські судна характеризуються вищою гнучкістю щодо впровадження комбінованих низькоемісійних рішень.

Дані табл. 2 свідчать, що сегмент морських круїзних суден залишається найбільш консервативним у контексті енергетичного переходу. Водночас річкові круїзні, а особливо малі пасажирські судна, демонструють вищий рівень технологічної готовності до впровадження гібридних, акумуляторних

Таблиця 1. Порівняльна характеристика енергетичних установок пасажирських суден різних типів

	Морські круїзні судна	Річкові круїзні судна	Малі пасажирські судна
Встановлена потужність, МВт	20–80	1–10	0,05–2,0
Типова тривалість автономної експлуатації	5–20 діб	1–7 діб	2–24 год
Частка готельного навантаження, %	30–50	20–40	10–25
Пасажиромісткість, осіб	500–7000	50–400	10–300
Типова швидкість, вузлів	18–24	10–15	6–20
Умови експлуатації	Тривалі автономні рейси; велика водотоннажність; значне готельне навантаження; високі вимоги до надійності та безперервності енергозабезпечення	Внутрішні водні шляхи; обмежені маршрути; менші швидкості; підвищені екологічні вимоги; важливість зниження шуму та локальних викидів	Короткі маршрути; часті маневрові режими; експлуатація в міських, прибережних і туристичних акваторіях; підвищені вимоги до екологічності та акустичного комфорту
Основні енергетичні установки	Дизельні; дизель-електричні; двопаливні; LNG-системи	Дизельні; дизель-електричні; гібридні; акумуляторні системи	Дизельні; електричні; гібридні; установки на паливних елементах
Переваги застосовуваних рішень	Висока потужність; надійність; гнучкість розподілу навантаження; можливість інтеграції з електричною пропульсією; придатність до тривалих рейсів	Помірна потужність; експлуатаційна гнучкість; краща придатність до гібридизації; можливість роботи в екологічно чутливих зонах; зниження шуму	Низький рівень шуму; відсутність або зменшення локальних викидів; добра придатність до електрифікації; можливість використання сучасних компактних енергетичних систем
Основні обмеження	Високий рівень споживання палива; значні викиди; складність повної декарбонізації; обмежена придатність паливних елементів для основної енергетичної установки	Обмежений розвиток зарядної та водневої інфраструктури; висока вартість нових рішень; залежність від берегового енергозабезпечення	Обмежена дальність при використанні лише акумуляторів; висока вартість паливних елементів; потреба у спеціалізованій інфраструктурі
Перспективні напрями розвитку	Підвищення енергоефективності; розширення застосування LNG; часткова гібридизація; використання акумуляторних систем для допоміжних режимів; перспективне застосування паливних елементів у допоміжних контурах	Подальша гібридизація; часткова електрифікація; інтеграція акумуляторних систем; застосування паливних елементів у складі комбінованих енергетичних установок	Розширення використання акумуляторно-електричних систем; удосконалення гібридних архітектур; перехід від прототипів до практичного застосування суден на паливних елементах

Таблиця 2. Перспективність застосування різних енергетичних рішень для пасажирських суден різних типів

Енергетичне рішення	Морські круїзні судна	Річкові круїзні судна	Малі пасажирські судна
Дизельні установки	Висока доцільність на сучасному етапі	Середня доцільність	Середня доцільність
Дизель-електричні установки	Висока доцільність	Висока доцільність	Середня доцільність
Двопаливні / LNG-рішення	Висока перспективність	Обмежена або вибіркова доцільність	Низька доцільність
Гібридні системи	Середня перспективність	Висока перспективність	Висока перспективність
Акумуляторні системи	Обмежена доцільність як основне джерело; висока як допоміжне	Висока перспективність	Висока перспективність
Паливні елементи	Обмежена перспективність у найближчій перспективі	Висока перспективність у складі комбінованих систем	Висока перспективність

і паливно-елементних систем, що узгоджується з результатами сучасних оглядових досліджень [18; 20; 21].

Отже, вибір перспективної енергетичної установки має здійснюватися з урахуванням типу судна, профілю його експлуатації, рівня енергоспоживання, доступної інфраструктури та екологічних вимог. Якщо для морських круїзних суден у найближчій перспективі визначальними залишатимуться високопотужні дизель-електричні та двопаливні установки з елементами часткової гібридизації, то для річкових круїзних і малих пасажирських суден найперспективнішими виглядають гібридні, акумуляторні та паливно-елементні системи [10; 14; 16].

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Отримані результати свідчать, що розвиток енергетичних установок пасажирських суден має чітко диференційований характер і насамперед залежить від умов експлуатації, рівня енергетичних потреб, вимог до автономності та екологічних обмежень [3; 5; 13]. Тому застосування єдиного підходу до оцінки перспектив модернізації для всіх типів пасажирських суден не можна вважати достатньо обґрунтованим.

Для морських круїзних суден у найближчій перспективі найбільш реалістичними залишаються дизель-електричні та двопаливні рішення, доповнені системами енергоменеджменту, утилізації теплоти й часткової гібридизації. Для річкових круїзних суден кращі передумови формують обмежені маршрути, менші потужності та жорсткіші локальні екологічні вимоги, тому саме для цього сегмента більш перспективними є гібридні, акумуляторні та паливно-елементні системи [9; 10; 14]. Такий висновок узгоджується із сучасними системними оглядами, присвяченими декарбонізації внутрішнього та короткоплечового судноплавства [20; 21].

Найвищий рівень технологічної готовності до впровадження альтернативних енергетичних рішень спостерігається саме у сегменті малих пасажирських

суден. Тут найактивніше розвиваються електричні, гібридні та воднево-паливні концепції, а поява демонстраційних суден на паливних елементах свідчить про поступовий перехід таких рішень до практичного етапу розвитку [15; 16].

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що енергетичний перехід у різних сегментах пасажирського флоту відбувається нерівномірно: для морських круїзних суден він, імовірно, матиме переважно еволюційний характер, тоді як для річкових і малих пасажирських суден більш реалістичним є швидше впровадження низькоемісійних і беземісійних технологій.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз показав, що сучасний стан енергетичних установок пасажирських суден різних типів визначається насамперед умовами експлуатації, рівнем енергетичних потреб, екологічними вимогами та технічною готовністю до впровадження нових рішень. Морські круїзні, річкові круїзні та малі пасажирські судна мають різні напрями розвитку енергетичних установок, тому застосування єдиного підходу до їх модернізації не є обґрунтованим.

Для морських круїзних суден у найближчій перспективі визначальними залишатимуться високопотужні дизельні, дизель-електричні та двопаливні установки, доповнені системами енергоменеджменту, утилізації теплоти та часткової гібридизації. Для річкових круїзних суден найбільш перспективними є подальший розвиток гібридних рішень, розширення використання акумуляторних систем і поетапна інтеграція паливних елементів у складі комбінованих енергетичних установок.

Малі пасажирські судна є найбільш підготовленим сегментом до впровадження електричних, гібридних і паливно-елементних енергетичних систем. Саме для річкових круїзних і малих пасажирських суден паливні елементи мають найбільший практичний потенціал, тоді як для великих морських круїзних суден їх використання поки що доцільне переважно в межах допоміжних або комбінованих контурів.

REFERENCES

- [1] International Maritime Organization. (2020). *Fourth IMO greenhouse gas study 2020*. Retrieved from: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/fourth-imo-greenhouse-gas-study-2020.aspx>
- [2] International Maritime Organization. (2023). *2023 IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships (Resolution MEPC.377(80))*. Retrieved from: <https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.377%2880%29.pdf>
- [3] Wärtsilä. (n.d.). *Electric propulsion system for ships*. Retrieved from: <https://www.wartsila.com/marine/products/ship-electrification-solutions/electric-propulsion-systems>
- [4] IMO CARES Project. (2024). *IMO CARES report on decarbonization of domestic shipping*. Retrieved from: https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/Documents/IMO_CARES_Decarbonization_of_Domestic_Shipping_report_FINAL%20_.pdf
- [5] Marty, P., Corrigan, P., Gondet, A., Chenouard, R., & Hétet, J.-F. (2012). Modelling of energy flows and fuel consumption on board ships: Application to a large modern cruise vessel and comparison with sea monitoring data. In *Proceedings of the 11th International Marine Design Conference*.
- [6] International Maritime Organization. (2016). *Studies on the feasibility and use of LNG as a fuel for shipping*. Retrieved from: <https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/01/STUDIES-ON-THE-FEASIBILITY-AND-USE-OF-LNG-AS-A-FUEL-FOR-SHIPPING-.pdf>
- [7] Chantiers de l'Atlantique. (n.d.). *MSC World Europa*. Retrieved from: <https://chantiers-atlantique.com/en/msc-world-europa/>
- [8] DNV. (2019, November 21). *Batteries gain momentum in the maritime sector*. Retrieved from: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Batteries-gain-momentum-in-the-maritime-sector/>
- [9] Elkafas, A. G., Rivarolo, M., Gadducci, E., Magistri, L., & Massardo, A. F. (2023). Fuel cell systems for maritime: A review of research development, commercial products, applications, and perspectives. *Processes*, 11(1), 97. <https://doi.org/10.3390/pr11010097>
- [10] Xing, H., Stuart, C., Spence, S., & Chen, H. (2021). Fuel cell power systems for maritime applications: Progress and perspectives. *Sustainability*, 13(3), 1213. <https://doi.org/10.3390/su13031213>
- [11] International Maritime Organization. (2023). *Study on the readiness and availability of low- and zero-carbon technology and marine fuels*. Retrieved from: <https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2023/08/Readiness-of-Low-Zero-Carbon-Marine-Fuels-Technology-Full-Report-v1.pdf>
- [12] MSC Cruises. (2023). *Sustainability report 2022*. Retrieved from: <https://www.msccruises.com/int/-/media/global-contents/about-msc/sustainability/msc-cruises-sustainability-report-2022.pdf>
- [13] Dotto, A., Satta, A., & Campora, U. (2023). Energy, environmental and economic investigations of cruise ships powered by alternative fuels. *Energy Conversion and Management*, 287, 117011. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117011>
- [14] Hubei Provincial People's Government. (2022, March 30). *Largest electric cruise ship makes debut*. Retrieved from: https://en.hubei.gov.cn/news/newslst/202203/t20220330_4061542.shtml
- [15] Norled. (2023). *MF "Hydra" the world's first hydrogen ferry*. Retrieved from: <https://www.norled.no/en/nyhet/mf-hydra-the-worlds-first/>
- [16] Zhang, Z., Zheng, X., Cui, D., Yang, M., Cheng, M., & Ji, Y. (2025). Research progress of fuel cell technology in marine applications: A review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(4), 721. <https://doi.org/10.3390/jmse13040721>
- [17] Yin, H., Lan, H., Hong, Y. Y., & Wang, Z. (2023). A comprehensive review of shipboard power systems with new energy sources. *Energies*, 16(5), 2307. <https://doi.org/10.3390/en16052307>
- [18] van Biert, L., Godjevac, M., Visser, K., & Aravind, P. V. (2016). A review of fuel cell systems for maritime applications. *Journal of Power Sources*, 327, 345–364. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.07.007>
- [19] Micoli, L., Coppola, T., & Turco, M. (2021). A case study of a solid oxide fuel cell plant on board a cruise ship. *Journal of Marine Science and Application*, 20, 524–533. <https://doi.org/10.1007/s11804-021-00217-y>
- [20] Niu, L., & Xiao, L. (2024). Optimization of topology and energy management in fuel cell cruise ship hybrid power systems. *Intelligent Marine Technology and Systems*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s44295-024-00026-3>
- [21] Vakili, S., Insel, M., Singh, S., & Ölçer, A. I. (2025). Decarbonizing domestic and short-sea shipping: A systematic review and transdisciplinary pathway for emerging maritime regions. *Sustainability*, 17(16), 7294. <https://doi.org/10.3390/su17167294>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] International Maritime Organization. (2020). *Fourth IMO greenhouse gas study 2020*. Retrieved from: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/fourth-imo-greenhouse-gas-study-2020.aspx>
- [2] International Maritime Organization. (2023). *2023 IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships (Resolution MEPC.377(80))*. Retrieved from: <https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.377%2880%29.pdf>
- [3] Wärtsilä. (n.d.). *Electric propulsion system for ships*. Retrieved from: <https://www.wartsila.com/marine/products/ship-electrification-solutions/electric-propulsion-systems>
- [4] IMO CARES Project. (2024). *IMO CARES report on decarbonization of domestic shipping*. Retrieved from: https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/Documents/IMO_CARES_Decarbonization_of_Domestic_Shipping_report_FINAL%20_.pdf

- [5] Marty, P., Corrigan, P., Gondet, A., Chenouard, R., & Hétet, J.-F. (2012). Modelling of energy flows and fuel consumption on board ships: Application to a large modern cruise vessel and comparison with sea monitoring data. In *Proceedings of the 11th International Marine Design Conference*.
- [6] International Maritime Organization. (2016). *Studies on the feasibility and use of LNG as a fuel for shipping*. Retrieved from: <https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/01/STUDIES-ON-THE-FEASIBILITY-AND-USE-OF-LNG-AS-A-FUEL-FOR-SHIPPING-.pdf>
- [7] Chantiers de l'Atlantique. (n.d.). *MSC World Europa*. Retrieved from: <https://chantiers-atlantique.com/en/msc-world-europa/>
- [8] DNV. (2019, November 21). *Batteries gain momentum in the maritime sector*. Retrieved from: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Batteries-gain-momentum-in-the-maritime-sector/>
- [9] Elkafas, A. G., Rivarolo, M., Gadducci, E., Magistri, L., & Massardo, A. F. (2023). Fuel cell systems for maritime: A review of research development, commercial products, applications, and perspectives. *Processes*, 11(1), 97. <https://doi.org/10.3390/pr11010097>
- [10] Xing, H., Stuart, C., Spence, S., & Chen, H. (2021). Fuel cell power systems for maritime applications: Progress and perspectives. *Sustainability*, 13(3), 1213. <https://doi.org/10.3390/su13031213>
- [11] International Maritime Organization. (2023). *Study on the readiness and availability of low- and zero-carbon technology and marine fuels*. Retrieved from: <https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2023/08/Readiness-of-Low-Zero-Carbon-Marine-Fuels-Technology-Full-Report-v1.pdf>
- [12] MSC Cruises. (2023). *Sustainability report 2022*. Retrieved from: <https://www.msccruises.com/int/-/media/global-contents/about-msc/sustainability/msc-cruises-sustainability-report-2022.pdf>
- [13] Dotto, A., Satta, A., & Campora, U. (2023). Energy, environmental and economic investigations of cruise ships powered by alternative fuels. *Energy Conversion and Management*, 287, 117011. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117011>
- [14] Hubei Provincial People's Government. (2022, March 30). *Largest electric cruise ship makes debut*. Retrieved from: https://en.hubei.gov.cn/news/newslst/202203/t20220330_4061542.shtml
- [15] Norled. (2023). *MF "Hydra" the world's first hydrogen ferry*. Retrieved from: <https://www.norled.no/en/nyhet/mf-hydra-the-worlds-first/>
- [16] Zhang, Z., Zheng, X., Cui, D., Yang, M., Cheng, M., & Ji, Y. (2025). Research progress of fuel cell technology in marine applications: A review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(4), 721. <https://doi.org/10.3390/jmse13040721>
- [17] Yin, H., Lan, H., Hong, Y. Y., & Wang, Z. (2023). A comprehensive review of shipboard power systems with new energy sources. *Energies*, 16(5), 2307. <https://doi.org/10.3390/en16052307>
- [18] van Biert, L., Godjevac, M., Visser, K., & Aravind, P. V. (2016). A review of fuel cell systems for maritime applications. *Journal of Power Sources*, 327, 345–364. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.07.007>
- [19] Micoli, L., Coppola, T., & Turco, M. (2021). A case study of a solid oxide fuel cell plant on board a cruise ship. *Journal of Marine Science and Application*, 20, 524–533. <https://doi.org/10.1007/s11804-021-00217-y>
- [20] Niu, L., & Xiao, L. (2024). Optimization of topology and energy management in fuel cell cruise ship hybrid power systems. *Intelligent Marine Technology and Systems*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s44295-024-00026-3>
- [21] Vakili, S., Insel, M., Singh, S., & Ölçer, A. I. (2025). Decarbonizing domestic and short-sea shipping: A systematic review and transdisciplinary pathway for emerging maritime regions. *Sustainability*, 17(16), 7294. <https://doi.org/10.3390/su17167294>

© Слюсаренко В. В.

Дата першого надходження статті до видання: 21.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)