

POSSIBLE COMBINATION OF WIND AND SOLAR ENERGY IN SHIPPING

МОЖЛИВЕ ПОЄДНАННЯ ВІТРОВОЇ ТА СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ
У СУДНОПЛАВСТВІ

Valentyna V. Kirsanova

kirsanova@dinuoma.com.ua

ORCID: 0000-0002-5857-1426

В. В. Кірсанова,

канд. біол. наук, доцент

*Danube Institute of the National University "Odesa Maritime Academy", Izmail**Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл*

Abstract. *The purpose* of the study is to analyze the possibility of additional reduction of carbon dioxide emissions during the operation of water transport equipped with rigid sails in combination with the installation of film solar panels on their surface. *Methodology.* Review of published research results devoted to the design features of rigid sails installed on ships. Analysis and determination of the possibility of combining the operation of rigid sails with a photogenerating coating. Calculations were carried out for the ship "Wing 560" developed by Oceanbird, which has been in operation since 2023. Two rigid sails are installed on this ship. The maximum amount of solar energy that can be accumulated in the case of energizing the rigid sails with a photogenerating coating was determined. Results In shipping, it is possible to implement rigid sails in combination with light and thin perovskite solar panels. The installation of solar panels can accumulate from 30 W to 200 W per hour per square meter, depending on the intensity of solar radiation. When operating rigid sails on a ship, the amount of solar energy will also depend on the position of the sails in relation to the sun. If the ship carries out cargo operations for three days in the southern regions, up to one thousand kW of alternative energy can be accumulated during this period. The accumulation of solar energy is also possible when the rigid sails are in a horizontal position when the ship is moving against the wind. *Scientific novelty* In shipping, it is possible to introduce rigid sails in combination with light and thin perovskite solar panels. Solar electricity accumulated by solar panels will save up to one ton of fossil fuel per day during the operation of the vessel. When burning one ton of fossil fuel, three tons of carbon dioxide are formed. Such fuel savings reduce the amount of carbon dioxide emissions. *Practical significance.* The development of wind and solar power technology in shipping could significantly reduce carbon dioxide emissions during ship operation. This requires the creation of an integrated system of rigid sails, marine-grade solar panels, energy storage modules, charging systems, and marine computers that allows ships to use wind power in combination with solar power.

Key words: carbon dioxide storage; decarbonization of shipping; wind energy; film solar panels.

Анотація. *Метою* дослідження є аналіз можливості додаткового скорочення викидів діоксиду карбону при експлуатації водного транспорту обладаного жёсткими вітрилами в поєднанні з установкою плівкових сонячних панелей на їх поверхні. *Методика.* Огляд опублікованих результатів досліджень, присвячених особливостей конструкції жорстких вітрил встановлених на суднах. Аналіз та визначення можливості поєднання експлуатації жорстких вітрил з фотогенеруючим покриттям. Розрахунки здійснили для судна «Wing 560» розробленого Oceanbird, яке експлуатується з 2023 року. На цьому судні встановлено два жорсткі вітрила. Визначена максимальна кількість сонячної енергетики, яку можна накопичувати, на разі як що насажувати жорсткі вітрила фотогенеруючим покриттям. *Результати.* У судноплаванні можливе впровадження жорстких вітрил з поєднанням з легкими та тонкими сонячними панелями з перовскіту. Установка сонячних панелей може накопичити від 30 Вт до 200 Вт на годину на одному кв.м в залежності від інтенсивності сонячного випромінювання. При експлуатації жорстких вітрил на судні кількість сонячної енергетики також буде залежати і від позиції вітрил по відношенню до сонця. Якщо судно здійснює вантажні операції протягом трьох діб у південних регіонах, за цей період можливе накопичення до однієї тисячі кВт альтернативної енергетики. Накопичення сонячної енергії також можливе при знаходженні жорстких вітрил у горизонтальному положенні, коли судно рухається проти вітру. *Наукова новизна* У судноплаванні можливе впровадження жорстких вітрил в поєднанням з легкими та тонкими сонячними панелями з перовскіту. Сонячна електроенергія, накопичена сонячними панелями, дозволить заощадити до однієї тони викопного палива на добу при експлуатації судна. При спалюванні однієї

тони викопного палива утворюється три тони діоксиду карбону. Така економія палива зменшує кількість викидів діоксиду карбону.

Практична значимість. При розробці технології комбінованого використання вітрової та сонячної енергетики у суднопластві можливе значне зниження викидів діоксиду карбону під час експлуатації суден. Для цього необхідно створення інтегрованої системи жорстких вітрил, сонячних панелей морського класу, модулів зберігання енергії, системи зарядки і морських комп'ютерів, яка дозволяє судам використовувати енергію вітру в поєднанні з енергією сонця.

Ключові слова: зберігання вуглекислого газу; декарбонізація судноплавства; енергія вітру; плівкові сонячні панелі.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

В атмосфері спостерігаються підвищення середньої температури кліматичної системи Землі. Причиною появи цих процесів є надмірне накопичення діоксиду карбону у шарах атмосфери.

В результаті глобального потепління, спостерігаємо танення льодовиків та крижаних щитів, підвищення рівня моря та численні аномалії кліматичних умов. Прогнозується подальше підвищення температури через антропогенні парникові гази [1]. Збитки від кліматичних аномалій також посиляться. Вже сьогодні спостерігається підвищення рівня моря та збільшення територій пустелі. Ці кліматичні зміни є загрозою для продовольчої безпеки, втрати місць проживання людей та загибелі багатьох біологічних видів через зміну умов проживання [2]. Якщо річні викиди парникових газів продовжать інтенсивно зростати, то моделі прогнозують зростання глобальної температури до кінця цього століття на 10,2 градусів за Фаренгейтом. Якщо річні викиди почнуть значно знижуватися до 2050 року, моделі прогнозують, що температура підвищиться на 5,9 градуса [3].

Перевезення вантажів морським транспортом відіграє важливу роль у світовій економіці. На його частку припадає 70 % світових перевезень різних вантажів [4]. Прогнозується зростання перевезення товарів морським транспортом на 3,8 % на рік у період із 2018 по 2025 рік. Також очікується попит на круїзні та пасажирські перевезення. На загальний обсяг світового судноплавства припадає близько 3 % щорічних світових викидів діоксиду карбону, що становить один мільярд тон діоксиду карбону щорічно. Якщо вітряні двигуни сьогодні заощаджують викопне паливо, частково скорочуються викиди діоксиду карбону.

Як тільки ці види палива стануть широкодоступними, нам знадобиться менше, оскільки вітер може забезпечити від 10 % до 30 % необхідної кораблю енергії. Прогнозується зростання перевезення вантажів морським транспортом на 3,8 % на рік у період із 2018 по 2025 рік [5].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

У квітні 2018 року Міжнародна морська організація (ІМО) прийняла початкову стратегію з викидів парникових газів, встановивши цільові показники та заходи щодо скорочення викидів діоксиду карбону від міжнародного судноплавства. У липні 2023 року

під час 80-ї сесії Комітету захисту морського середовища (МЕРС 80) початкова стратегія з декарбонізації, була вперше переглянута з метою скорочення викидів парникових газів від суден. Переглянута стратегія встановила нові цільові показники, включаючи скорочення викидів на 20 % до 2030 року, скорочення на 70 % до 2040 року (порівняно з рівнями 2008 року) та досягнення нульових чистих викидів до 2050 року [6]. У цьому контексті на технологію руху з використанням вітрил-крил звернули увагу в судноплавстві та суднобудівній галузях за її екологічно чисті та стійкі переваги. Ця технологія використовує відновлювану енергію вітру, знижуючи витрату палива без створення додаткових викидів діоксиду карбону на борту. Цілі сталого розвитку в суднопластві стають все більш значущими, подальші дослідження інноваційних конструкцій вітрил-крил можуть сприяти ширшому впровадженню цього екологічно чистого рішення в суднопластві. Для досягнення цих цілей розробляються технології експлуатації суден, здатні використовувати різні варіанти декарбонізації судноплавства. Вітрова енергетика стає невід'ємною частиною перехідного процесу щодо зниження викидів діоксиду карбону для роботи в поєднанні з іншими альтернативними видами палива. Розроблені різні технології використання вітрової енергії (WASP), відкрито нові можливості їх використання. Оцінено потенціал економії палива різними технологіями WASP та проаналізовано експлуатаційні фактори в різних умовах для різних технологій WASP. Інновації WASP можуть доповнювати існуючі технології на ранній стадії впровадження декарбонізації. Перехід до технологій WASP розпочався завдяки кластеру відданих своїй справі промислових та академічних учасників. З цього моменту з'явився більший потенціал, якого необхідно реалізувати, перш ніж технології WASP досягнуть запропонованого рівня поширення (3 700–10 700 суден у 2030 році) [7] і (37 000–40 000 суден до 2050 року) [8].

Сучасні технології та інновації дають можливість використовувати енергію вітру більш ефективно, ніж традиційні вітрила минулих століть. Суднопластву запропоновано чотири види сучасних вітряних установок: жорсткі вітрила: економія від 5 до 60 %; буксирувальні кайти економія від 1 до 50 %, ротори: економія від 0,4 до 50 %; Роторний корабель – це корабель,

на якому використовується ефект Магнуса для руху. Корабель наводиться в рух, за участю вертикальних роторів з електроприводом, іноді роторними вітрилами. Німецький інженер Антон Флеттнер був першим, хто збудував корабель, який спробував використати цю силу для руху. Кораблі, які використовують цей тип ротора, іноді називають кораблями Флеттнера. Ротори встановлюються на великих кораблях. Їх можна встановити на стадії конструкції судна. Вітрові турбіни можуть заощадити від 1 до 4 %. Для малих суден оптимальними є Кайт-вітрила. Вони генерують у 25 разів більше тягове зусилля на квадратний метр порівняно із звичайним вітрилом. При сильному вітрі відповідає потужності приводу, до 2000 кВт та економія палива становить від 4,2 до 35 %; при цьому вона не впливає на стійкість судна [9–10]. Спостерігається тенденція до поширення технологій вітрової енергетики. Однак, впровадження сьогодні становлять лише невеликий відсоток від загальної кількості судів в активному стані.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Різні технології мають різні експлуатаційні характеристики у різних умовах. Необхідно провести дослідження з реальним комерційним впровадженням, щоб краще зрозуміти низку експлуатаційних факторів, що впливають на продуктивність технології WASP. До таких факторів належать довкілля та бортові та комерційні фактори, які тісно пов'язані з факторами, що впливають на вибір конкретного продукту WASP щодо використання вітру та його сумісності з експлуатацією судна. Зелений перехід спричиняє значні проблеми і потребує великих інвестицій для організації досліджень. Важливим аспектом, що заслуговує на вивчення, є безпека вітрових установок при їх експлуатації. Дослідження мають бути зосереджені на структурованій оцінці безпеки кожної вітрової технології [11].

Проводяться дослідження та заплановані роботи з проектування вітрильних вантажних суден, що повністю працюють без використання палива. Судна розробляються компанією B9 Shipping, яка входить до групи компаній B9 Energy. Програма фундаментальних випробувань проводиться у підрозділі Вольфсона з морських технологій та промислової аеродинаміки (WUMTIA) при Університеті Саутгемптона, який вже понад 40 років надає інноваційні знання у галузі морських технологій та промислової аеродинаміки клієнтам по всьому світу [12].

Новий спосіб зниження витрати палива, викидів та витрат на бункерування шукає норвезький інженер Терье Ладе, керуючий директором компанії Lade AS: з Vindskip він спроектував тип судна, яке не використовує важке паливо, а використовує вітер для руху. Родзинка: корпус вантажного судна служить вітрилом-крилом. У відкритому морі Vindskip виграє від

вільного вітру, що робить його дуже енергоефективним. Для проходів при слабкому вітрі, щоб маневрувати судном у відкритому морі, а також підтримувати постійну швидкість, воно оснащено екологічно чистим та економічним репульсивним обладнанням, яке працює на зрідженому природному газі (ЗПГ). Завдяки поєднанню вітру та зрідженого природного газу як альтернативне паливо важкого палива, витрата палива оцінюється в середньому всього в 60 відсотків від базових витрат палива судна. Викиди діоксиду карбону скорочуються на 80 відсотків, згідно з розрахунками норвезької компанії [13].

У судноплавній галузі розроблено технологію експлуатації жорстких вітрил. Останніми роками у розвиток технології руху з допомогою жорсткого вітрила розробляються технології їх складання. У серпні 2023 року складний двоелементний крилатий вітрило «Wing 560» розроблений Oceanbird, отримав принципове схвалення (AiP) від класифікаційного товариства DNV. Він складається з двох елементів, основного корпусу та закрилка, та може оптимізувати аеродинамічні сили за рахунок створення профілів вигину. Одне жорстке вітрило на судні RoRo за нормальної швидкості може знизити витрату палива від головного двигуна на 7–10 % на сприятливих океанських маршрутах. Що дозволяє заощадити 600 тонн дизельного палива на рік, що відповідає приблизно 1920 тон CO₂. У жовтні 2023 року балкер був оснащений чотирма складними триелементними крилами-вітрилами «WindWings», які були розроблені BARTech з метою використання енергії вітру для зниження витрат палива та викидів CO₂. Кожен із чотирьох «WindWings» має ширину 20 м та висоту 37,5 м, а загальна площа поверхні чотирьох крил становить 3000 квадратних метрів. Він складається з трьох елементів: носа, основного корпусу та закрилка, а також може створювати вигини шляхом обертання носа та закрилка. WindWings може економити до 20 % палива, скорочуючи викиди CO₂ на 19,5 тон на день на середньому світовому маршруті. Подібність між «Wing 560» і «WindWings» полягає в тому, що обидва можуть утворювати різні конфігурації складання за допомогою кутів вигину, тим самим повністю використовуючи допоміжні характеристики. Однак заощадження дуже чутливі до вхідного потоку повітря, що призводить до труднощів практичної експлуатації; тому необхідні дослідження з цих питань. Завдяки досягненням у галузі комп'ютерних технологій характеристики крилатого вітрила можна вивчати за допомогою інструментів моделювання CFD, пропонуючи недороге рішення з точки зору часу та обладнання, порівняно з модельними випробуваннями. Продовжується вивчення аеродинамічних і тягових характеристик жорстких вітрил у розгорнутому стані, а також їх вплив АОА і кута вітру, що здається, на коефіцієнти підйомної сили, опору і тяги. Щоб

знайти цільову доладну конфігурацію, яка забезпечує максимальний коефіцієнт тяги. Крім того, результати аеродинамічних та тягових характеристик будуть всебічно проаналізовані з урахуванням відповідних характеристик деталей потоку [14].

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета та задачі дослідження – аналіз можливості додаткового скорочення викидів діоксиду карбону при експлуатації водного транспорту, обладнаного жорсткими вітрилами в поєднанні з встановленням плівкових сонячних панелей на їх поверхні.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Огляд опублікованих результатів досліджень, присвячених особливостей конструкції жорстких вітрил встановлених на суднах. Аналіз та визначення можливості поєднання експлуатації жорстких вітрил з фотогенеруючим покриттям. Об'єктом дослідження обрано складний двоелементний крилатий вітрило «Wing 560» розроблений Oceanbird. Предмет дослідження – визначення можливості поєднання експлуатації жорстких вітрил з фотогенеруючим плівкових покриттям з перовскиту.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

При дослідженні особливостей конструкції жорстких вітрил встановлених на суднах проаналізували можливість встановлення сонячних батарей на їх поверхні. Сонячна фотоелектрична промисловість пропонує сонячні елементи на основі пластин першого покоління, що складаються з кремнію (монокристалічний кремній c-Si, полі- або мультикристалічний кремній p-Si). Сонячні елементи другого покоління складаються з тонких плівок телуриду кадмію (CdTe), аморфного кремнію (a-Si), арсеніду галію (GaAs) та мідь-індій-галій-селеніду (CIGS). Сонячні елементи третього покоління створені на основі нанокристалів, мідь-цинк-оловосульфід (CZTS), сенсibilізовані барвником сонячні елементи (DSSC), перовскітні сонячні елементи (PSC), органічні фотовольтаїчні елементи (OPV). Сонячні елементи третього покоління є найперспективнішими. Однак залишається суттєва проблема генерації, довговічності, надійності та ціни [15; 16].

Серед різних типів фотоелектричних пристроїв 3-го покоління PS перовскітні сонячні елементи є більш перспективними для їх використання в судноплавстві. структурою, яка показала стабільну роботу в умовах навколишнього середовища з високою вологістю (50–65 %) протягом 1000 годин. стабільність і ефективність плівок [18; 19]. Нещодавно виготовили пристрої, які зберігали майже 90 % своєї первісної ефективності після 500 годин безперервного впливу світла. Si, CdTe і GaAs, однак стабільність поки не співставна з комерційними сонячними елементами освітлення [20; 21] Проведено дослідження

з вивчення раціональної стратегії щодо використання низькомолекулярних пасиваторів, які одночасно покращують пасивацію дефектів та термічну стабільність перовскітів, тим самим вирішуючи загальну проблему нестабільності в ПСК Ця інноваційна стратегія молекулярного дизайну є революційним кроком на шляху до створення більш надійних та ефективних перовскітних фотоелектричних систем [22]. Компанія Oxford PV оголосила про комерціалізацію перших 72-елементних панелей для встановлення в комунальних масштабах з використанням перовскітних сонячних батарей на кремнії, які можуть виробляти на 20 % більше енергії, ніж звичайні кремнієві панелі [23].

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

У судноплавстві можливе впровадження жорстких вітрил з поєднанням з легкими та тонкими сонячними панелями з перовскіту. Що дозволить використовувати додаткову кількість альтернативної енергетики під час експлуатації суден.

Установка сонячних панелей може накопичити від 30 Вт до 200Вт на годину на одному кв.м в залежності від інтенсивності сонячного випромінювання. При експлуатації жорстких вітрил на судні кількість сонячної енергетики також буде залежати і від позиції вітрил по відношенню до сонця. Максимальну кількість сонячної енергетики можна накопичувати в сонячні дні, при горизонтальному положенні вітрил під певним кутом. У горизонтальному положенні вони перебувають під час вантажних операцій. А також жорсткі вітрила можна розташувати горизонтально у випадках, коли судно рухається проти вітру. На разі у таких випадках доцільно накопичувати сонячну енергію.

Визначили можливе додаткове накопичення альтернативної енергетики при поєднанні жорстких вітрил із плівковими сонячними панелями з перовскіту. Розрахунки здійснили для судна, яке експлуатується з 2023 року. На цьому судні було встановлено два жорсткі вітрила. Кожен з яких висотою 37.5 м та шириною 20 м. Площа двох вітрил становить 1500 м². Отже, можлива максимальна кількість сонячної енергетики, накопичена жорсткими вітрилами за годину, за наявності двох жорстких вітрил на судні, становить 30 кВт, а мінімальна 4.5 кВа. Якщо судно здійснює вантажні операції протягом трьох діб у південних регіонах, за цей період можливе накопичення до однієї тисячі кВт альтернативної енергетики. У північних регіонах при попутному вітри кількість накопиченої сонячної енергетики буде значно меншою. Але якщо напрям вітру протилежний, жорсткі вітрила, перебуваючи в горизонтальному положенні, можуть накопичувати сонячну електроенергію при поєднанні з плівковими панелями. На суднах з великим дедвейтом, можливе встановлення чотирьох жорстких вітрил. У разі кількість накопиченої альтернативної енергетики подвоюється.

При експлуатації судна потрібне використання певної кількості електроенергії. Для її отримання використовуються дизель-генератори різних виробників. Для їх роботи використовується викопне паливо. Суднові дизель генератори електроенергії використовують від 20 до 100 кг палива на годину. При цьому можна отримати від 100 до 500 кВт на годину.

Сонячні панелі, встановлені на одному жорсткому вітрилі, може накопичити до 15 кВт на годину. За наявності двох вітрил відповідно 30 кВт, а при чотирьох до 60 кВт на годину. Плівкові панелі на чотирьох жорстких вітрилах можуть заощадити до 100 кг палива за годину і до однієї тони палива при вантажних операціях протягом трьох діб. Накопичену альтернативну електроенергію можна використовувати під час експлуатації судна. Накопичення сонячної енергії також можливе при знаходженні жорстких вітрил у горизонтальному положенні, коли судно рухається проти вітру. Сонячна електроенергія, накопичена сонячними панелями, дозволить заощадити до однієї тони викопного палива на добу при експлуатації судна. При спалюванні однієї тони викопного палива утворюється три тони діоксиду карбону. Така економія палива зменшує кількість викидів діоксиду карбону.

Судноплавна галузь активно шукає заходів щодо скорочення споживання викопного палива під час експлуатації суден. Концепції судноплавства з нульовими викидами в даний час є важливими питаннями для судновласників, судноплавних компаній і суднобудівників по всьому світу. Впроваджуються різні правила та ініціативи, спрямовані на скорочення викидів діоксиду карбону. Прикладами цього є зони контролю викидів (ЕСА) та обмеження вмісту сірки в морському паливі, яке набуло чинності у 2020 році. Крім того, Міжнародна морська організація (ІМО) намітила стратегію скорочення викидів парникових газів, а Європейський Союз (ЄС) представив свій власний план щодо скорочення викидів парникових газів, пов'язаних із судноплавством.

Сьогодні на морі, як і на суші, використання відновлюваної енергії сприймається як частина енергетичного балансу. Можливе поєднання енергії вітру та сонця, яке відіграє важливу роль у скороченні використання викопного палива та викидів парникових газів у судноплавстві. Замість того, щоб мати корабель із жорсткими вітрилами або корабель із сонячними панелями, доцільніше спроектувати систему, яка може використовувати енергію вітру та сонця одночасно. Енергії вітру і сонця можна використовувати на круїзних суднах, туристичних катамаранах, рибальських суднах, дослідних судах, нафтових танкерах, вантажних суднах, суднах типу «ро-ро», і пасажирських поромках. Ідея об'єднання енергії вітру та сонця не нова, у 1990-х роках у США було видано патент на концепцію електросудна на сонячних батареях, яка включала традиційне м'яке вітрило, оснащене фотоелектричними елементами. Ідеї та концепції,

які поєднують вітрила з сонячною енергією, ймовірно, існували ще до 1990-х років, проте досі жодна комбінована система вітрової та сонячної енергії, що включає жорсткі вітрила, не була розгорнута на борту великого судна [24].

Жорсткі вітрила сконструйовані з двох елементів, основного корпусу та закрилка, для максимального ефективного використання сили вітру. На таких вітрилах доцільна установка пливчастих сонячних панелей, яких можна встановити на увігнутій поверхні та мають мінімальну масу. Складність розробки такого рішення полягає у подоланні багатьох практичних проблем, що виникають при спробі використовувати вітрила та сонячні панелі на великих суднах, що працюють у суворих морських умовах.

Для вирішення проблеми необхідно розробити інтегровані системи жорстких вітрил, сонячних панелей, модулів зберігання енергії та морських акумуляторів, які дозволять судам використовувати енергію вітру та сонця.

Розробка плівкових перовскітних сонячних елементів є перспективними для їх використання у судноплавстві. Пристрої характеризуються стабільною структурою, яка показала стабільну роботу в умовах навколишнього середовища з високою вологістю (50–65 %) протягом 1000 годин. Перовскітні панелі характеризуються стабільністю і істотно не впливають на масу жорстких вітрил. Особливості перовскітних плівкових панелей дозволять більш успішно поєднувати використання вітрової енергії у поєднанні із сонячною енергією. Жорсткі вітрила вже встановлюються на нових судах. На палубах суден мало площі для встановлення сонячних панелей. Однак можна використовувати площу поверхні жорстких вітрил для генерації додаткової альтернативної енергетики.

ВИСНОВКИ

Жорсткі вітрила вже встановлюються на нових судах. На палубах суден мало площі для встановлення сонячних панелей. Однак можна використовувати площу поверхні жорстких вітрил для накопичення додаткової альтернативної енергетики

Необхідно продовжити дослідження з реальним комерційним впровадженням, щоб краще зрозуміти низку експлуатаційних факторів, що впливають на продуктивність технології вітрил. Крім того, необхідно провести більше досліджень, щоб встановити співвідношення ризику та прибутковості технології WASP та те, як вона сприяє операційному хеджуванню судновласників та операторів. При розробці технології комбінованого використання вітрової та сонячної енергетики у судноплавстві можливе значне зниження викидів діоксиду карбону під час експлуатації суден. Для цього необхідно створення інтегрованої системи жорстких вітрил, сонячних панелей морського класу, модулів зберігання енергії, системи зарядки і морських комп'ютерів, яка дозволяє судам використовувати енергію вітру в поєднанні з енергією сонця.

REFERENCES

- [1] Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental science and pollution research*, 29(28), 42539-42559. doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6
- [2] Goessling, H. F., Rackow, T., & Jung, T. (2025). Recent global temperature surge intensified by record-low planetary albedo. *Science*, 387(6729), 68–73. doi: 10.1126/science.adq72-80
- [3] Cham: Springer Nature Switzerland. Kumar, S., Chatterjee, U., David Raj, A., Sooryamol, K.R. (2023). Global Warming and Climate Crisis/Extreme Events. In: Chatterjee, U., Shaw, R., Kumar, S., Raj, A.D., Das, S. (eds) *Climate Crisis: Adaptive Approaches and Sustainability*. Sustainable Development Goals Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44397-8_1
- [4] United Nations Conference on Trade and Development. (2018). Review of maritime transports 2018. Retrieved from <https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2018>
- [5] Smith, T.W., Jalkanen, J.P., Anderson, B.A., Corbett J.J., Faber J., Hanayama S., O'keeffe E, Parker S., Johansson L., Aldous L., Raucci C. Third IMO greenhouse gas study (2014). Research output: Book/Report › Commissioned report
- [6] Joung, T. H., Kang, S. G., Lee, J. K., & Ahn, J. (2020). The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas(GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 4(1), 1–7. <https://doi.org/10.1080/25725084.2019.1707938>
- [7] Nelissen, D.; Traut, M.; Köhler, J.; Mao, W.; Faber, J.; Ahdour, S. Study on the Analysis of Market Potentials and Market Barriers for Wind Propulsion Technologies for Ships. Available online: <https://research.chalmers.se/en/publication/245854> (accessed on 28 February 2025)
- [8] Frontier Economics, Reducing the Maritime Sector's Contribution to Climate Change and Air Pollution: Economic Opportunities from Low and Zero Emission Shipping. London, UK. 2019. Available online: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/815666/economic-opportunities-low-zero-emission-shipping.pdf (accessed on 14 March 2025).
- [9] Kaldellis, J. K., & Zafirakis, D. (2011). The wind energy evolution: A short review of a long history. *Renewable energy*, 36(7), 1887–1901. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.002>
- [10] Willis, D. J., Niezrecki, C., Kuchma, D., Hines, E., Arwade, S. R., Barthelmie, R. J., ... & Rotea, M. (2018). Wind energy research: State-of-the-art and future research directions. *Renewable Energy*, 125, 133–154. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.049>
- [11] Chou, T., Kosmas, V., Acciaro, M., & Renken, K. (2021). A comeback of wind power in shipping: An economic and operational review on the wind-assisted ship propulsion technology. *Sustainability*, 13(4), 1880. <https://doi.org/10.3390/su13041880>
- [12] Work starts on fossil fuel free cargo ship set to transform shipping industry https://phys.org/news/2012-06-fossil-fuel-free-cargo-ship.html#google_vignette (accessed on 28 February 2025)
- [13] Wind-powered freighter <https://phys.org/news/2015-01-wind-powered-freighters.html> (accessed on 28 February 2025)
- [14] Jiang, Y., Cao, C., Cui, T., Yang, H., & Tian, Z. (2024). Numerical Study on Auxiliary Propulsion Performance of Foldable Three-Element Wingsail Utilizing Wind Energy. *Energies*, 17(15), 3833. <https://doi.org/10.3390/en17153833>
- [15] King, D. J. Browne, J. R. Layard, R. G. O'Donnell, G. M. Rees M., N. Stern and A. Turner, A global Apollo programme to combat climate change, London School of Economics and Political Science, 2015 <https://cepr.org/voxeu/columns/case-global-apollo-programme-limit-climate-change> (accessed on 28 February 2025)
- [16] Fu, H. C., Ramalingam, V., Kim, H., Lin, C. H., Fang, X., Alshareef, H. N., & He, J. H. (2019). MXene-contacted silicon solar cells with 11.5% efficiency. *Advanced Energy Materials*, 9(22), 1900180. <https://doi.org/10.1002/aenm.201900180>
- [17] Zhou, H., Chen, Q., Li, G., S. Luo, S., et al. (2014). Interface engineering of highly efficient perovskite solar cells, *Science*, 345, 542–546. doi: 10.1126/наука.1254050
- [18] Chen, W., Wu, Y., Fan, J. (2018). Understanding the doping effect on NiO: toward high-performance inverted perovskite solar cells, *Adv. Energy Mater.*, №8, pp.1703519W <https://doi.org/10.1002/aenm.201703519>
- [19] Chen, W., Zhou, Y., Chen, Y., et al. (2019) Alkali chlorides for the suppression of the interfacial recombination in inverted planar perovskite solar cells, *Adv. Energy Mater.*, 9, 1803872W. <https://doi.org/10.1002/aenm.201803872>
- [20] Kim, H., Morales, C. A. F., Seong, S., Hu, Z., Muyanjan, N., Penukula, S., ... & Gong, X. (2024). Molecular design of defect passivators for thermally stable metal-halide perovskite films. *Matter*, 7(2), 539–549.
- [21] Min, H., Lee, D. Y., Kim, J., Kim, G., et al. (2021). Perovskite solar cells with atomically coherent interlayers on SnO₂ electrodes, *Nature*, 598(7881), 444–450 <https://doi.org/10.1002/cssc.202100083>
- [22] Kim, Hongki et al (2024). Molecular design of defect passivators for thermally stable metal-halide perovskite films *Matter*, 7, 2, 539–549 <https://doi.org/10.1016/j.matt.2023.12.003>
- [23] Giuri, Antonella et al. (2024). The path toward metal-halide perovskite industrialization, *Cell Reports Physical Science*, 5, 10, 102245 doi: 10.1016/j.xcrp.2024.102245
- [24] Rigid sail & solar power technologies to reduce fuel consumption and ship emissions <https://www.ecomarinepower.com/en/aquarius-system> (accessed on 28 February 2025)

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental science and pollution research*, 29(28), 42539–42559. doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6
- [2] Goessling, H. F., Rackow, T., & Jung, T. (2025). Recent global temperature surge intensified by record-low planetary albedo. *Science*, 387(6729), 68–73. a. doi: 10.1126/science.adq72-80
- [3] Cham: Springer Nature Switzerland. Kumar, S., Chatterjee, U., David Raj, A., Sooryamol, K.R. (2023). Global Warming and Climate Crisis/Extreme Events. In: Chatterjee, U., Shaw, R., Kumar, S., Raj, A.D., Das, S. (eds) Climate Crisis: Adaptive Approaches and Sustainability. Sustainable Development Goals Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44397-8_1
- [4] United Nations Conference on Trade and Development. (2018). Review of maritime transports 2018. Retrieved from https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2018
- [5] Smith, T.W., Jalkanen, J.P., Anderson, B.A., Corbett J.J., Faber J., Hanayama S., O'keeffe E, Parker S., Johansson L., Aldous L., Raucci C. Third IMO greenhouse gas study (2014). Research output: Book/Report › Commissioned report
- [6] Joung, T. H., Kang, S. G., Lee, J. K., & Ahn, J. (2020). The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas(GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 4(1), 1–7. https://doi.org/10.1080/25725084.2019.1707938
- [7] Nelissen, D.; Traut, M.; Köhler, J.; Mao, W.; Faber, J.; Ahdour, S. Study on the Analysis of Market Potentials and Market Barriers for Wind Propulsion Technologies for Ships. Available online: https://research.chalmers.se/en/publication/245854 (accessed on 28 February 2025)
- [8] Frontier Economics, Reducing the Maritime Sector's Contribution to Climate Change and Air Pollution: Economic Opportunities from Low and Zero Emission Shipping. London, UK. 2019. Available online: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/815666/economic-opportunities-low-zero-emission-shipping.pdf (accessed on 14 March 2025).
- [9] Kaldellis, J. K., & Zafirakis, D. (2011). The wind energy evolution: A short review of a long history. *Renewable energy*, 36(7), 1887–1901. https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.002
- [10] Willis, D. J., Niezrecki, C., Kuchma, D., Hines, E., Arwade, S. R., Barthelmie, R. J., ... & Rotea, M. (2018). Wind energy research: State-of-the-art and future research directions. *Renewable Energy*, 125, 133–154. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.049
- [11] Chou, T., Kosmas, V., Acciaro, M., & Renken, K. (2021). A comeback of wind power in shipping: An economic and operational review on the wind-assisted ship propulsion technology. *Sustainability*, 13(4), 1880. https://doi.org/10.3390/su13041880
- [12] Work starts on fossil fuel free cargo ship set to transform shipping industry https://phys.org/news/2012-06-fossil-fuel-free-cargo-ship.html#google_vignette (accessed on 28 February 2025)
- [13] Wind-powered freighter https://phys.org/news/2015-01-wind-powered-freighters.html(accessed on 28 February 2025)
- [14] Jiang, Y., Cao, C., Cui, T., Yang, H., & Tian, Z. (2024). Numerical Study on Auxiliary Propulsion Performance of Foldable Three-Element Wingsail Utilizing Wind Energy. *Energies*, 17(15), 3833. https://doi.org/10.3390/en17153833
- [15] King, D. J. Browne, J. R. Layard, R. G. O'Donnell, G. M. Rees M., N. Stern and A. Turner, A global Apollo programme to combat climate change, London School of Economics and Political Science, 2015. https://cepr.org/voxeu/columns/case-global-apollo-programme-limit-climate-change (accessed on 28 February 2025)
- [16] Fu, H. C., Ramalingam, V., Kim, H., Lin, C. H., Fang, X., Alshareef, H. N., & He, J. H. (2019). MXene-contacted silicon solar cells with 11.5% efficiency. *Advanced Energy Materials*, 9(22), 1900180. https://doi.org/10.1002/aenm.201900180
- [17] Zhou, H., Chen, Q., Li, G., S. Luo, S., et al. (2014). Interface engineering of highly efficient perovskite solar cells, *Science*, 345, 542–546. doi: 10.1126/наука.1254050
- [18] Chen, W., Wu, Y., Fan, J. (2018). Understanding the doping effect on NiO: toward high-performance inverted perovskite solar cells, *Adv. Energy Mater.*, №8, pp.1703519W. https://doi.org/10.1002/aenm.201703519
- [19] Chen, W., Zhou, Y., Chen, Y., et al. (2019) Alkali chlorides for the suppression of the interfacial recombination in inverted planar perovskite solar cells, *Adv. Energy Mater.*, 9, 1803872W. https://doi.org/10.1002/aenm.201803872
- [20] Kim, H., Morales, C. A. F., Seong, S., Hu, Z., Muyanja, N., Penukula, S., ... & Gong, X. (2024). Molecular design of defect passivators for thermally stable metal-halide perovskite films. *Matter*, 7(2), 539–549
- [21] Min, H., Lee, D. Y., Kim, J., Kim, G., et al. (2021). Perovskite solar cells with atomically coherent interlayers on SnO₂ electrodes, *Nature*, 598(7881), 444–450. https://doi.org/10.1002/cssc.202100083
- [22] Kim, Hongki et al (2024). Molecular design of defect passivators for thermally stable metal-halide perovskite films *Matter*, 7, 2, 539–549. https://doi.org/10.1016/j.matt.2023.12.003
- [23] Giuri, Antonella et al. (2024). The path toward metal-halide perovskite industrialization, *Cell Reports Physical Science*, 5, 10, 102245 doi: 10.1016/j.xcrp.2024.102245
- [24] Rigid sail & solar power technologies to reduce fuel consumption and ship emissions https://www.ecomarinepower.com/en/aquarius-system (accessed on 28 February 2025)

© Кірсанова В. В.

Дата надходження статті до редакції: 20.05.2025

Дата затвердження статті до друку: 11.06.2025