

УДК 629.5.064.6:662.767

РОЗРОБЛЕННЯ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМУ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЕВОГО ПАЛИВА В СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ

Канд. техн. наук М. П. Булгаков, д-р техн. наук О. М. Мельник,
асп. Д. А. Волошин

DEVELOPMENT OF AN ADAPTIVE ALGORITHM FOR THE USE OF HYDROGEN FUEL IN SHIP POWER PLANTS

PhD (Tech.) M. Bulgakov, Dr. Sc. (Tech.) O. Melnyk,
postgraduate student D. Voloshin

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327172>



***Анотація.** Використання водневого палива набуває все більшого значення як напрям розвитку екологічно безпечних технологій у сфері морських перевезень. Завдяки своїй високій енергоефективності та здатності суттєво знижувати рівень викидів шкідливих речовин водень стає перспективним джерелом енергії для суднових енергетичних систем. У цій роботі подано вдосконалений метод оптимізації застосування водню в суднових двигунах, що*

охоплює аналіз термодинамічних процесів, параметрів подавання пального та умов експлуатації.

Алгоритм базований на інтегрованому підході для всіх етапів роботи з воднем, включаючи його виробництво, зберігання, використання та утилізацію. Це дає змогу зменшити енергетичні втрати і підвищити ефективність роботи суднових енергетичних установок. Математична модель, розроблена в рамках дослідження, враховує основні чинники, що впливають на функціонування водневих двигунів, серед яких ефективність використання пального, оптимальні умови зберігання та вплив на навколишнє середовище.

Модель також аналізує технічні аспекти інтеграції водневих систем у сучасний морський флот, включаючи необхідні технологічні зміни, економічну ефективність і екологічні переваги. Крім того, досліджено перспективи впровадження водневих паливних елементів у судноплавстві та їхній потенціал для модернізації сучасних суден.

Результати проведеного дослідження можуть стати основою для створення стратегій переходу на альтернативні джерела енергії в морському транспорті та впровадження ефективніших технологій управління енергією. Зменшення залежності від традиційних видів пального та зниження рівня парникових викидів сприятиме формуванню більш екологічно чистого та енергоефективного флоту, що відповідатиме сучасним міжнародним екологічним стандартам і вимогам.

Ключові слова: водневе паливо, воднева енергетика, морська логістика, ресурсна ефективність, судновий двигун.

Abstract. The use of hydrogen fuel is becoming increasingly important as a direction for the development of environmentally friendly technologies in the field of maritime transport. Due to its high energy efficiency and ability to significantly reduce the level of harmful substances emissions, hydrogen is becoming a promising source of energy for ship power systems. This paper presents an improved method for optimising the use of hydrogen in marine engines, which includes the analysis of thermodynamic processes, fuel supply parameters and operating conditions.

The developed algorithm is based on an integrated approach to all stages of hydrogen operations, including its production, storage, use and utilisation. This helps to reduce energy losses and improve the efficiency of ship power plants. The mathematical model developed as part of the study takes into account the main factors affecting the operation of hydrogen engines, including fuel efficiency, optimal storage conditions and environmental impact.

The model also analyses the technical aspects of integrating hydrogen systems into a modern maritime fleet, including the necessary technological changes, cost-effectiveness and environmental benefits. In addition, the prospects for the introduction of hydrogen fuel cells in shipping and their potential for modernising existing ships are explored.

The results of this study can serve as a basis for developing strategies for the transition to alternative energy sources in maritime transport and the introduction of more efficient energy management technologies. Reducing the dependence on traditional fuels and reducing greenhouse gas emissions will contribute to the formation of a more environmentally friendly and energy efficient fleet that will meet modern international environmental standards and requirements.

Keywords: hydrogen fuel, hydrogen energy, maritime logistics, resource efficiency, marine engine.

Вступ. Сучасні екологічні виклики та міжнародні вимоги щодо декарбонізації транспорту стимулюють пошук альтернативних джерел енергії для морської

галузі. Одним із найбільш перспективних рішень є використання водневого палива, що має високу енергоефективність і не утворює викидів CO₂ під час згоряння.

Впровадження водневих технологій у судноплавство може суттєво знизити негативний вплив галузі на довкілля та сприяти досягненню цілей Міжнародної морської організації щодо зменшення парникових газів.

Проте широке використання водню в судових енергетичних установках супроводжується низкою технічних і економічних викликів – складність процесів зберігання і транспортування, необхідність адаптації паливних систем, безпека експлуатації та вартість виробництва водню є основними аспектами, що визначають можливості його застосування.

У статті досліджено можливості застосування водневого палива в морському транспорті, виділено технологічні аспекти його зберігання, подавання та процесу згоряння. Окремо розглянуто алгоритм, що дає змогу оптимізувати роботу судових двигунів, забезпечуючи ефективніше використання водню. Запропонована математична модель сприяє зменшенню енергетичних втрат і мінімізації рівня шкідливих викидів. Отримані результати можуть стати основою для подальшого розроблення рішень про перехід морської галузі на екологічно безпечні джерела енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Глобальні зусилля зі зниження викидів вуглецю в морському транспорті зумовили необхідність пошуку та впровадження новітніх паливних технологій. Водневе паливо займає головне місце серед перспективних рішень завдяки високій енергетичній щільності, відсутності викидів CO_2 зі згорянням і здатності знижувати рівень викидів NO_x і SO_x [1]. Водночас застосування водню в судових енергетичних установках стикається з низкою технічних викликів, таких як забезпечення зберігання, складність процесів упорскування та необхідність удосконалення технологій згоряння [2, 3].

Сучасна наукова спільнота активно досліджує аспекти використання водневого палива в судноплавстві, що підтверджено

численними працями, присвяченими економічній доцільності та технічним викликам впровадження водню в морські енергетичні системи [4]. Актуальність теми посилена в контексті глобальної стратегії декарбонізації судноплавства [5].

Одним із основних напрямів є вивчення економічної конкурентоспроможності водневого палива порівняно з традиційними вуглеводневими джерелами енергії. Аналіз витрат на виробництво, транспортування та зберігання водню демонструє значні виклики, пов'язані з обмеженістю інфраструктури та потребою в нових логістичних рішеннях [6, 7]. Проте деякі дослідження показують, що зі зростанням попиту на екологічно чисті види пального водень може стати економічно вигідним варіантом для морських перевезень [8, 9].

У технічному аспекті значну увагу приділяють пошуку оптимальних технологій зберігання водню. Варіанти включають зберігання стисненого, зрідженого водню або у вигляді гідридів, кожен із яких має свої переваги та обмеження щодо безпеки, ефективності використання енергії та простору на борту суден [10, 11]. Також активно вивчають можливість інтеграції паливних елементів у морські енергетичні системи для підвищення загальної енергоефективності флоту [12].

Окремий напрям досліджень присвячений впливу водневого палива на роботу судових двигунів і ефективність процесів згоряння. Аналізують можливості модифікації сучасних дизельних двигунів для спільного використання водню і традиційного пального, що дасть змогу забезпечити поступовий перехід до повністю водневих енергетичних установок [13, 14]. Додатково вивчають аспекти оптимізації подавання та спалювання водню з метою мінімізації утворення оксидів азоту за високотемпературного згоряння [15, 16].

Важливим аспектом досліджень є оцінювання екологічного впливу водневих

технологій, оскільки вони здатні значно зменшити викиди парникових газів і сприяти зниженню впливу судноплавства на зміну клімату [17, 18]. Разом із тим існує необхідність розроблення міжнародних стандартів і регламентів для забезпечення використання водню в морській галузі [19, 20].

Аналіз наукових джерел демонструє значний потенціал впровадження водневого палива в морський транспорт, але також вказує на низку проблем, пов'язаних із його зберіганням, транспортуванням, безпекою та ефективністю використання. Завданням цього дослідження є розроблення методів оптимізації використання водню в суднових енергетичних системах, які враховують термодинамічні параметри, особливості зберігання і подавання пального, а також експлуатаційні умови роботи суден.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності використання водневого палива в суднових енергетичних установках з урахуванням екологічних, технічних та економічних аспектів. Дослідження спрямоване на оптимізацію процесів зберігання, подавання та згоряння водню, що дасть змогу зменшити енергетичні втрати і рівень шкідливих викидів.

Для досягнення мети необхідно оцінити можливості використання водню як судового пального, проаналізувати сучасні технології його виробництва, транспортування та зберігання, визначити технічні виклики, пов'язані з інтеграцією водневих систем у морський транспорт, дослідити екологічні переваги та обмеження цього виду пального, а також сформулювати рекомендації щодо впровадження водневих технологій у судноплавстві відповідно до міжнародних стандартів.

Основна частина дослідження. Судноплавство є одним із найбільших джерел глобальних викидів парникових газів, на яке припадає приблизно 2,9 % загального обсягу викидів. Міжнародна

морська організація (ІМО) поставила перед собою амбітні цілі зі скорочення цих викидів, включаючи мету зменшити викиди парникових газів від судноплавства щонайменше на 50 % до 2050 року. На морський транспорт припадає близько 11 % світового споживання пального, або близько 10 мільйонів барелів на день. Слід зазначити, що в нинішній ситуації конкуренції між альтернативними видами пального судна багато в чому задають тренд на користь того чи іншого виду пального. Значні обсяги споживання пального морським транспортом виправдовують масове виробництво продуктів нафтопереробки, будівництво паливних баз та інфраструктури в цілому, задаючи курс на певний вид пального і спираючись на нього в інших сегментах ринку. Наприклад, після заборони використання судового мазуту у 2024 році залишиться тільки дизельне паливо. Це дає можливість морській транспортній галузі переглянути свою позицію в короткостроковій перспективі до цієї дати і зробити кроки, які більш активно адаптуватимуться до нових стандартів, у тому числі в контексті розгляду альтернативних варіантів.

Водень є одним з альтернативних видів палива, досліджуваним для використання в судноплавстві. Як паливо, водень має низку переваг над традиційними викопними видами палива, такими як дизель і мазут. Однією з головних переваг є те, що зі спалюванням водню як побічний продукт утворюється лише вода, що робить його чистим паливом без викидів. Однак використання водню як пального в судноплавстві пов'язане з певними труднощами. Однією з найбільших проблем є зберігання і транспортування водню, який необхідно стискати або зріджувати для зберігання на борту судна. Для цього потрібне спеціалізоване обладнання та інфраструктура, які наразі обмежені. Іншою проблемою є вартість виробництва водню, яка все ще залишається відносно високою порівняно з традиційними видами пального.

Однак очікують, що з удосконаленням технологій виробництва і зберігання водню та зростання попиту на екологічно чисту енергію вартість водню знижуватиметься.

Безсумнівно, необхідні більш точні і ретельні дослідження для оцінювання впливу альтернативних видів пального на навколишнє середовище, починаючи від видобутку сировини і закінчуючи викидами в навколишнє середовище, щоб ухвалити рішення про вибір переважного виду пального для міжнародних морських перевезень. Окремим питанням є оцінювання наслідків розливів альтернативних видів пального, що потребує проведення лабораторних та експериментальних досліджень розливів, особливо за низьких температур, високих швидкостей вітру тощо. Додатковий інтерес становить ступінь довгострокового впливу сумішей альтернативних видів пального на

водне середовище. Екологічні проблеми і зростання цін на пальне призводять до необхідності пошуку нових рішень для судноплавства. Альтернатив не так багато. У той же час законодавство вже визначило умови використання ЗПГ (зрідженого природного газу), а потім метанолу та біопалива.

На думку експертів, розроблення Кодексу IGF для СПГ і водню не займе багато часу. Для того щоб відповідати вимогам до 2050 року, необхідно буде не тільки перевести флот на інше, екологічно чисте пальне, а й розробити нові технології для скорочення викидів парникових газів із суден. Водне паливо також стало потенційним рішенням для досягнення цих цілей, але його впровадження не позбавлене викликів. Повний цикл виробництва відновлюваного водню показано на рис. 1.

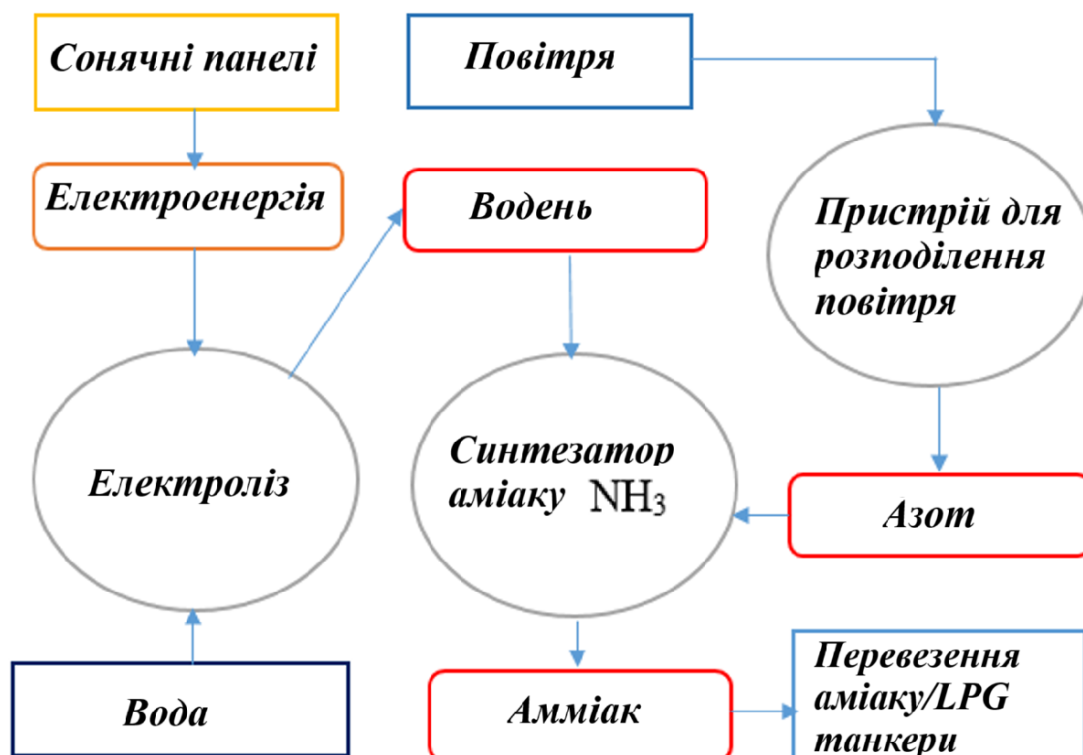


Рис. 1. Цикл виробництва відновлюваного водню

Однією з головних переваг водневого палива є його нульовий профіль викидів. Зі спалюванням водню єдиним побічним продуктом є водяна пара, що робить його чистим і відновлюваним джерелом енергії. Крім того, водневе паливо має високу енергетичну щільність, що означає, що воно може забезпечити більше енергії на одиницю ваги, ніж традиційні викопні види палива. Це може призвести до створення менших та ефективніших систем морських двигунів. H_2 – це більше, ніж просто ще один цікавий альтернативний варіант морського палива, який активно розглядають для використання на судах. Водень або зріджують (кріогенна рідина з температурою $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$) і поміщають у компресійні баки, або зберігають у вигляді хімічної сполуки. Сьогодні H_2 отримують з природного газу та шляхом електролізу. Останнє можна здійснювати на сонячних і вітрових електростанціях одночасно з виробництвом електроенергії. Вироблений з відновлюваних джерел енергії водень стає одним із найчистіших видів палива, з нульовим рівнем викидів парникових газів. Найефективнішим генератором енергії для водню є паливні елементи. Виробництво як водню, так і паливних елементів добре розвинене, але вони все ще залишаються неконкурентоспроможними відносно ціни порівняно зі звичайними судовими двигунами.

Існує кілька поточних проєктів та ініціатив, що досліджують використання водневого палива на судах. У 2020 році у Франції було спущено на воду перше у світі судно на водневих паливних елементах, а кілька інших країн, включаючи Японію, Норвегію та Південну Корею, вже інвестують значні кошти в технологію використання водневого палива для судноплавства. Однак широке впровадження водневого палива на судах все ще перебуває на початковій стадії і

потребує подальшого технологічного прогресу та розвитку інфраструктури.

Водень – найбільш екологічно чисте паливо, вироблене з відновлюваних джерел енергії. Рідкий водень можна використовувати в майбутньому, але він має досить низьку об'ємну щільність енергії, що призводить до необхідності створення великих сховищ.

Стандарт Tier III стосується обмеження викидів оксидів азоту (NO_x) для суден, що працюють на СПГ або водні, з метою зменшення впливу судноплавства на навколишнє середовище. Для двигунів внутрішнього згоряння з циклом Отто, що працюють на СПГ або водні, обмеження викидів NO_x встановлено на рівні $3,4\text{ г/кВт}\cdot\text{год}$. Для досягнення стандарту Tier III для двигунів внутрішнього згоряння з циклом Отто, що працюють на СПГ або водні, необхідно використовувати різні технології для зниження викидів NO_x , такі як використання каталітичного нейтралізатора, систем рециркуляції вихлопних газів, систем високотемпературного згоряння тощо.

Тому для досягнення стандарту Tier III для двигунів внутрішнього згоряння з циклом Отто, що працюють на СПГ або водні, необхідно використовувати багато різних технологій зменшення викидів NO_x , щоб зробити ці двигуни менш шкідливими для навколишнього середовища. Що стосується викидів азоту, то двигуни внутрішнього згоряння з циклом Отто, що працюють на СПГ або водні, не потребують обладнання для очищення вихлопних газів, щоб відповідати стандарту Tier III. У більшості випадків двопаливні двигуни, що працюють за дизельним циклом, не прийнятні для виконання стандарту. Аналітичні дані про рівень викидів азоту за використання різних видів пального подані на рис. 2.

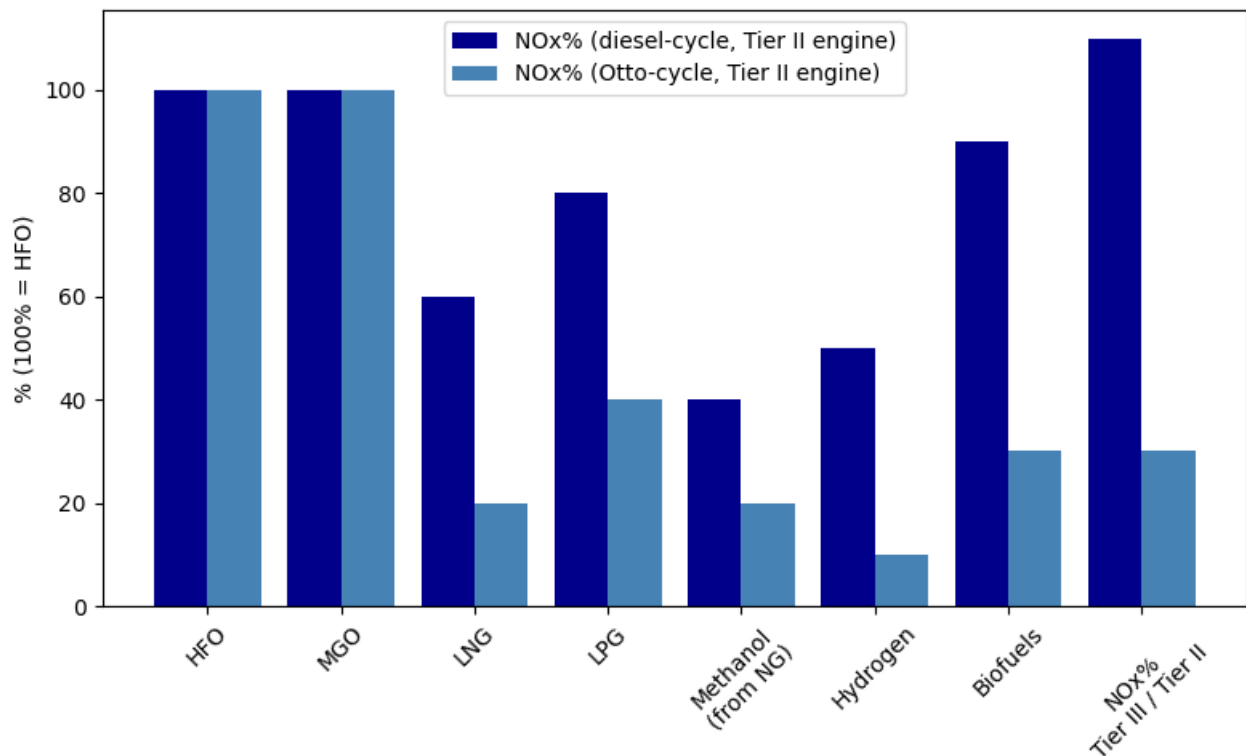


Рис. 2. Викиди азоту від різних видів палива
(джерело: DNV GL)

Потенційно водень можна використовувати у великих масштабах як пальне для кораблів. У найближчі 10-15 років очікують значного зниження собівартості виробництва безвуглецевого водню завдяки розвитку глобальної водневої економіки. Однак безпосереднє використання водню на великотоннажних судах – у двигунах внутрішнього згоряння або паливних елементах разом із електродвигунами – створює проблеми через його низьку об'ємну щільність. Для тривалого плавання зберігання водню потребуватиме занадто великого фізичного об'єму. Використання водневого палива на судах може бути досягнуто за допомогою такого циклу, що складається з виробництва, зберігання, паливних елементів і власне руху.

Алгоритм утилізації водню на морських судах – це складна система, яка

включає виробництво, зберігання, перетворення та утилізацію водню з мінімальними втратами. На першому етапі відбувається забір морської води, її фільтрація та підготовка до електролізу. Система автоматично підключає альтернативні джерела, такі як сонячні панелі, вітрогенератори або хвильові генератори, якщо наявної енергії недостатньо. Чистоту отриманого водню перевіряють перед тим як подати його до паливного елемента або ще раз очищають.

Алгоритм на рис. 3 охоплює повний цикл виробництва, зберігання, використання та утилізації водню на морському судні. Він описує моніторинг усіх етапів, адаптацію до мінливих умов та оптимізацію енергоспоживання. Опис алгоритму наведено в табл. 1.

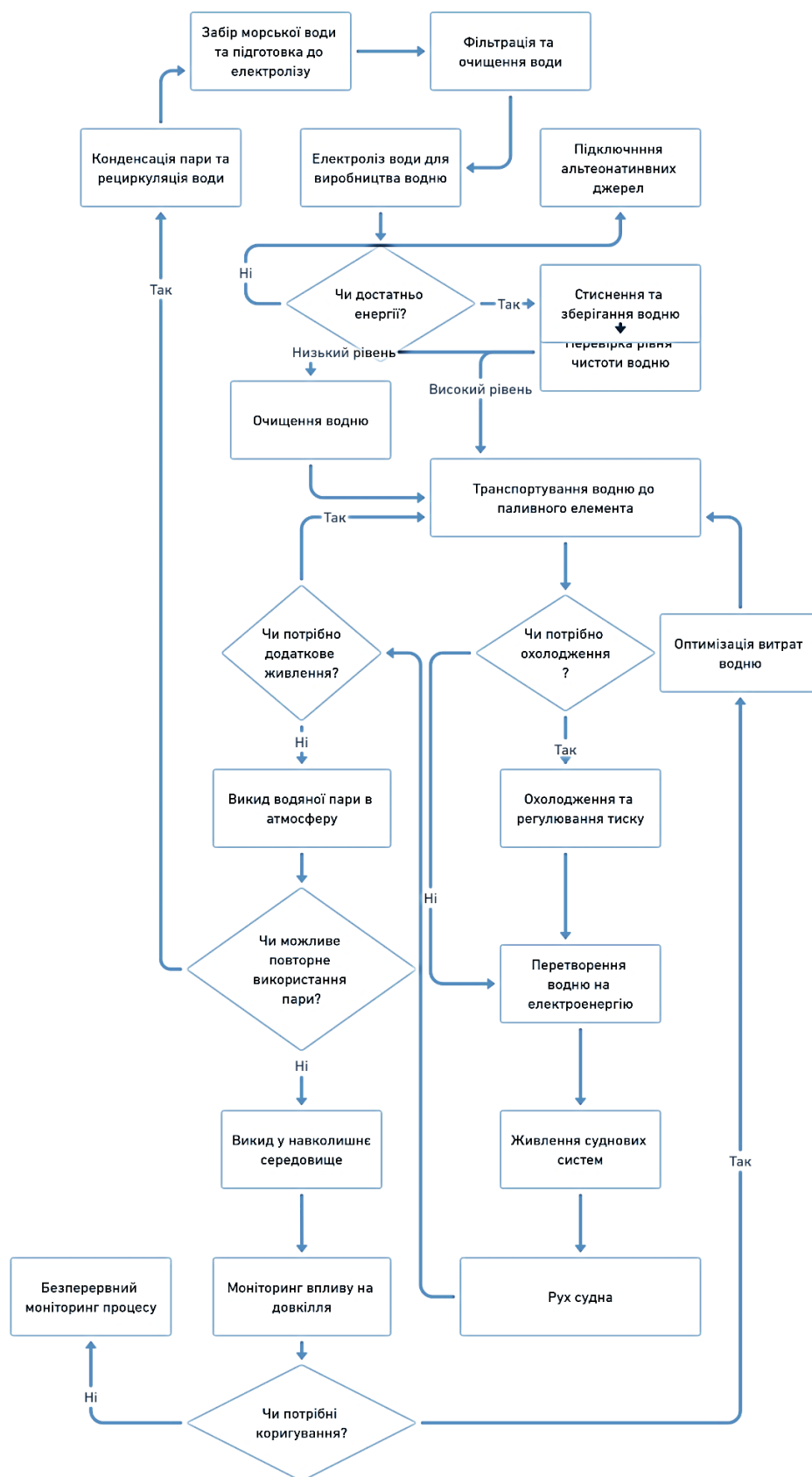


Рис. 3. Алгоритм повного циклу виробництва, зберігання, використання та утилізації водню на судні

Таблиця 1

Алгоритм утилізації водню на морських суднах

Етап	Опис	Перевірки та адаптація
1. Забір морської води та підготовка до електролізу	Забір морської води, фільтрація та очищення води від домішок	Перевірка якості очищеної води
2. Виробництво водню	Процес електролізу води, розкладання H_2O на H_2 та O_2	Система перевіряє рівень енергії для електролізу. Якщо її недостатньо, автоматично підключають альтернативні джерела. За достатньої енергії розпочинається розкладання води на водень і кисень
3. Зберігання та підготовка водню	Стискання та зберігання водню під високим тиском	Перед використанням водень перевіряють на чистоту. Якщо показники відповідають стандартам, його подають у паливний елемент, інакше – очищують і тестують повторно
4. Використання водню для вироблення енергії	Перетворення водню в паливному елементі на електроенергію	Перевірка необхідності охолодження, якщо охолодження потрібне, то відбувається регулювання температури і тиску. Якщо ні, то водень подають у паливний елемент
5. Живлення суднових систем і рух судна	Постачання електроенергії до суднових систем. Використання енергії для руху судна	Перевірка потреби в додатковій енергії. Якщо потрібно більше енергії, то відбувається повторне подавання водню. Якщо енергії достатньо, то наступним етапом є перехід до утилізації
6. Утилізація водяної пари	Водень зі згорянням перетворюється на водяну пару	Можливі варіанти утилізації – конденсація та повторне використання (рециркуляція води в електроліз). Викид в атмосферу (оцінювання екологічного впливу)
7. Моніторинг і адаптація	Моніторинг викидів і впливу на довкілля, оптимізація споживання водню та контроль усіх етапів процесу	Корегування системи для підвищення ефективності та зниження витрат

Під час роботи паливного елемента водень перетворюється на електроенергію для живлення суднових систем і руху судна. Якщо потрібна додаткова потужність, процес можна повторити. Важливою частиною алгоритму є використання утвореної водяної пари: вона може бути сконденсована і повторно використана в

системі електролізу або викинута в атмосферу з мінімальним впливом на навколишнє середовище. Увесь процес супроводжений постійним моніторингом параметрів і адаптацією до мінливих умов, що робить систему максимально ефективною та екологічно стійкою.

Водень можна виробляти різними методами, окрім електролізу, шляхом парового риформінгу природного газу або газифікації біомаси. Водень зберігають на борту судна в резервуарах високого тиску, криогенних резервуарах або у вигляді гідридів металів. Накопичений водень подають до паливного елемента, який перетворює хімічну енергію водню в електричну за допомогою електрохімічного процесу. Електричну енергію, вироблену паливним елементом, використовують для живлення суднового електродвигуна, який рухає судно вперед. Система зберігання водню – балони високого тиску (40-футовий контейнер із балонами під тиском 25 МПа містить 794 кг водню, 40-футовий контейнер із балонами під тиском 50 МПа – 1050 кг водню). У зрідженому вигляді за температури $-252\text{ }^{\circ}\text{C}$ 40-футовий контейнер містить близько 2 478 кг водню за допомогою ЛОНС (Liquid Organic Hydrogen Carrier) – органічних сполук, здатних поглинати і виділяти водень у результаті хімічних реакцій. 1 м^3 ЛОНС може виробляти 57 кг водню. 40-футовий контейнер може вмістити близько 3200 кг водню, а з урахуванням необхідності зберігання «вивільненої» рідини – близько 1600 кг водню.

Формула оптимізації суднового двигуна, що використовує водень, буде залежати від різних чинників, таких як тип і розмір судна, конкретна конструкція водневого двигуна, умови експлуатації та цілі продуктивності. Однак існує загальна формула, яку можна використовувати як відправну точку:

$$P = (r Q_{(B)}) / \gamma , \quad (1)$$

де P – масові витрати водню, кількість водневого палива, що споживає двигун за одиницю часу, кг/с;

r – вища теплота згоряння водню або кількість теплової енергії, що виділяється з повним згорянням одиниці водню, МДж/кг;

$Q_{(B)}$ – ККД двигуна, відсоток енергії палива, перетвореної двигуном у корисну роботу;

γ – питома вага водню, тобто густина газоподібного водню відносно повітря.

Одним із найважливіших чинників оптимізації роботи судна, що використовує водень як пальне, є максимізація ефективності головного двигуна. Цього можна досягти різними методами, включаючи оптимізацію системи впорскування пального, регулювання моменту запалювання і модифікацію конструкції камери згоряння. Прикладом може слугувати формула для оптимізації роботи суднового двигуна, що працює на водневому паливі:

$$\eta = [(P_{in} - P_{out})/P_{in}] \times Q_{in}/H_{H_2} , \quad (2)$$

де η – ККД двигуна;

$P_{(ex)}$ – споживана потужність, кВт;

$P_{(вих)}$ – вихідна потужність, кВт;

$Q_{(ex)}$ – витрати водневого палива, кг/год;

$H_{(H_2)}$ – теплота згоряння водню, МДж/кг;

Наведена формула враховує вхідну і вихідну потужність двигуна, а також споживання водневого палива і теплоту згоряння водню. Різницю між вхідною та вихідною потужністю ділять на споживану потужність, щоб визначити ККД двигуна. Витрати водневого палива помножують на теплоту згоряння водню, щоб визначити енергію, яку споживає двигун.

Додаткові чинники, такі як відношення повітря до палива, ступінь стиснення та швидкість рециркуляції вихлопних газів, можуть бути враховані для подальшої оптимізації роботи двигуна. Ретельно відрегулювавши ці чинники, можна досягти максимально можливої ефективності двигуна і мінімізувати споживання пального, викиди та інші впливи на навколишнє середовище. За допомогою поданої тут формули можна розрахувати вихідну потужність водневого двигуна, яка потім може бути використана для оптимізації конструкції і роботи

суднового двигуна і судна в цілому. Для досягнення найкращої продуктивності та ефективності необхідно також враховувати інші чинники, такі як тип і розмір гребного гвинта, конструкцію корпусу та умови експлуатації.

Формула оптимізації суднового двигуна для водневого палива може включати такі елементи:

1. Розрахунок ефективності двигуна, яку можна оцінити за допомогою коефіцієнта корисної дії (теплого ККД), який визначає відношення енергії, що виділяє під час роботи двигун, до енергії, витраченої на його роботу. Коефіцієнт корисної дії двигуна з урахуванням впливу втрат енергії, включаючи механічні та теплові втрати:

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_u} \times \left(1 - \frac{Q_{loss}}{Q_u}\right) \times 100\%, \quad (3)$$

де $\dot{W}$ – корисна потужність, вироблена двигуном;

$\dot{Q}_u$ – підведення тепла до двигуна;

Q_{loss} – втрати тепла внаслідок тертя і теплообміну з навколишнім середовищем.

2. Вибір оптимального способу зберігання водню в різних формах, таких як рідкий водень, стиснений водень або водень, абсорбований на наночастинках. Модель може враховувати вартість і енергоефективність кожного способу зберігання для вибору найкращого варіанта. Масову густину енергії з нижчою теплоотою згоряння (LHV) водню для розрахунку можна знайти як

$$H_2 = \frac{\dot{W}}{m} \times \left(1 - \frac{Q_{loss}}{Q_u}\right) \times LHV, \quad (4)$$

де m – маса водню, що зберігають у певній формі.

3. Урахування технічних обмежень. Водневі двигуни можуть потребувати особливих технічних вимог, таких як

спеціальна система подавання та зберігання палива, а також додаткові системи охолодження. Модель може врахувати витрати на ці додаткові системи і розрахувати їхній вплив на ефективність двигуна, для того щоб урахувати технічні обмеження: потужність двигуна з урахуванням коефіцієнта корекції на втрати через стискання водню (λ_H):

$$P = \frac{V_b \cdot n_c \cdot N_{max} \cdot \eta_m}{4 \cdot \kappa} \times \lambda_H, \quad (5)$$

де V_b – об'єм двигуна;

n_c – кількість циліндрів;

N_{max} – максимальні оберти двигуна;

η_m – механічний ККД;

κ – ступінь стиснення.

4. Викиди вуглецю. Визначення впливу на навколишнє середовище або викидів забруднюючих речовин зі спалюванням водню з урахуванням впливу ефективності згоряння (η_{comb}) і коефіцієнта перетворення K :

$$E = \frac{V_f \cdot \left(\frac{CO_f}{C_x}\right) \cdot M_x}{V_e \cdot \rho_f} \times \eta_{comb} \times K, \quad (6)$$

де V_f – об'єм палива, спаленого за цикл;

CO_f – кількість оксиду вуглецю, що викидається зі згорянням палива;

C_x – вміст вуглецю в паливі;

M_x – молярна маса вуглецю;

V_e – об'єм викидів забруднюючих речовин;

ρ_f – густина пального.

5. Розрахунок витрат на виробництво двигуна. Модель може враховувати витрати на розроблення і виробництво двигуна, придбання і зберігання водню, обслуговування і ремонт двигуна, підтримку (C_m) і вартість матеріалів (C_{mat}):

$$C = \frac{C_r + C_m + C_{maint} + C_{mat}}{N}, \quad (7)$$

де C_r – витрати на дослідження і розроблення;

C_m – витрати на виробництво;

N – кількість виготовлених двигунів.

6. Вартість водню, включаючи ступінь ефективності електролізу (η_{elect}):

$$C_{H_2} = \frac{C_f}{H_{LHV} \times \eta_{elect}}, \quad (8)$$

де C_f – вартість палива;

H_{LHV} – нижча теплота згоряння водню.

Розроблений алгоритм дає змогу ефективно оптимізувати роботу суднового двигуна, що працює на водневому паливі, з урахуванням термодинамічних параметрів, характеристик згоряння, економічних показників та екологічних аспектів. Основні висновки полягають в оптимізації ККД двигуна (η), що дає змогу знизити втрати енергії та підвищити ефективність використання водню. Аналіз масової енергетичної щільності водню (H_2) допомагає визначити найефективніший спосіб його зберігання (рідина, газ, адсорбція). Формула для розрахунку потужності (P) дає змогу оцінити, як конструкція двигуна і параметри водневого палива впливають на потужність. Використання водню значно знижує викиди CO_2 та інших забруднюючих речовин (E), роблячи двигун більш екологічним. Аналізуючи вартість виробництва (C) та експлуатації водневого двигуна, ураховують витрати на паливо, технічне обслуговування та адаптацію технології.

Загалом алгоритм дає змогу інтегрувати водневі технології в морський транспорт, знижуючи залежність від традиційних вуглеводневих джерел енергії та забезпечуючи високу екологічну ефективність. Але знову ж таки цей

алгоритм є лише загальним прикладом і може суттєво відрізнятись залежно від конкретної моделі двигуна та його параметрів, а також умов експлуатації. Для того щоб найбільш точно розрахувати оптимальні параметри двигуна для водневого палива, необхідно детально проаналізувати техніко-економічні параметри, а також урахувати чинники, що впливають на ефективність роботи двигуна: тиск, температура, швидкість обертання тощо. Тому розрахунок оптимальних параметрів повинен здійснювати спеціалізований персонал із використанням відповідного програмного забезпечення та обладнання. Урахування цих елементів може допомогти розробити оптимальну формулу оптимізації суднового двигуна для водневого палива.

Насправді вартість впровадження альтернативних видів палива на судах не є основним критерієм вибору тієї чи іншої технології; саме вартість палива визначає цей вибір. Вона залежить від кількох чинників, які іноді важко передбачити. За даними джерел, найнижчою є ціна на НФО (судновий мазут), і конкурувати з ним може лише ЗПГ. Ціна на метанол, вироблений із природного газу, вища, ніж на ЗПГ. Біопаливо виробляють з біомаси, і традиційно воно є дорожчим за нафту марки Brent. Ці види палива, імовірно, конкуруватимуть із МРО (дизельним паливом) у майбутньому.

Що стосується водню, то його тут не розглядають, оскільки він набагато дорожчий за інші види палива. Він абсолютно неконкурентоспроможний на ринку відносно ціни, тому матиме шанс стати широко розповсюдженим лише за умов значних субсидій або високих податків на традиційні види палива.

Безсумнівно, використання альтернативних видів палива допоможе судновласникам забезпечити сталість транспортних операцій у довгостроковій перспективі відносно забруднення повітря. Наслідки розливів нових видів палива,

зокрема нафти з низьким вмістом сірки, недостатньо вивчені, але наслідки забруднення морського середовища від розливів є головним чинником кліматичних умов. Використання дистильованого палива призведе до негайного збільшення експлуатаційних витрат, а установка скрубера може виявитися поганою інвестицією, якщо буде введена заборона на використання залишкових видів палива, і інвестиції в обладнання не окупляться вчасно. Ще з більшими ризиками судновласники стикаються з будівництвом нових суден, для яких потрібні великі капітальні вкладення. Нафта і нафтопродукти не мають конкурентів на світовому ринку за своїми властивостями, але регулярна інформація про те, що запаси нафти виснажуються, і зростаючі потреби стимулюють спроби знайти заміну нафті як паливу і сировині.

Незважаючи на переваги водневого палива, існує також низка проблем, які необхідно вирішити для його впровадження на судах. Однією з головних проблем є висока вартість виробництва та зберігання водню. Хоча технологічний прогрес знижує витрати, він все ще дорожчий за традиційні викопні види палива. Крім того, водень легкозаймистий і потребує особливого поводження та заходів безпеки, що робить його потенційною загрозою безпеці на борту суден. Однак водневі дизельні двигуни можуть бути розроблені на основі стандартних середньошвидкісних судових дизельних двигунів або модернізовані для роботи на водні, тому на основі таких даних можна зазначити, що використання водню як пального на судах – це не віддалена перспектива з технічної точки зору, а цілком реалізована дія.

На основі дослідження використання водневого палива для судових двигунів можна зробити такі висновки:

- водневе паливо є одним із найперспективніших альтернативних джерел енергії для судноплавства, оскільки дає змогу значно скоротити викиди

шкідливих речовин і зменшити залежність від нафтопродуктів;

- розроблення математичної моделі для оптимізації судового двигуна на водневому паливі може допомогти підвищити ефективність двигуна, зменшити витрати на паливо та підвищити загальну екологічність морського транспорту;

- впровадження водневого палива на морському транспорті стало можливим завдяки розвитку технологій його виробництва і зберігання, а також створенню відповідної інфраструктури для заправлення і транспортування.

Одним із найважливіших аспектів застосування водню в судноплавстві є його безпечне та ефективне зберігання на борту кораблів. Основними підходами для цього є використання стисненого газу, зрідженого водню або металогідридних акумуляторів. Кожен із цих методів має переваги і недоліки, зокрема щодо енергетичної щільності, рівня безпеки та фінансових витрат.

Діяльність водневих енергетичних установок значною мірою визначена коефіцієнтом корисної дії двигуна, що відображує ефективність перетворення енергії палива в корисну потужність. Максимізація цього показника є критично важливою для підвищення продуктивності судових енергетичних систем.

Ще одним серйозним технічним викликом є процес упорскування водню в камеру згоряння, для чого потрібна модифікація паливної системи для забезпечення стабільного та ефективного горіння. Покращення цього процесу дає змогу підвищити продуктивність двигуна, скоротити втрати енергії та забезпечити рівномірний розподіл пального в зоні згоряння. Однак необхідно враховувати екологічні аспекти використання водню. Попри те, що з його спалюванням не утворюється CO₂, за високих температур можуть утворюватися оксиди азоту, що потребує впровадження додаткових технологічних рішень для їх мінімізації.

У табл. 2 подано основні труднощі, які виникають з інтеграцією водневих технологій у морський транспорт. Одним із головних питань залишається вибір оптимального способу зберігання водню,

оскільки кожен із можливих варіантів — стиснений, зріджений або металогібридний водень — має свої переваги та недоліки з точки зору безпеки, енергоефективності та економічної доцільності.

Таблиця 2

Основні виклики процесу впровадження водневих технологій на морському транспорті

Проблема	Опис
Методи зберігання водню	Використання стисненого, зрідженого водню або металогібридних накопичувачів. Оцінювання щільності енергії, рівня безпеки та вартості
Ефективність двигуна	Розрахунок коефіцієнта корисної дії (ККД) двигуна, визначення співвідношення корисної потужності і загальної теплоти
Оптимізація впорскування	Адаптація системи подавання водню, забезпечення рівномірного розподілу палива в камері згоряння, зменшення енергетичних втрат
Вплив на навколишнє середовище	Мінімізація утворення оксидів азоту за високих температур, використання технологій нейтралізації забруднень
Методологія оптимізації	Комплексне розроблення оптимальних рішень для впровадження водневих технологій у морському транспорті

Отже, для успішного впровадження водневих технологій у морському транспорті необхідно розробити комплексну методологію оптимізації суднових енергетичних установок. Вона має включати ефективні методи зберігання, вдосконалену систему подавання водню та заходи для мінімізації екологічного впливу. Це дасть змогу підвищити загальну ефективність водневих двигунів, знизити рівень викидів і забезпечити відповідність сучасним екологічним стандартам.

Перспективи подальшого розвитку та використання водневого палива на морському транспорті є дуже обнадійливими. Потреба у зменшенні викидів шкідливих речовин і залежності від нафтопродуктів зростає з кожним роком, і водневе паливо є одним з основних елементів у вирішенні цих проблем. Крім того, сучасні технології виробництва та зберігання водневого палива слід удосконалювати, що може призвести до зниження витрат і підвищення

конкурентоспроможності порівняно з традиційними видами палива.

Висновок. Дослідження підтверджує, що водневе паливо має великий потенціал як альтернатива традиційним енергоносіям у судноплавстві завдяки своїм екологічним та енергетичним перевагам. Поданий у роботі адаптивний алгоритм управління водневим паливом сприяє ефективному виробництву, зберіганню, використанню та утилізації водню на борту суден. Він ураховує основні технічні та економічні чинники, що впливають на загальну продуктивність водневих енергетичних систем.

Запропонована математична модель дає змогу оцінити ефективність роботи двигуна, оптимізувати умови зберігання водню та зменшити екологічний вплив завдяки зниженню рівня викидів. Дослідження різних методів зберігання водню, зокрема у формі стисненого, зрідженого газу або металогібридних накопичувачів, демонструє їхню ефективність залежно від умов експлуатації

судна. Впровадження подібних технологій потребує значних інвестицій у розвиток відповідної інфраструктури, однак у довгостроковій перспективі це дасть змогу значно зменшити залежність судноплавства від викопних паливних ресурсів.

Крім того, запропонована система моніторингу енергоспоживання дає змогу адаптувати роботу енергетичних установок

до змінних умов експлуатації, підвищуючи безпеку і стабільність судових систем. Подальші дослідження в цій сфері мають бути зосереджені на розробленні нових матеріалів для ефективнішого зберігання водню, вдосконаленні технологій подавання палива та створенні міжнародних нормативів для водневих енергетичних систем.

Список використаних джерел

1. Melnyk O. et al. (2024). Innovative technologies for the maritime industry: Hydrogen fuel as a promising direction. In S. Boichenko, A. Zaporozhets, A. Yakovlieva, & I. Shkilniuk (Eds.). *Modern technologies in energy and transport* (Studies in Systems, Decision and Control). Vol. 510. P. 95-103. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_3.
2. Solakivi T., Paimander A. & Ojala L. (2022). Cost competitiveness of alternative maritime fuels in the new regulatory framework. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 113. 103500. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103500>.
3. Kouzelis K., Frouws K. & van Hassel E. (2022). Maritime fuels of the future: What is the impact of alternative fuels on the optimal economic speed of large container vessels. *Journal of Shipping and Trade*. 7. <https://doi.org/10.1186/s41072-022-00124-7>.
4. Huang J., Fan H., Xu X. & Liu Z. (2022). Life cycle greenhouse gas emission assessment for using alternative marine fuels: A very large crude carrier (VLCC) case study. *Journal of Marine Science and Engineering*. 10. 1969. <https://doi.org/10.3390/jmse10121969>.
5. Heine D., GGde S. & Dominioni G. (2014). Unilaterally removing indirect subsidies for maritime fuel. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2512747>.
6. Md Moshilul A., Mohammad R., Hira F. & Maarop N. (2022). Alternative marine fuel research advances and future trends: A bibliometric knowledge mapping approach. *Sustainability*. 14. <https://doi.org/10.3390/su1409494>.
7. Pekşen D. & Alkan G. (2018). Application of alternative maritime power (AMP) supply to cruise port. *Journal of ETA Maritime Science*. 6. 307–318. <https://doi.org/10.5505/jems.2018.15870>.
8. Benet Á., Villalba-Herreros A., d'Amore-Domenech R. & Leo T. J. (2022). Knowledge gaps in fuel cell-based maritime hybrid power plants and alternative fuels. *Journal of Power Sources*. 548. 232066. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232066>.
9. Barberi S., Campisi T. & Neduzha L. (2022). The role of cold ironing in maritime transport emissions. In *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2611. P. 060013. <https://doi.org/10.1063/5.0119881>.
10. Wang Q., Zhang H., Huang J. & Zhang P. (2023). The use of alternative fuels for maritime decarbonization: Special marine environmental risks and solutions from an international law perspective. *Frontiers in Marine Science*. 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1082453>.
11. Melnyk O. & Onyshchenko S. (2022). Ensuring safety of navigation in the aspect of reducing environmental impact. In *ISEM 2021, LNNS*. Vol. 463. P. 1–9. https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8_9.
12. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S., Golikov V., Sapiha V., Shcherbina O. & Andrievska V. (2022). Study of environmental efficiency of ship operation in terms of freight transportation effectiveness provision. *TransNav, International Journal of Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 16(4). 723–729. <https://doi.org/10.12716/1001.16.04.14>.

13. Onishchenko O., Golikov V., Melnyk O., Onyshchenko S. & Obertiur K. (2022). Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology*. 116. 223–235. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.116.14>.
14. Melnyk O., Onyshchenko S. & Koryakin K. (2021). Nature and origin of major security concerns and potential threats to the shipping industry. *Scientific Journal of Silesian University of Technology*. 113. 145–153. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2021.113.11>.
15. Yakovlieva A. & Boichenko S. (2020). Energy efficient renewable feedstock for alternative motor fuels production: Solutions for Ukraine. *Studies in Systems and Decision Control*. 298. 247–259. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_16.
16. Minchev D., Varbanets R., Aleksandrovskaya N. & Pisintsaly L. (2021). Marine diesel engines operating cycle simulation for diagnostics issues. *Acta Polytechnica*. 3(61). 428–440. <https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0435>.
17. Alternative Fuels and Technologies for Greener Shipping: DNV GL. (2018). Summary of an assessment of selected alternative fuels and technologies. <https://www.dnv.com>.
18. Maritime Safety Agency: Update on potential of biofuels in shipping. (2022). EMSA, Lisbon. <https://www.emsa.europa.eu/publications/reports/item/4834-update-on-potential-of-biofuels-for-shipping.html>.
19. Li Y., Wei W., Li Y. & Huang T. (2021). Research on the optimization of ship propulsion system based on hydrogen fuel. *Journal of Marine Science and Engineering*. 9(3). 278.
20. Kulkarni P., Shah P. & Kulkarni P. (2020). Fuel cell technology for maritime applications. *International Journal of Maritime Engineering*. 162(1). 55–64.
21. Chen J., Zhang H. & Liu B. (2019). Energy efficiency optimization of a hydrogen-powered container ship. *Journal of Marine Science and Engineering*. 7(10). 318.
22. Ghafir M. F. A., Harahap I. S. H. & Taufik T. (2018). Technical and economic feasibility analysis of hydrogen fuel cell power plant for Indonesian ferry. *International Journal of Renewable Energy Research*. 8(3). 1361–1371.
23. Chen H., Zhang X., Wu Y. & Huang Y. (2017). A review of research on hydrogen energy storage technology. *International Journal of Hydrogen Energy*. 42(20). 14345–14363.
24. Hoang D. L., Kim T. & Lee K. (2020). Hydrogen fuel cell systems for ships: A review. *Journal of Cleaner Production*. 246. 119025. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119025>.
25. Konold W. E. (2020). Maritime energy transition: Hydrogen fuel cells as a future alternative for shipping. *Transportation Policy*. 89. 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.04.007>.
26. Li Y., Li P. (2020). Feasibility analysis of hydrogen energy application in shipping industry. *Energy Procedia*. 187. 50–55. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2020.07.015>.
27. Schmieder P. & Krieg O. (2020). Perspectives of hydrogen use for ship propulsion. *Journal of Marine Science and Engineering*. 8(12). 994. <https://doi.org/10.3390/jmse8120994>.
28. Su H., Peng H., Lin Y. & Wang Z. (2020). Investigation of hydrogen fuel cell ships considering different operation modes. *International Journal of Hydrogen Energy*. 45(50). 27676–27684. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.192>.

Мельник Олексій Миколайович, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна. ORCID: 0000-0001-9228-8459.

Булгаков Микола Петрович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна. E-mail: npbulgakov2@gmail.com. ORCID: 0000-0002-7172-8678.

Волошин Дмитро Андрійович, здобувач наукового ступеня доктора філософії кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна. ORCID: 0009-0005-3458-1450.

Melnyk Oleksiy, Sc.D., Assoc. Prof., Professor of the Department of Navigation and Maritime Safety, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine. ORCID: 0000-0001-9228-8459.

Bulgakov Mykola, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Navigation and Maritime Safety, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine. E-mail: npbulgakov2@gmail.com.

ORCID: 0000-0002-7172-8678.

Voloshyn Dmytro, Doctor of Philosophy (PhD) candidate at the Department of Navigation and Maritime Safety, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine. ORCID: 0009-0005-3458-1450.

Статтю прийнято 25.02. 2025 р.