

УДК 656.6:629.067

КОНЦЕПЦІЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЕВОГО ПАЛИВА НА МОРСЬКОМУ ТРАНСПОРТІ

Кандидати техн. наук О. М. Мельник, О. М. Шумило, д-р техн. наук О. А. Онищенко, кандидати екон. наук Ю. В. Михайлова, Т. С. Обнявко, доц. Т. О. Коробко

CONCEPT AND PROSPECTS FOR THE USE OF HYDROGEN FUEL IN MARITIME TRANSPORT

PhD (Tech.) O. Melnyk, O. Shumylo, Sc. D. (Tech) O. Onishchenko, PhD (Econ) Yu. Mikhailova, T. Obniavko, Assoc. Prof. T. Korobko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.203.2023.277913>



Анотація. Судноплавна галузь є значним джерелом глобальних викидів парникових газів, тому пошук стійких і низьковуглецевих альтернативних видів палива має вирішальне значення для зменшення її впливу на навколишнє середовище. Водень стає перспективним видом палива для судноплавної галузі завдяки своїй високій енергетичній щільності, нульовим викидам і можливості виробництва з відновлюваних джерел. Однак використання водню як палива в судноплаванні потребує значного розвитку інфраструктури і технологічного прогресу у виробництві, зберіганні та транспортуванні водню. Крім того, вартість і доступність водневого палива залишаються основними бар'єрами на шляху його широкого впровадження в судноплаванні. Незважаючи на ці виклики, потенційні переваги використання водню як сталого палива для судноплавання роблять його сферою зростаючого інтересу та інвестицій. Водневе паливо дедалі стає багатобічальною альтернативою традиційному викопному паливу для суден. Це чисте і поновлюване джерело енергії, яке виробляє лише водяну пару як побічний продукт, що робить його бажаним рішенням для скорочення викидів парникових газів і пом'якшення наслідків зміни клімату. Шість відсотків світового природного газу і два відсотки вугілля наразі йде на виробництво водню. Водень можна використовувати як паливо з нульовими викидами, але при цьому виробництво самого газу не є низьковуглецевим процесом, якщо для його виробництва використовується викопне паливо. Тим не менш, на думку експертів, водень – це паливне рішення для судноплавання. Вже сьогодні провідні науковці та досвідчені фахівці у сфері експлуатації та проектування суден закликають до більш широкого використання водню як палива, що в кінцевому підсумку допоможе морській індустрії досягти своєї мети щодо скорочення викидів за рахунок використання невикопних видів палива. У цій статті досліджується потенціал водневого палива для суден включаючи його переваги, виклики та поточний стан.

Ключові слова: альтернативні палива, екологічна безпека, міжнародне судноплавання, виробництво водню, оптимізація суднових двигунів, електрохімічний процес, суднова електроенергетика.

Abstract. The shipping industry is a significant source of global greenhouse gas emissions, so finding sustainable and low-carbon alternative fuels is crucial to reduce its environmental impact. Hydrogen is emerging as a promising fuel for shipping due to its high energy density, zero emissions, and the possibility of production from renewable sources. However, the use of hydrogen as a fuel in shipping requires significant infrastructure development and technological advances in hydrogen production, storage and transportation. In addition, the cost and availability of hydrogen fuel remain

the main barriers to its widespread adoption in shipping. Despite these challenges, the potential benefits of using hydrogen as an environmentally friendly fuel for shipping make it an area of growing interest and investment. Hydrogen fuel is increasingly becoming a promising alternative to traditional fossil fuels for ships. It is a clean and renewable energy source that produces only water vapor as a byproduct, making it a desirable solution for reducing greenhouse gas emissions and mitigating climate change. Six percent of the world's natural gas and two percent of coal are currently used to produce hydrogen. Hydrogen can be used as a zero-emission fuel, but the production of the gas itself is not a low-carbon process if fossil fuels are used to produce it. Nevertheless, experts believe that hydrogen is a fuel solution for shipping. Even today, leading scientists and experienced ship operation and design professionals are calling for the wider use of hydrogen as a fuel, which will ultimately help the maritime industry achieve its goal of reducing emissions through the use of non-fossil fuels. This article explores the potential of hydrogen fuel for ships, including its benefits, challenges and current status.

Keywords: *alternative fuels, environmental safety, international shipping, hydrogen production, marine engine optimization, electrochemical process, marine energy.*

Вступ. Судноплавство є одним з найбільших джерел глобальних викидів парникових газів, на його частку припадає приблизно 2,9 % загального обсягу викидів. Міжнародна морська організація (ІМО) поставила перед собою амбітні цілі щодо скорочення цих викидів, включаючи ціль скоротити викиди парникових газів від судноплавства щонайменше на 50 % до 2050 року. На морський транспорт припадає близько 11 % світового споживання палива, або близько 10 мільйонів барелів на добу. Важливим фактом є те, що в нинішній ситуації конкуренції між альтернативними видами палива морські судна значною мірою задають тренд на користь того чи іншого виду палива. Значні обсяги споживання палива морським транспортом виправдовують масове виробництво продуктів нафтопереробки, будівництво паливних баз та інфраструктури в цілому, задаючи курс на певний вид палива і роблячи ставку на нього в інших сегментах ринку. Так, після заборони використання флотського мазуту з 2024 року залишиться тільки дизельне паливо. Це дає можливість для морської транспортної галузі переглянути свою позицію у скорочений термін до цієї дати і зробити більш активні кроки для адаптації до нових стандартів, у тому числі в контексті розгляду альтернативних варіантів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Водень є одним з альтернативних видів палива, що досліджуються для використання в судноплавстві. Як паливо, водень має ряд переваг перед традиційними викопними видами палива, такими як дизельне паливо і мазут. Однією з головних переваг є те, що при спалюванні водню утворюється лише вода як побічний продукт, що робить його чистим паливом без викидів. Однак використання водню як палива 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 є обмеженими. Ще одна проблема – вартість виробництва водню, яка все ще залишається відносно високою порівняно з традиційними видами палива. Однак очікується, що з удосконаленням технології виробництва і зберігання водню та зростанням попиту на екологічно чисту енергію вартість водню знижуватиметься.

Так, у роботі [1] досліджено конкурентоспроможність альтернативних видів морського палива в новій нормативній базі. Морське паливо майбутнього і вплив альтернативних видів палива на оптимальну

економічну швидкість великих контейнеровозів вивчено в роботі [2]. Наукова праця [3] пропонує оцінювання викидів парникових газів протягом життєвого циклу при використанні альтернативного морського палива на прикладі нафтового танкера (VLCC). У статті [4] з'ясовано причини одностороннього скасування непрямих субсидій на морське паливо. Досягнення в галузі досліджень альтернативного морського палива і майбутні тенденції та застосування альтернативної морської електроенергії (АМЕС) у круїзних портах пропонується в роботах [5, 6]. Прогалини в знаннях про морські гібридні електростанції на паливних елементах та альтернативні види палива і роль холодного прасування у викидах морського транспорту висвітлено в роботах [7, 8]; використання альтернативних видів палива для морської декарбонізації з урахуванням особливостей морських екологічних ризиків і рішень, з точки зору міжнародного права, – роботі [9]; забезпечення безпеки судноплавства в аспекті зменшення впливу на довкілля, технічні та експлуатаційні заходи щодо зменшення викидів парникових газів і підвищення екологічної та енергетичної ефективності суден – роботах [10, 11]. Принципи застосування двигунів на водні на судах змішаного плавання та інші проблеми портової інфраструктури та безпеки судноплавства розглянуто в роботах [12, 13]. У роботі [14] проаналізовано застосування двигунів на водні на судах змішаного плавання. Переваги та існуючий досвід розвитку «розумних портів» розглянуто в роботі [15]; оптимізацію розмірної модернізації пасажирських суден з урахуванням енергоефективності – роботі [16].

Отже, незважаючи на всі перераховані виклики, уже існують приклади суден, що використовують водень як паливо. Загалом, хоча водень і є перспективним альтернативним паливом для судноплавства, все ще існує низка

технологічних, логістичних та економічних проблем, які необхідно вирішити, перш ніж його можна буде широко впроваджувати як основне паливо.

Мета та завдання дослідження.

Метою статті є дослідження потенціалу використання водневого палива як альтернативи традиційним викопним видам палива в морській галузі. У статті розглянуто поточний стан галузі, виклики та можливості, пов'язані з використанням водневого палива, а також потенційні вигоди від впровадження цього альтернативного джерела енергії.

Основна частина дослідження.

Безумовно, для прийняття рішення щодо вибору пріоритетного виду палива для міжнародного судноплавства необхідні більш точні та ґрунтовні дослідження з оцінювання екологічного сліду від використання альтернативних видів палива, починаючи від видобутку сировини і закінчуючи викидами в навколишнє середовище. Окремим питанням є оцінювання наслідків розливів альтернативних видів палива, що потребує проведення лабораторних та експериментальних досліджень розливів, особливо при низьких температурах, високих швидкостях вітру тощо. Додатковий інтерес становить ступінь довгострокового впливу сумішей альтернативних видів палива на водне середовище. Екологічні проблеми і зростаючі ціни на паливо ведуть до необхідності пошуку нових рішень для судноплавства. Альтернатив не так багато. При цьому законодавство вже визначилося з умовами використання ЗПГ (зрідженого природного газу), за ним ідуть метанол і біопаливо.

На думку експертів, небагато часу займе розроблення IGF Code для ЗПГ і водню. Для того щоб відповідати вимогам до 2050 року, необхідно буде не тільки перевести флот на інший, екологічний, вид палива, а й розробити нові технології для зниження викидів парникових газів в

атмосферу з суден. Водневе паливо також стало потенційним рішенням для досягнення цих цілей, втім його

впровадження не позбавлене проблем. Повний цикл виробництва відновлюваного водню подано на рис. 1.



Рис. 1. Виробництво відновлюваного водню (джерело Renewable Hydrogen)

Однією з головних переваг водневого палива є його нульовий профіль викидів. При спалюванні водню єдиним побічним продуктом є водяна пара, що робить його чистим і відновлюваним джерелом енергії. Крім того, водневе паливо має високу щільність енергії, що означає, що воно може забезпечити більше енергії на одиницю ваги, ніж традиційні викопні види палива. Це може призвести до створення менших і більш ефективних систем суднових двигунів. H_2 – більш ніж ще один цікавий варіант альтернативного суднового палива, який активно розглядається для використання на судах. Водень або скраплюють (кріогенна рідина має температуру $-240\text{ }^\circ\text{C}$) і поміщають у компресійні резервуари, або зберігають у вигляді хімічної сполуки. Нині H_2 отримують із природного газу, а також шляхом електролізу. Останній можна проводити на сонячних і вітряних електростанціях одночасно з виробленням

електроенергії. Вироблений з поновлюваних джерел енергії, водень стає одним з найчистіших видів палива, як зазначено, з нульовими викидами парникових газів. Найбільш ефективним генератором енергії для водню є паливні елементи. Як виробництво водню, так і паливних елементів добре розвинене, але вони, як і раніше, залишаються неконкурентоспроможними за ціною порівняно зі звичайними судновими двигунами.

Існує кілька поточних проєктів та ініціатив, що досліджують використання водневого палива на судах. У 2020 році у Франції було спушено на воду перше у світі судно на водневих паливних елементах, а кілька інших країн, включаючи Японію, Норвегію та Південну Корею, вже досить активно інвестують у технологію використання водневого палива для судноплавства. Однак широке впровадження водневого палива на судах

все ще перебуває на ранніх стадіях і потребує подальшого технологічного прогресу та розвитку інфраструктури.

Потенційно водень може масово використовуватися як паливо для суден. Стверджується, що значне зниження витрат на виробництво водню з нульовим вмістом вуглецю очікується в найближчі 10-15 років завдяки розвитку глобальної водневої економіки. Однак пряме використання водню на крупнотоннажних суднах – у

двигунах внутрішнього згоряння або паливних елементах у поєднанні з електричними двигунами – створює проблеми, пов'язані з його низькою об'ємною щільністю. Для тривалого рейсу зберігання водню потребуватиме занадто великого фізичного об'єму. Використання водневого палива на суднах можна досягти за допомогою циклу з виробництва, зберігання, паливних елементів та власне руху (рис. 2).

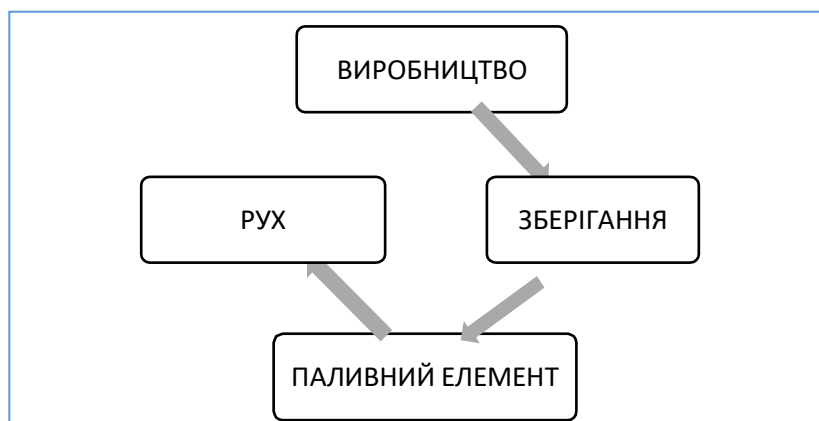


Рис. 2. Цикл використання водню на суднах

Водень можна виробляти різними методами, окрім електролізу: шляхом парового риформінгу природного газу або газифікацією біомаси. Водень зберігається на судні в резервуарах високого тиску, криогенних резервуарах або у вигляді металогідридів. Накопичений водень подається в паливний елемент, який перетворює хімічну енергію водню в електричну за допомогою електрохімічного процесу. Електрична енергія, вироблена паливним елементом, використовується для живлення суднового електродвигуна, що рухає судно вперед. Система зберігання водню здійснюється в балонах високого тиску (40-футовий контейнер із балонами 25 МПа містить 794 кг водню, 40-футовий контейнер із балонами 50 МПа містить 1050 кг водню). У скрапленому вигляді при температурі -252 °С в об'ємі 40-футового

контейнера міститься близько 2478 кг водню за допомогою LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier, рідкі органічні носії водню) – це органічні сполуки, що можуть поглинати й виділяти водень у результаті хімічних реакцій. З 1 м³ LOHC можна отримати 57 кг водню. В об'ємі 40-футового контейнера можна розмістити близько 3200 кг водню, а з огляду на необхідність зберігати «розряджену» рідину – близько 1600 кг водню.

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

$$P = (r Q_e) / \gamma, \quad (1)$$

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

r – вища теплота згоряння водню або кількість теплової енергії, що виділяється при повному згорянні однієї одиниці водню, МДж/кг;

Q_B – коефіцієнт корисної дії двигуна: відсоток енергії палива, який перетворюється двигуном на корисну роботу;

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

Одним з найважливіших факторів оптимізації роботи судна, що використовує водень як паливо, є максимізація ефективності головного двигуна. Цього можна досягти різними методами, включаючи оптимізацію системи впорскування палива, регулювання моменту запалювання і модифікацію конструкції камери згоряння. Прикладом може служити формула оптимізації роботи двигуна судна, що використовує водень,

$$\eta = [(P_{in} - P_{out})/P_{in}] \times Q_{in}/H_{H2}, \quad (2)$$

де η – коефіцієнт корисної дії двигуна;

P_{in} – споживана потужність, кВт;

P_{out} – вихідна потужність, кВт;

Q_{in} – витрати водневого палива, кг/год;

H_{H2} – теплота згоряння водню, МДж/кг.

Формула враховує споживану і вихідну потужності двигуна, а також витрати водневого палива і теплоту згоряння водню. Різниця між споживаною та вихідною потужністю ділиться на споживану потужність, щоб визначити ККД двигуна. Витрати водневого палива помножуються на теплоту згоряння водню, щоб визначити енергію, споживану двигуном.

Для подальшої оптимізації роботи двигуна можна враховувати додаткові фактори, такі як співвідношення повітря і палива, ступінь стиснення та швидкість

рециркуляції вихлопних газів. Ретельно налаштувавши ці фактори, можна досягти максимально можливої ефективності від двигуна і мінімізувати споживання палива, викиди та інші впливи на навколишнє середовище. За допомогою поданої 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 урахувати інші фактори, такі як тип і розмір гребного гвинта, конструкцію корпусу та умови експлуатації.

Водень є найбільш екологічним видом палива, яке виробляється з відновлюваної енергії. Рідкий водень може бути використаний у майбутньому, однак у нього досить низький показник об'ємної енергетичної щільності, що призводить до необхідності створення великих місць зберігання.

Стандарт Tier III стосується обмеження викидів оксидів азоту (NOx) для суден, які працюють на ЗПГ або водні, з метою зниження впливу судноплавства на довкілля. Для двигунів внутрішнього згоряння з циклом Отто, що працюють на ЗПГ або водні, встановлені обмеження викидів NOx на рівні 3,4 г/кВт·год. Для досягнення стандарту Tier III для двигунів внутрішнього згоряння з циклом Отто, що працюють на ЗПГ або водні, необхідно використовувати різні технології для зниження викидів NOx, такі як використання каталітичного конвертора, системи рециркуляції вихлопних газів, високотемпературних систем згоряння та інші.

Тому для досягнення стандарту Tier III для двигунів внутрішнього згоряння з циклом Отто, що працюють на ЗПГ або водні, необхідно використовувати багато різних технологій для зниження викидів NOx, що можуть зробити ці двигуни менш шкідливими для довкілля. Що стосується викидів азоту, то для відповідності

стандарту Tier III двигуни внутрішнього згорання з циклом Отто, що працюють на ЗПГ або водні, не потребують обладнання для очищення вихлопних газів. У більшості випадків для відповідності стандарту не прийнятні двопаливні двигуни, що працюють за дизельним циклом. Аналітичні дані щодо рівню викидів азоту при використанні різних видів палива подано на рис. 3.

Насправді вартість впровадження альтернативних палив на судна не є головним критерієм при виборі тієї чи іншої

технології, саме вартість палива зумовлює такий вибір. Вона залежить від кількох факторів, які іноді важко передбачувати. За даними джерел, найнижча ціна спостерігається на HFO (флотський мазут), і з нею може конкурувати лише ЗПГ. Ціна на метанол, вироблений з натурального газу, вища, ніж на ЗПГ. Біопаливо виробляється з біомаси і традиційно дорожче за нафту марки Brent. Ці види палива в майбутньому, найімовірніше, зможуть конкурувати з MGO (дизельне паливо).

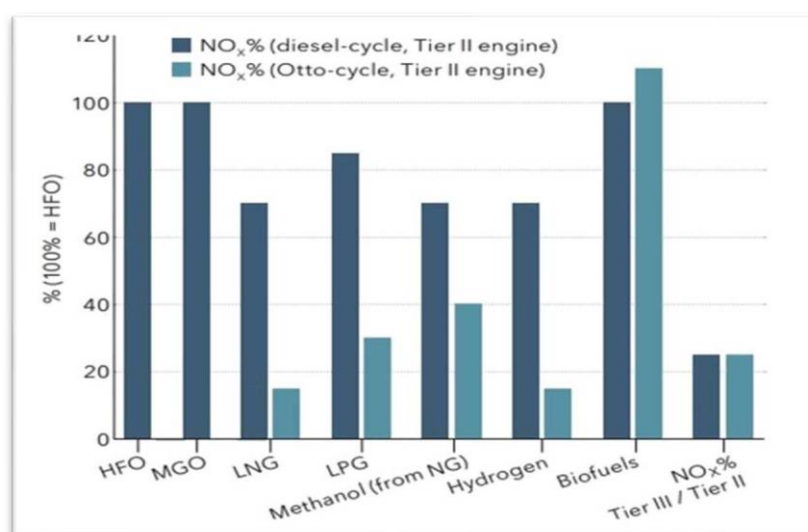


Рис. 3. Рівень викидів азоту при використанні різних видів палива (джерело DNV GL)

Що стосується водню, то він тут не розглядається, оскільки є набагато дорожчим за інші види палива. Він абсолютно неконкурентоспроможний на ринку за ціною, тому шанс у нього отримати поширення з'явиться тільки за умови значних субсидій або високих податків на звичайне паливо.

Безумовно, використання альтернативних палив дасть змогу забезпечити судовласникам стійкість транспортних операцій у довгостроковому періоді в частині забруднення атмосфери. Наслідки розливів нових видів палив, зокрема нафтових низькосірчистих,

недостатньо добре вивчені, однак для кліматичних умов наслідки забруднення морських вод від розливів є ключовим фактором. Використання дистильованих палив призведе до негайного зростання операційних витрат, а встановлення скрубера може бути неправильною інвестицією при введенні заборони на використання залишкових палив, і інвестиції в обладнання не встигнуть окупитися. Ще більші ризики в судовласників виникають під час будівництва нових суден, що потребують високих капітальних вкладень. За сукупністю властивостей у нафти і

нафтопродуктів нема конкурентів на світовому ринку, але регулярні інформаційні вкидання, що запаси нафти вичерпуються, і зростаючі вимоги стимулюють спроби шукати заміну нафти як палива і сировини.

Незважаючи на переваги водневого палива, існує також ряд 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 є легкозаймистим і вимагає особливого поводження та заходів безпеки, що робить його потенційною загрозою для безпеки на борту суден. Втім водневі дизельні двигуни можуть бути розроблені на базі стандартних судових середньооборотних судових дизельних двигунів або модернізовані для роботи на водні, тому, спираючись на такі дані, можна зазначити, що застосування водню як палива на судах, з технічного погляду, зовсім не віддалена перспектива, а цілком реалізована дія.

Висновки. Водневе паливо має потенціал відігравати значну роль у скороченні викидів парникових газів від судноплавства, але його впровадження не

позбавлене викликів. Хоча технологія все ще перебуває на ранніх стадіях розвитку, поточні ініціативи та проекти прокладають шлях до більш чистого і сталого майбутнього судноплавства. За умови продовження досліджень і розробок водневе паливо може стати основним рішенням для скорочення викидів і пом'якшення наслідків зміни клімату в судноплавній галузі. Використання водню як палива на судах має потенціал для скорочення викидів парникових газів і поліпшення якості повітря, що робить його привабливим варіантом для судноплавної галузі. Однак все ще існують проблеми, які необхідно подолати, включаючи вартість виробництва і зберігання, а також обмежену інфраструктуру для бункерування суден воднем. У статті обговорено екологічні переваги використання водневого палива, включаючи потенціал для значного скорочення викидів парникових газів і поліпшення якості повітря. Також досліджуються технічні виклики, пов'язані з використанням водневого палива, такі як потреба в інфраструктурі зберігання та розподілу, а також потенційні витрати та економічні наслідки переходу на таке альтернативне джерело енергії.

Список використаних джерел

1. Solakivi Tomi & Paimander Aleksii & Ojala Lauri (2022). Cost competitiveness of alternative maritime fuels in the new regulatory framework. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 113. 103500. 10.1016/j.trd.2022.103500.
2. Kouzelis Konstantinos & Frouws Koos & van Hassel Edwin (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. 10.1186/s41072-022-00124-7.
3. Huang Jinjin & Fan Hongjun & Xu Xiangyang & Liu Zheyu (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. 10.3390/jmse10121969.
4. Heine Dirk & GGde Susanne & Dominioni Goran. (2014). Unilaterally Removing Indirect Subsidies for Maritime Fuel. *SSRN Electronic Journal*. 10.2139/ssrn.2512747.
5. Md Moshikul Alam & Mohammad Roslina & Hira Fariha & Maarop Nurazean (2022). Alternative Marine Fuel Research Advances and Future Trends: A Bibliometric Knowledge Mapping Approach. *Sustainability*. 14. 10.3390/su14094947.

6. Pekşen Duygu & Alkan Güler (2018). Application of Alternative Maritime Power (AMP) Supply to Cruise Port. *Journal of ETA Maritime Science*. 6. 307-318. 10.5505/jems.2018.15870.
7. Benet Álvaro & Villalba-Herreros Antonio & d'Amore-Domenech Rafael & Leo T.J. (2022). Knowledge gaps in fuel cell-based maritime hybrid power plants and alternative fuels. *Journal of Power Sources*. 548. 232066. 10.1016/j.jpowsour.2022.232066.
8. Barberi Salvatore & Campisi Tiziana & Neduzha Larysa (2022). The role of cold ironing in maritime transport emissions. *AIP Conference Proceedings*. 2611. 060013. 10.1063/5.0119881.
9. Wang Qiuwen & Zhang Hu & Huang Jiabei & Zhang Pengfei (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. 10.3389/fmars.2022.1082453.
10. Melnyk O., Onyshchenko S. Ensuring Safety of Navigation in the Aspect of Reducing Environmental Impact. *ISEM 2021, LNNS 463*. 2022. P. 1–9. https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8_9.
11. Onishchenko O., Golikov V., Melnyk O., Onyshchenko S., Obertiur K. 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. Series Transport*. 2022, 116, 223-235. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.116.14>.
12. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S., Voloshyn A., Kalinichenko Y., Rossomakha O., Naleva G., Rossomakha O. Autonomous Ships Concept and Mathematical Models Application in their Steering Process Control. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2022. Vol. 16, No. 3. P. 553-559. doi:10.12716/1001.16.03.18.
13. Melnyk O. Onyshchenko S. Navigational safety assessment based on Markov-model approach. *Scientific Journal of Maritime Research*. 2022. 36 (2). P. 328-337. <https://doi.org/10.31217/p.36.2.16>.
14. Застосування двигунів на водні на судах змішаного плавання можливе вже в найближчому майбутньому. *Portnews*. URL: <https://portnews.ru/news/308409/> (дата звернення 15.03.23).
15. Reshetkov D. M. & Bondaryuk M. A. & Onyshchenko S. P. (2023). Essence, advantages and existing experience of the smart ports development. *Transport development*. 2023. 4(15). P. 108-122. doi:10.33082/td.2022.4-15.09.
16. Shumylo O. M. Optimization of passenger vessels dimensional modernization taking into account the energy efficiency. Оптимізація розмірної модернізації пасажирських суден з урахуванням енергоефективності. *Transport development*. 2023. 4(15). P. 58-77. doi:10.33082/td.2022.4-15.06.
17. Розвиток дистанційних технологій керування судном як фактор забезпечення безпеки судноплавства / О. М. Мельник, О. А. Онищенко, А. О. Волошин та ін. *Розвиток транспорту*. 2022. № 3 (14). С. 179-191. DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.13>.

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

Онищенко Олег Анатольович, доктор технічних наук, професор кафедри технічної експлуатації флоту, Національний університет «Одеська морська академія», Україна. ORCID: 0000-0002-3766-3188.

Шумило Олександр Миколайович, кандидат технічних наук, професор кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації, Одеський національний морський університет. ORCID: 0000-0003-0574-1951.

Михайлова Юлія Валеріївна, кандидат економічних наук, доцент кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна. ORCID ID: 0000-0002-4882-7803.

Коробко Тетяна Олександрівна, доцент кафедри українознавства, історико-правових та мовних дисциплін, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна. ORCID: 0009-0000-1588-2163.

Обнявко Тетяна Севастьянівна, кандидат економічних наук, доцент кафедри тилового забезпечення, Військова академія, Одеса, Україна. ORCID ID: 0000-0002-2192-6377.

Melnyk Oleksiy Mykolayovych, PhD (Eng.), Assoc. Prof. at Navigation and Maritime Safety Dept., Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine. ORCID: 0000-0001-9228-8459.

Onishchenko Oleg Anatliyovych, Dr. of Science (Eng.), Professor at Technical Fleet Operation Dept., National University «Odesa Maritime Academy», Ukraine. ORCID: 0000-0003-3749-4908.

Shumylo Oleksandr Mykolayovych, PhD, Professor of the Ship Power Plants and Technical Operation Department, Odesa National Maritime University, Ukraine. ORCID: 0000-0003-0574-1951.

Mykhailova Iuliia Valeriivna, PhD (Econ.), Assoc. Prof. of the Department of Fleet Operation and Shipping Technology, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine. ORCID ID: 0000-0002-4882-7803.

Korobko Tetiana Oleksandrovna, Assoc. Prof. of the Department of Ukrainian Studies, Historical, Legal and language disciplines, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine. ORCID: 0009-0000-1588-2163.

Obniavko Tetiana Sevostianovna, PhD (Econ.), Assoc. Prof. of the Department of Logistics Military Academy, Odesa, Ukraine. ORCID ID: 0000-0002-2192-6377.

Статтю прийнято 24.03.2023 р.