

УДК 504.054+629.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/22>**Кірсанова В.В.**

Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»

Биковець Н.П.

Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»

Бражник І.Д.

Національний університет «Одеська морська академія»

ЗЕЛЕНИЙ ВОДЕНЬ ЯК СПОСІБ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ СУДОХОДСТВА

Судноплавство є найдешевшим і найпоширенішим видом транспорту міжнародної торгівлі. На його частку припадає понад 70% перевезень різних вантажів [3]. Використання найдешевших важких фракцій нафти як паливо у поєднанні з великими габаритами суден забезпечує енергоефективність морського транспорту. Проте експлуатація судів негативно впливає довкілля. На загальний обсяг судноплавства припадає близько 3% щорічних глобальних викидів CO₂ та близько 13% та 15% антропогенних викидів SO_x та NO_x відповідно [4].

З метою скорочення викидів шкідливих парникових газів здійснюється пошук альтернативних видів палива для морського судноплавства. Надії покладаються на скраплений природний газ (ЗПГ) (понад 95% метану), водень, аміак, метанол, етанол, біопаливо, синтетичне паливо та електроенергія, що виробляється сонячними панелями. З перерахованих альтернатив викопного палива, що тестуються сьогодні, водень є найбільш перспективним.

У статті аналізуються переваги та проблеми впровадження водню при його використанні як паливо в судноплавстві. Продуктами горіння водню є вода та незначна кількість NO_x. Ці його особливості дозволять суттєво скоротити викиди діоксиду карбону під час експлуатації суден. Водень може зберігатися у великій кількості протягом тривалих періодів часу, що є перевагою порівняно з батареями, які необхідно перезаряджати. ККД паливних елементів більше 60 відсотків, а за певних умов можливий ККД більше 80 відсотків. Паливні елементи безшумні, сьогодні більшість кораблів можуть бути оснащені паливними елементами.

Розглянуто основні проблеми та перешкоди на шляху розвитку зберігання водню для морської галузі. Не визначено електролізер, який є найбільш оптимальним при експлуатації судна. Зелений водень значно дорожчий у порівнянні з дизельним паливом. Потрібна розробка нової бункерувальної інфраструктури та забезпечення безпечної експлуатації цих водневих носіїв на борту корабля.

Ключові слова: судноплавство, діоксид карбону, альтернативна енергетика, зелений гідроген як паливо.

Постановка проблеми. Глобальною екологічною проблемою є зміна кліматичної системи планети Земля, спричинена надмірним накопиченням парникових газів в атмосфері. Діоксид карбону складає 72% від загальної кількості парникових газів і масштаби глобального потепління протягом століть залежатимуть від його концентрації в атмосфері. Зміна кліматичної системи планети призводить до підвищення температури, глобального потепління та викликає підвищення рівня моря та екстремальні погодні явища. [1].

У Паризькій угоді 2015 р. викладено цілі щодо запобігання глобальним змінам клімату, спрямованим на обмеження підвищення глобальної температури нижче 2°C порівняно з доіндустріальним рівнем. Сьогодні докладаються зусилля

для утримання середньої температури планети на рівні, нижчому за 1,5°C [2].

Судноплавство є найдешевшим і найпоширенішим видом транспорту міжнародної торгівлі. На його частку припадає понад 70% перевезень різних вантажів [3]. Використання найдешевших важких фракцій нафти як паливо у поєднанні з великими габаритами суден забезпечує енергоефективність морського транспорту. Проте експлуатація судів негативно впливає на довкілля. На загальний обсяг судноплавства припадає близько 3% щорічних глобальних викидів CO₂ та близько 13% та 15% антропогенних викидів SO_x та NO_x відповідно [4]. Очікується, що торгівля товарами з використанням морського транспорту зростатиме на 3,8% на рік у період із 2018

по 2023 рік [3]. Також спостерігається зростаючий попит на круїзні та пасажирські перевезення.

На нараді Міжнародної морської організації (ІМО) у Лондоні було прийнято початкову стратегію скорочення викидів парникових газів із судів, у якій викладено план скорочення викидів парникових газів від міжнародного судноплавства і поетапного відмовитися від них у перспективі. Міжнародна морська організація (ІМО) закликала до 50-відсоткового скорочення викидів парникових газів (ПГ) до 2050 року порівняно з рівнем 2008 року, щоб привести галузь у відповідність до цілей Паризької Кліматичної угоди [5]. Для досягнення цих цілей розробляються технології експлуатації суден на альтернативних видах палива, які виробляють менше або не викидають ПГ в атмосферу. [6].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Перспективними альтернативними судовими видами палива є зріджений природний газ (ЗПГ) (понад 95% метану), водень, аміак, метанол, етанол, біопаливо, синтетичне паливо та електроенергія, що виробляється сонячними панелями.

ЗПГ не синтезує SOx та утворює малу кількість NOx у процесі горіння. При використанні ЗПГ як судове паливо можливе зниження викидів CO₂ до 26% порівняно з мазутом (HFO). Однак ЗПГ необхідно зберігати у зрідженому стані, і неконтрольований витік метану може компенсувати зниження викидів CO₂ [7]. А також ЗПГ не може відповідати початковій стратегії ІМО, яка потребує скорочення викидів CO₂ на 50%.

Як судове паливо розглядається аміак, якого можна використовувати в різних первинних двигунах. Його можна зберігати при нижчому тиску і вищій температурі, ніж зріджений водень та ЗПГ. Аміак перевозиться морським транспортом, і в усьому світі існують системи зберігання та доставки. Аміак важко запалюється (порівняно зі звичайним паливом) (de Vries 2019) [8]. І є високотоксичним та біокумулятивним.

У судноплаванні покладаються сподівання на біопаливо, яке може бути вуглецево-нейтральним джерелом енергії, а потенціал скорочення викидів CO₂ протягом життєвого циклу становить до 88%. Біопаливо сумісне з існуючою інфраструктурою та системами двигунів суден. Однак виробництво біопалива дорожче, ніж звичайне викопне паливо, прямо чи опосередковано конкурує з виробництвом продуктів харчування [9].

У судноплаванні активно досліджуються та впроваджуються сонячні панелі, здатні акумулювати сонячну енергетику. Акумулятори забез-

печують рух з нульовим рівнем викидів і вдвічі ефективніші за звичайну дизель-генераторну установку. Ціни на акумулятори швидко знижуються, а продуктивність підвищилася. Недоліком акумуляторів є низька масова енергоємність (приблизно у 150 разів нижче, ніж у дизеля) та низька об'ємна щільність (приблизно у 100 разів нижче, ніж у дизеля). Виробництво акумуляторів є енергоємним, а капітальні витрати великої акумуляторної системи значно вищі, ніж у звичайної силової установки [10].

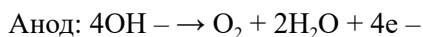
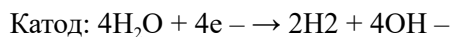
Завдяки декільком унікальним перевагам, однією з перспективних майбутніх альтернативних джерел енергії для декарбонізації судноплавства є водень.

Постановка завдання. При використанні водню як паливо єдиними побічними продуктами є вода та незначна кількість NOx. Актуальність цієї роботи обумовлена необхідністю аналізувати проблеми організації впровадження водню в судноплаванні. Оскільки ІМО прийняла початкову стратегію щодо 50-відсоткового скорочення викидів парникових газів (ПГ) до 2050 року порівняно з рівнями 2008 року, щоб привести галузь у відповідність до цілей Паризької Кліматичної угоди.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Водень (H₂), один із найпоширеніших хімічних елементів на Землі. Він є складовою води (H₂O) і багатьох органічних сполук. Отже, його можна отримати з різних джерел, включаючи викопне паливо, біомасу та воду [11]. Виробництво водню може бути досягнуто за допомогою різних технологічних процесів, включаючи риформінг (паровий, парціальний окислений, автотермічний, плазмовий та у водній фазі), газифікацію, піроліз та електроліз води [12]. Більшість водню виробляється з копалин палива. Близько трьох чвертей світового попиту водень забезпечується паровою конверсією метану з допомогою природного газу як вихідної сировини. Проте дешевизна виробництва водню з газу поєднується з великими викидами парникових газів [13]. Електроліз з використанням відновлюваних джерел енергії може забезпечити виробництво чистого водню, проте нині його припадає лише 3,9% від загального світового виробництва водню [14].

У процесі виробництва водню шляхом електролізу, при якому вода розщеплюється на водень і кисень за допомогою електрики не утворюється CO₂ як побічний продукт. Розроблено різні способи синтезу водню у процесі електролізу води. Відомі лужний, мембранний з полімерним електролітом, твердооксидний та безмембранний

електролізери. Лужний електроліз – це технологія електролізу; яка складається із двох електродів, розділених діафрагмою, яка пропускає іони у воді, але затримує газоподібні речовини. Протони у воді відновлюються до газоподібного водню на катоді, а кисень виділяється внаслідок окислення гідроксид-іонів на аноді. Реакції, що відбуваються на електродах



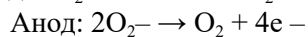
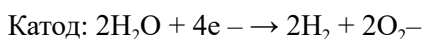
Для поділу електродів використовується діафрагма.

При електролізі з мембраною з полімерного електроліту водний електроліт замінений протонпровідящою полімерною мембраною, що не пропускає газоподібні речовини. Реакції на електродах відрізняються від реакцій у лужних електролізерах, оскільки між електродами можуть переноситися тільки протони та електрони.



Вода розщеплюється на кисень і протони, потім протони мігрують через мембрану до катода, де відбувається реакція відновлення до газоподібного водню. Як катодний матеріал використовують платину, нанесену на вуглець. Для анода використовуються катализатори на основі іридію або іридію-рутенію. Мембрани складаються з фторованої полісульфонованої кислоти, Анод, катод та мембрана збираються у компактний вузол мембранного електрода. При розміщенні всіх компонентів близько одна до одної відстань, на яку повинні мігрувати електрони та протони, зменшується, що підвищує загальну ефективність системи. Загальна ефективність електролізерів з мембраною з полімерного електроліту нижче, ніж у лужних електролізерів, але завдяки низькій проникності мембрани синтезується чистий водень [16].

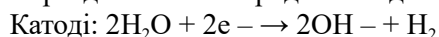
З усіх типів електролізерів, обговорюваних у літературі, системою, яка потребує найменшого споживання електроенергії, є твердооксидний електролізер. Так як він працює при температурах вище 800°C, і через високу теплову енергію, що підводиться до системи, потрібно менше електроенергії. При використанні високотемпературного потоку скидного тепла збільшується загальний електричний ККД. Твердооксидні електролізери мають мембрану, що проводить іони кисню, та електрохімічні реакції на електродах.



У цьому типі електролізера найчастіше використовуються мембрани з оксиду цирконію, ста-

білізований оксидом ітрію, матеріал, який пропускає іони кисню, залишаючись при цьому стабільним та електронним ізолюючим навіть за більш високих температур. Твердооксидні електролізери можуть бути розроблені без використання дорогих електродів із шляхетних металів. Як водневий електрод типовим електродним матеріалом є нікель-кермет (композитний керамічний і металевий матеріал), ці матеріали мають високу електропровідність і високу активність по відношенню до електрохімічних реакцій. Для кисневого анода використовують перовскітні матеріали, зазвичай LaMnO₃. Твердооксидні електролізери все ще знаходяться на стадії досліджень і розробок і стикаються з серйозними проблемами, пов'язаними з термічною стабільністю [17].

Безмембранного електролізера спочатку розроблений як система очищення баластної води, є новою інноваційною концепцією виробництва водню, яка може значно знизити вартість електролізного обладнання завдяки простій конфігурації пристрою. Найпростіша установка безмембранного електролізера ґрунтується на проточних електродах; в цій системі електроліт тече паралельно електродам і два різних випускних каналу на кінці пристрою. У цих системах використовується ефект Сегре-Сільберга, при якому бульбашки газу закріплюються близько до поверхні електроліту, де виділяються завдяки градієнту рідини електроліту. Це означає, що при протіканні електроліту через канал і окремі випускні отвори потоки газоподібного водню і кисню відокремлюються один від одного потоком водного потоку. Реакції на розділених електродах наведені в



Ця система, однак, не може виробляти водень такої ж чистоти, як, наприклад, електролізери з мембраною з полімерного електроліту, але заявлена чистота потоку водню, як і раніше, становить 99%. Оскільки в цій системі не задіяні мембрани, вона має суттєві переваги перед іншими типами електролізерів: перша перевага – проста конфігурація пристрою. Завдяки простоті безмембранної системи вона також досить стійка до забруднення та широкого діапазону умов експлуатації [18]. Також відомо, що безмембранні електролізери працюють на водопровідній воді і навіть на соляному середовищі. Ще однією перевагою є те, що безмембранні електролізери можуть працювати в широкому діапазоні рН спектру (0,35–13,7) та широкому спектрі розчинів електролітів. Всі ці переваги слід зіставляти з тим фактом, що безмембранні електролізери мають нижчий ККД

за напругою порівняно з іншими системами; це пов'язано з великою відстанню між електродами і, отже, з більш високим внутрішнім електричним опором системи порівняно з іншими електролізерами [18].

Водень, отриманий за допомогою електролізу, названий зелений водень і є єдиною формою водню з практично безвуглецевим виробничим процесом. Цей метод виробництва не новий, але витрати на виробництво зеленого водню значно вищі, порівняно з іншими способами його виробництва. Водень, отриманий в результаті електролізу з використанням відновлюваних джерел енергії, є єдиним стійким та перспективним джерелом палива для судноплавства.

Після отримання газоподібного водню його можна зберігати та транспортувати у паливних баках. Однак, оскільки водень має дуже низьку щільність енергії, його необхідно значно стискати і охолоджувати, подібно до стиснення метану для виробництва зрідженого природного газу [15].

При зберіганні стиснутого водню виникають проблеми. Потрібен великий простір на судні для його зберігання. Також є проблемою тривалий період бункування, характерний для газу з низькою густиною. Для поромів на острів Окні було описано та оцінено безпеку системи заправки стисненим воднем. Однак у цьому проекті було обрано зберігання водню за 35 МПа, а не 700 МПа. Загальна установка бункера була розрахована на 2 МВт або 800 кг Н₂ в день. Великим морським кораблям для їх експлуатації потрібно кілька 100 тонн водню, а заправка з такою швидкістю займе кілька тижнів або дуже багато форсунок. Прикріплення та звільнення такої великої кількості сопел від корабля є дуже складною та трудомісткою операцією.

Для бункування зеленого водню можуть бути використані водневі резервуари, встановлених у стандартному 20 або 40-футовому контейнері, який потім можна завантажити на судно. Це стосується паливних систем касетного типу 173, 203. Це може бути варіантом для невеликих суден, таких як пороми, але для великих суден час, необхідний для завантаження та розвантаження всіх цих контейнерів, різко збільшує час заходу в порт.

На суднах також можливе використання рідкого водню. Перш ніж порти зможуть постачати кораблі достатньою кількістю рідкого водню, необхідно буде побудувати зовсім нову паливну інфраструктуру без досвіду поводження з рідким воднем. В даний час його навіть не перевозять як товар океаном, хоча Kawasaki сподівається змі-

нити це за допомогою свого поточного проекту HySTRA. Розробка порту для рідкого водню, як і раніше, є серйозною проблемою, перш ніж рідкий водень можна буде використовувати в усьому світі як паливо.

Розробка суден, що працюють на ЗПГ, може бути основою для використання водневих суден. Проте проблеми з водневими судами будуть ще серйознішими. Температура переходу в рідкий стан приблизно на 90°C нижча і щільність енергії також у 2 рази менша. Потрібно зберігати зелений водень за більш низьких температур і при більших обсягах порівняно з ЗПГ. Паливо корабля зазвичай ділиться кілька менших баків, але у кожному з цих баків водень випаровується, створюючи частково заповнені водневі баки. У кожному з цих резервуарів можливе виплескування рідкого водню, що, як наслідок, призводить до проблем із стійкістю корабля.

Дослідження, проведене на Глобальному морському форумі у березні 2021 року, розглянуло 106 проектів, спрямованих на нульові викиди у морському судноплавстві. Майже половина цих проектів зосереджено використання водню як джерело палива з низьким вмістом вуглецю. [20]. Щоб приводити в дію кораблі, водень необхідно завантажувати в паливні елементи, в яких енергія водню перетворюється на електричну і теплову енергію, яка живить силову установку корабля. Цей процес, протилежний електролізу, може забезпечити безперервну подачу енергії, поки елемент живиться паливом, що є перевагою порівняно з батареями, які необхідно перезаряджати [21]. Ключовою перевагою водню перед іншими альтернативними видами палива є відносна простота модернізації кораблів існуючих водневими паливними елементами. Технологія паливних елементів може бути модернізована більшості кораблів. Було продемонстровано ККД паливних елементів понад 60 відсотків, а за певних умов можливе ККД понад 80 відсотків. Паливні елементи безшумні, не мають рухомих частин і легко масштабуються для великих кораблів, оскільки окремі елементи можна штабелювати. Водневе паливо може замінити 43 відсотки рейсів між США та Китаєм без будь-яких змін та 99 відсотків рейсів з незначними змінами в запасі палива чи операціях [22].

Постановка завдання. Метою цієї статті є аналіз проблем пов'язаних з використанням водню як суднове паливо, а також визначення короткострокових перспектив для його впровадження у судноплавстві.

Постановка завдання. Метою цієї статті є аналіз проблем пов'язаних з використанням водню як

суднове паливо, а також визначення короткострокових перспектив для його впровадження в судноплавстві.

Виклад основного матеріалу дослідження. Зелений водень може зіграти вирішальну роль русі морської галузі до декарбонізації. Електроліз води можна поєднувати з відновлюваною енергією, і це метод стабілізації та тривалого зберігання відновлюваної енергії. Вироблений шляхом електролізу H_2 не містить викидів вуглецю і в майбутньому може бути широко доступний по всьому світу – як суднове паливо або ключовий компонент синтетичного палива. На потенціал водню покладаються надії, але бар'єри застосування технології H_2 значні.

Вартість відновлюваного водню вища, ніж вартість парової конверсії метану, виражена у доларах США. 2016 р. ціна на водень з природного газу може становити всього 0,91–1,69 дол. США за кг – 1, тоді як ціни на відновлюваний водень становлять 3,56–9,08 \$ кг – 1 для енергії вітру та 3,34–17,30 \$ кг – 1 для сонячної енергії [24]. Для виділення одного моля водню при розщепленні води необхідно в 7 разів більше енергії, порівняно з кількістю енергії необхідної для виділення молю водню з метану [25]. Вартість зеленого водню, як очікується, знижуватимуться в міру зниження вартості відновлюваної електроенергії. Також необхідне державне втручання для заохочення приватних інвестицій у технологію зеленого водню та розвитку інфраструктури для його заправлення та транспортування.

Водень хімічно активна речовина та має великий діапазон займання. Він горітиме як при низьких, так і при високих концентраціях у поєднанні з киснем. Необхідні заходи безпеки для зниження цього ризику при зберіганні, транспортуванні та займанні. Тестування та моделювання необхідно точно налаштувати з урахуванням унікальних властивостей водню та міркувань безпеки. Існують невизначеності щодо поведінки криогенного водню (LH_2), а також порогових значень у разі детонації [25]. Проведено дослідження щодо поведінки LH_2 у сценаріях витоку у типовій конструкції суден із закритими приміщеннями та під час бункерування LH_2 .

Ці результати мають важливе значення та враховуються під час проектування морських водневих пристроїв. Високошвидкісний струменевий викид водню у великому приміщенні може не поширюватися рівномірно. Такий неоднорідний викид може призвести до утворення концентрованих кишень H_2 , які мають вищий ризик детонації.

Розмір приміщення, розташування вентиляторів, вентиляційних шахт та датчиків можуть мати велике значення у разі витоку. З метою забезпечення безпеки знадобляться спеціальні великомасштабні випробування [26].

Водень, навіть у рідкій формі, менш енергоємний, ніж бункерне паливо. Водневі паливні елементи займатимуть більше місця на вантажних суднах, що знижує ефективність та альтернативні витрати втрати вантажу. Безпосереднє використання водню, коли це можливо, може знизити витрати енергії, що відбуваються в процесі перетворення водню на інші види палива, і є кращим варіантом для впровадження ланцюжків створення вартості з нульовим рівнем викидів.

Лідери в транспортному та енергетичному секторах почали інвестувати у дослідження та розробки (НДДКР), щоб знизити виробничі витрати та вивчити масштабованість. Різке зниження витрат, необхідне у тому, щоб зелений водень став конкурентоспроможним за вартістю проти традиційним паливом. Така конкурентоспроможність можлива у середньостроковій перспективі за державної підтримки.

Дослідження 2020 року, проведене на замовлення Міжнародної ради з чистого транспорту, показало, що вартість виробництва зеленого водню з відновлюваних джерел електроенергії в США та Європі може бути знижена вдвічі до 2050 року за рахунок фінансових стимулів для просування НДДКР. Встановлення ціни вуглець можуть аналогічним чином прискорити масштабування виробництва водню. У звіті американської некомерційної організації «Ресурси для майбутнього» за 2020 рік передбачається, що податок на викиди вуглецю або податковий кредит у розмірі 50 доларів США за тону CO_2 знизить вартість водню (що виловлює 50–60 відсотків) ціна конкурентоспроможна із сірим воднем. Податковий кредит компенсував би великі витрати основного капіталу модернізацію існуючих сірих водневих установок з технологією CCUS [28].

Висновки. У роботі обговорюються кілька різних аспектів використання водню як альтернативне паливо для судноплавства. Виробництво водню внаслідок електролізу води пропонує потенціал палива з нульовим вмістом вуглецю в усьому світі. Використання зеленого водню має важливе значення для отримання екологічних переваг, порівняно з використанням дизельного палива. Проте, організація впровадження водню в судноплавстві супроводжується деякими проблемами.

Розроблено різні способи синтезу водню у процесі електролізу води. Відомі лужний, мембранний з полімерним електролітом, твердооксидний та безмембранний електролізери. Не визначено електролізер, який є найбільш оптимальним при експлуатації судна. Твердооксидний електролізер вимагає найменшого споживання електроенергії, тому що він працюють при температурах вище 800 °С, і через високу теплову енергію, що підводиться до системи, потрібно менше електроенергії. Експлуатацію твердооксидного електролізера можна поєднувати з теплою димових газів головного двигуна, що дозволить здешевити синтез зеленого водню під час руху судна. При використанні електролізера для зеленого водню в поєднанні знезараженням ізольованого баласту також може знизити вартість електролізного обладнання. Для остаточних висновків потрібні додаткові дослідження.

Зелений водень значно дорожчий порівняно з дизельним паливом. Вартість зеленого водню, як очікується, знижуватимуться в міру зниження вартості відновлюваної електроенергії. Також необхідне державне втручання для заохочення приватних інвестицій у технологію зеленого водню та розвитку інфраструктури для його заправлення та транспортування.

Основною проблемою при його впровадженні є технологія зберігання та заходи безпеки. Найбільш вірогідними методами зберігання є стислий водень і криогенний водень. Однак необхідно продовжити дослідження поведінки криогенного водню (LH₂), а також порогових значень при виникненні детонації. Судновласникам, портам та ІМО доведеться зробити стратегічний вибір щодо методів зберігання зеленого водню для судноплавства. З метою забезпечення безпеки знадобляться спеціальні великомасштабні випробування

Список літератури:

1. Taalas, P. Flagship UN Study Shows Accelerating Climate Change on Land, Sea and in the Atmosphere. Retrieved from <https://news.un.org/en/story/2020/03/1059061>
2. Agreement, P. United nations. *United Nations Treaty Collect*, 2015 p.1-27. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
3. United Nations Conference on Trade and Development. *Review of maritime transports 2018*. Retrieved from https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2018_en.pdf
4. Smith, T. W. P., Jalkanen, J. P., Anderson, B. A., Corbett, J. J., Faber, J., Hanayama, S., & Pandey, A. (2015). *Third IMO greenhouse gas study 2014*. Retrieved from <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/>
5. Tae-Hwan Joung, Seong-Gil Kang, Jong-Kap Lee, Junkeon Ahn 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* . 2020 N 4, 1-7 <https://doi.org/10.1080/25725084.2019.1707938>
6. Hyungju Kim, Kwi Yeon Koo, Tae-Hwan Joung A study on the necessity of integrated evaluation of alternative marine fuels *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping* 2020 Volume 4, Issue 2 p.26-31 <https://doi.org/10.1080/25725084.2020.1779426>
7. Dnv, G. L. Assessment of selected alternative fuels and technologies. *DNV GL–Maritime*. Dnv, G. L. 2018. Assessment of selected alternative fuels and technologies. *DNV GL–Maritime*.
8. DeVries, Safe and effective application of ammonia as a marine fuel. 2019 <http://resolver.tudelft.nl/uuid:be8cbe0a-28ec-4bd9-8ad0-648de04649b8>
9. Somerville, C. Biofuels. *Current biology*, 2007 N17(4), R115-R119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.01.010>
10. Dnv, G. L. Assessment of selected alternative fuels and technologies. 2018 *DNV GL–Maritime*.
11. Bockris, J. O. M. The hydrogen economy: Its history. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013 V38(6), p.2579-2588. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.026>
12. Qyyum, M. A., Dickson, R., Shah, S. F. A., Niaz, H., Khan, A., Liu, J. J., & Lee, M. Availability, versatility, and viability of feedstocks for hydrogen production: Product space perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021 N 145, p.110843. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110843>
13. IEA. The Future of Hydrogen. 2019. Available online: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
14. Wang, Y., & Wright, L., A Comparative Review of Alternative Fuels for the Maritime Sector: Economic, Technology, and Policy Challenges for Clean Energy Implementation. *World*, 2021 N 2(4), p.456-481 <https://doi.org/10.3390/world2040029>
15. Rodríguez J, Palmas S, Sánchez-Molina M, Amores E, Mais L, Campana R. Simple and Precise Approach for Determination of Ohmic Contribution of Diaphragms in Alkaline Water Electrolysis. *Membranes*. 2019;V 9(10) p.129. <https://doi.org/10.3390/membranes9100129>

16. Ugljesa Babic, Michel Suermann e alt Critical Review–Identifying Critical Gaps for Polymer Electrolyte Water Electrolysis Development. *Journal of The Electrochemical Society*, 2017 N164(4), doi 10.1149/2.1441704jes
17. Arunkumar Pandiyan e alt(2019) Review of solid oxide electrolysis cells: a clean energy strategy for hydrogen generation. *Nanomaterials and Energy*, N8, p.2-22 <https://doi.org/10.1680/jnaen.18.00009>
18. Laurens Van Hoecke, Ludovic Laffineur, Roy Campe, Patrice Perreault, e alt. Challenges in the use of hydrogen for maritime applications *Energy Environ. Sci.*, 2021 N 2 <https://doi.org/10.1039/D0EE01545H>
19. Hydrogen: The Key to Decarbonizing the Global Shipping Industry? April 13, 2021 <https://www.csis.org/analysis/hydrogen-key-decarbonizing-global-shipping-industry>
20. Mapping of Zero Emission Pilots and Demonstration Projects Second edition | March 2021 <https://www.globalmaritimeforum.org/content/2021/03/Mapping-of-Zero-Emission-Pilots-and-Demonstration-Projects-Second-edition.pdf>
21. Practical Application Limits of Fuel Cells and Batteries for Zero Emission Vessels <https://translate.google.com.ua/?hl=ru&sl=en&tl=ru&text=Practical>
22. Refueling assessment of a zero-emission container corridor between china and the united states: could hydrogen replace fossil fuels? <https://theicct.org/publication/refueling-assessment-of-a-zero-emission-container-corridor-between-china-and-the-united-states-could-hydrogen-replace-fossil-fuels/>
23. Buttler and H. Spliethoff, (2018) Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 2018, N 82 , p.2440 –2454 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.003>
24. Parkinson , P. Balcombe , J. F. Speirs , A. D. Hawkes and K. Hellgardt , Levelized cost of CO₂ mitigation from hydrogen production routes, *Energy Environ. Sci.*, 2019 N 12 , p.19 –40 doi.org/10.1039/C8EE021079E
25. S. A. Grigoriev , V. N. Fateev , D. G. Bessarabov and P. Millet Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2020, N45 , p.26036 –26058 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.109>
26. Five lessons to learn on hydrogen as ship fuel – DNV <https://www.dnv.com › expert-story › maritime-impact>
27. Assessment of Hydrogen Production Costs from Electrolysis: United States and Europe https://theicct.org/sites/default/files/publications/final_icct2020_assessment_of%20hydrogen_production_costs%20v2.pdf
28. Decarbonized Hydrogen in the US Power and Industrial Sectors: Identifying and Incentivizing Opportunities to Lower Emissions <https://www.rff.org/publications/reports/decarbonizing-hydrogen-us-power-and-industrial-sectors/>

Kirsanova V.V., Bykovets N.P., Brazhnik I.D. GREEN HYDROGEN AS A METHOD OF DECARBONIZATION OF SHIPS

Sea navigation is the cheapest and the most common transportation mode in international trade. Its share accounts for more than 70% of transportation of various types cargo [3]. The use of the cheapest heavy fractions of oil as fuel in combination with the large dimensions of ships ensures energy efficiency of sea transportation. However, the operation of sea vessels still has a negative impact on the environment. The total shipping volume accounts for about 3% of annual global CO₂ emissions and about 13% and 15% of anthropogenic SO_x and NO_x emissions respectively [4].

There are ongoing studies to search for alternative fuels for maritime shipping in order to reduce the emissions of harmful greenhouse gases. Liquefied natural gas (LNG), which consists of over 95% methane seems to be likely solution as well as hydrogen, ammonia, methanol, ethanol, biofuel, synthetic fuel and electricity produced by solar panels. Hydrogen is the most promising of all the listed fossil fuel alternatives among those being tested today.

The article analyzes the advantages and challenges of the introduction of hydrogen as fuel in sea navigation. The products of hydrogen combustion are water and a small amount of NO_x. These features of hydrogen will allow significantly reducing carbon dioxide emissions during the vessel operation. Hydrogen can be stored in large quantities for long periods of time, which is an advantage compared to batteries that need to be recharged regularly. The efficiency of fuel cells is more than 60 percent, and under certain conditions the efficiency can get as high as 80 percent and more. Moreover, fuel cells produce no noise. Today the majority of ships can be equipped with fuel cells. The article deals with the main problems and obstacles to hydrogen storage for the marine industry. The electrolyzer, which is considered to be the most efficient for operating the vessel, has not been defined.

Green hydrogen is much more expensive compared to diesel fuel. The development of a new bunkering infrastructure is required as well as ensuring safe operation of these hydrogen carriers on board of the ship.

Key words: shipping, carbon dioxide, alternative energy, green hydrogen as fuel.