

## ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ МОРСЬКИХ СУДЕН ЯК ВАЖЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ АТМОСФЕРИ

Кірсанова В.В.<sup>1</sup>, Биковець Н.П.<sup>1</sup>, Бражник І.Д.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Дунайський інститут

Національного університету «Одеська морська академія»  
вул. Фанагорійська, 9, 68607, м. Ізмаїл, Одеська обл.

<sup>2</sup>Національний університет «Одеська морська академія»  
вул. Дідріхсона, 8, 65000, м. Одеса

[vvkirsanova@ukr.net](mailto:vvkirsanova@ukr.net), [bnp.di2017@gmail.com](mailto:bnp.di2017@gmail.com), [ig.brazhnik@gmail.com](mailto:ig.brazhnik@gmail.com)

Провівши аналіз змін кліматичної системи Землі в результаті глобального потепління, було з'ясовано, що ця екологічна проблема не вирішена. У статті досліджено сучасний стан екологічної проблеми загалом і надлишкове накопичення парникових газів в атмосфері зокрема. Розкрито вплив діоксиду карбону на підвищення температури атмосфери внаслідок його накопичення. З'ясовано, що стабілізація клімату передбачає скорочення його викидів до обсягів, які може абсорбувати біосфера. Проаналізовано сучасні технології та інновації в судноплаванні, які дають змогу використовувати енергію вітру для скорочення викидів CO<sub>2</sub> в атмосферу.

У статті розглянуто додаткові можливості підвищення енергоефективності судноплавання на судах дедвейтом 50 000 регстр. тонн за рахунок реконструкції системи інертних газів, яка є обов'язковою для танкерів і хімовозів. При розробці технології з накопичення димових газів головного двигуна у призначених ємностях можлива економія палива. При накопиченні діоксиду карбону і його збереженні в зрідженому стані на судні роль газогенератора може виконувати головний двигун.

Найбільш оптимальною для цієї мети є система уловлювання діоксиду карбону, запропонована Швейцарським центром енергетичних досліджень SCCER EIP, який розробив технологію уловлювання діоксиду карбону з вихлопних газів двигуна внутрішнього згоряння з використанням адсорбції при коливаннях температури. За такої реконструкції економія палива в судноплаванні складе 2 839 200 тонн у рік. Запропонована реконструкція зменшить не лише витрати при експлуатації суден, але й викиди CO<sub>2</sub> на 6 000 000 тонн.

Отримані результати вказують на можливу економію великих обсягів вихлопного палива, однак вона частково є зниженою, оскільки можлива економія палива і зменшення викидів діоксиду карбону в судноплаванні визначені без урахування наявності аналогічних інертних систем на балкерах. *Ключові слова:* декарбонізація атмосфери, енергоефективність транспорту, енергія вітру, інертні системи судна, система акумуляції діоксиду карбону.

### **Energy efficiency of sea vessels as an important element of decarbonization of the atmosphere. Kirsanova V., Bykovets N., Brazhnik I.**

When analyzing the changes in the Earth's climate system as a result of global warming, we came to the conclusion that this ecological problem is unsolved. These phenomena are caused by the excessive accumulation of greenhouse gases in the atmosphere as a result of anthropogenic influence. Among greenhouse gases, carbon dioxide plays a major role in climate change. Climate stabilization implies reducing its emissions to volumes that the biosphere can absorb. Modern technologies and innovations make it possible to use wind energy as an element of efficiency in shipping industry.

Additional possibilities for increasing the energy efficiency of navigation on ships with a deadweight of 50 000 registered tones at the expense of the inert gas system's reconstruction, which is mandatory for tankers and chemical carriers, are considered. While developing a technology for the accumulation of the main engine's flue gases in designated containers, fuel saving is possible. The role of the gas generator can be performed by the main engine, when carbon dioxide accumulates and is kept in a liquefied form on the ship.

The most optimal for this purpose is the carbon dioxide capture system was suggested by the Swiss Center of Energy Research SCCER EIP. The above mentioned center developed a technology for capturing carbon dioxide from the exhaust gases of an internal combustion engine using adsorption at temperature fluctuations. With such reconstruction, the savings in shipping industry will be 2 839 200 tons per year. The proposed reconstruction will reduce not only the expenses in ships' operating but also CO<sub>2</sub> emissions by six million tons.

The obtained results point to possible savings in large volumes of fossil fuels, but are partially reduced, as the possible fuel economy and reduction of carbon dioxide emissions in shipping industry are determined without taking into account the presence of similar inert systems on bulk carriers. *Key words:* decarbonization of the atmosphere, energy efficiency of transport, inert systems of the ship, carbon dioxide capture system.

**Постановка проблеми.** Зміна кліматичної системи Землі в результаті глобального потепління є не вирішеною екологічною проблемою. Це явище зумовлене надлишковим накопиченням парникових газів в атмосфері в результаті антропогенного впливу [1–2]. Серед парникових газів у зміні клімату головна роль відведена діоксиду карбону [3–4].

Стабілізація клімату передбачає скорочення викидів діоксиду карбону до обсягів, які зможе абсорбувати біосфера. Щоб уникнути хаотизації кліматичних процесів, наш економічний уклад повинен стати карбононейтральним не пізніше 2050 року [5–6].

Економічні показники і тенденції у використанні природного газу і нафти у світі вказують на подальше

зростання викидів діоксиду карбону у 2020 році [7]. Транспорт є найбільшим джерелом викидів діоксиду карбону і фактором кліматичних змін. На глобальному рівні на транспорт припадає приблизно 26% сумарного споживання енергії, серед якого найчисленнішим є автомобільний транспорт. Морський транспорт також входить до складу десяти найбільших забруднювачів атмосфери [8–9].

Скорочення викидів CO<sub>2</sub> у транспортному секторі є найбільш складним процесом. Електрифікація транспортних засобів є перспективним рішенням для заміни викопного палива для транспорту. Однак така альтернатива обмежена щільністю накопичення електрики в батареях і накопиченням великої кількості утилізованих акумуляторів. Викопні види палива не можна повністю замінити на біопаливо, оскільки для обробки великих обсягів біомаси олійних культур потрібні значні площі родючої землі.

Фіксація CO<sub>2</sub> також запропонована як спосіб декарбонізації атмосфери. Однак фіксація діоксиду карбону з метою його нагромадження вимагає великих витрат на його зберігання. Нині проводяться численні дослідження, присвячені методам фіксації і переробки діоксиду карбону, багато з них перебувають на стадії лабораторних досліджень. Зменшити кількість викидів карбону в атмосферу також можливо шляхом збільшення енергоефективності транспортних засобів.

**Актуальність дослідження.** Екологічні проблеми, пов'язані з накопиченням діоксиду карбону в атмосфері, набувають особливого значення, оскільки їх наслідки зумовлюють зміну кліматичної системи планети. Ці явища призводять до людських та екологічних катастроф [10–12]. Останніми роками реєструється підвищення концентрації парникових газів і збільшення середньорічної температури кліматичної системи Землі [7].

При підвищенні температури на два градуси відбудеться переломний момент у процесі зміни клімату, що, ймовірно, вивільнить гігантські маси метану внаслідок танення вічної мерзлоти в Канаді, Росії, льодовиків у Заполяр'ї та на Гімалаях. Земля почне абсорбувати більше сонячного тепла, що може призвести до підвищення рівня моря до кількох метрів. Також можливе випаровування діоксиду карбону, розчиненого у Світовому океані. Усі ці явища можуть призвести до знищення живої матерії на Землі [10–12].

У Парижі в 2015 році відбулася XXI Конференція ООН зі зміни клімату (COP21), під час якої було підписано угоду щодо обмеження рівня глобального потепління. Вказана угода зобов'язала країни стримувати підвищення температури нижче двох градусів Цельсія (3,6 Фаренгейта) [13].

Проблемі глобального потепління на планеті приділили увагу й на Мадридській конференції зі зміни клімату, яка відбулася у грудні 2019 року. Учасники

заходу зазначали, що сучасний спосіб життя людства ставить під загрозу саме життя на планеті. Не існує єдиного рішення, яке вирішило б проблему кліматичної кризи, тому необхідно сприяти дослідженням не лише в галузі поновлюваних джерел енергії і фіксації діоксиду карбону, а й при розробці методів більш ефективного використання енергії, оскільки до 2050 року необхідно скоротити викиди діоксиду карбону на 50% [14].

До десяти найбільших забруднювачів повітря належить морський транспорт, тому були розроблені вимоги до енергоефективності цього виду транспорту. На 62-й нараді (липень 2011 року) Комітет із захисту морського середовища (далі – МЕРС) Міжнародної морської організації (далі – ІМО) прийняв поправку щодо захисту атмосфери від забруднення суднами, долучивши Додаток VI МАРПОЛ 73/78, зробивши її обов'язковою. Був розроблений індекс проектування енергоефективності (далі – EEDI) для нових суден, а також план управління енергоефективністю суден (далі – SEEMP) для усіх суден.

Резолюцією МЕРС 70 був затверджений план із розробки дорожньої карти для стратегії ІМО щодо скорочення викидів парникових газів із суден. Вказаний план включав короткострокові, середньострокові і довгострокові заходи. Завершення етапу впровадження стратегії планується у 2023 році. Первісна стратегія ІМО щодо скорочення викидів парникових газів із суден викладена в резолюції МЕРС 72, а в резолюції МЕРС 73 опубліковані програми відповідно до первісної стратегії скорочення викидів парникових газів ІМО.

Досягнення оптимальної енергоефективності при використанні та управлінні судна можливе за наявності комплексного підходу до вирішення цієї проблеми. Автори Плану управління енергоефективністю судна рекомендують судновласникам і морським транспортним організаціям зосередити увагу на низці таких ключових моментів: ефективному витратанні палива, дизайні корпусу і рухової установки, обслуговуванні та експлуатації механізмів і обладнання, управлінні судном і флотом, оптимізації вантажних операцій, енергопостачанні та кадровій підготовці. Міжнародна шипінгова палата до головних умов зменшення викидів діоксиду карбону відносить зниження швидкості руху, оптимізацію водного баласту і маршрутів з урахуванням погодних умов, своєчасність заходу судна в порт, застосування нових видів палива. Такі заходи, за оцінками експертів, до 2050 року зможуть скоротити викид газів на 50% [15].

**Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями.** Енергоефективність судноплавства є важливою умовою декарбонізації атмосфери, вона відповідає стратегії Міжнародної морської організації щодо зниження викидів парникових газів із суден. Тому вдосконалення технологічних процесів з метою під-

вищення енергоефективності в суднопластві є важливим науковим і практичним дослідженням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Нині у суднопластві використовуються альтернативні джерела енергії, які можуть підвищити енергоефективність судна, серед них особливий інтерес викликає енергія вітру. Сучасні технології та інновації в галузі морського транспорту дають змогу використовувати енергію вітру як елемент ефективності роботи судна.

У 2016 році була опублікована доповідь незалежної науково-дослідницької консалтингової організації "CE Deifi", яка спеціалізується на розробці інноваційних рішень екологічних проблем. Наукові співробітники організації досліджували чотири види сучасних вітряних установок: жорсткі вітрила, буксирвальні кайти, ротори і вітрові турбіни. Найкращих показників економії палива для великих суден було досягнуто при застосуванні ротора Флеттнера, а для малих суден – Кайт-вітрила.

Установка системи Кайт-вітрила не потребує виводу судна з експлуатації і може бути встановлена незалежно від року побудови судна. Для експлуатації та обслуговування установки немає необхідності в збільшенні кількості екіпажу. При використанні системи Кайт-вітрила економія палива становить від 10 до 20%, при цьому вона не впливає на остійність судна. Це означає, що Кайт-вітрило не впливає на безпеку плавання, не провокує крен і не змінює габаритів судна. Ми вважаємо, що, враховуючи небезпеку глобального потепління, систему Кайт-вітрила необхідно більш широко впроваджувати та проводити дослідження з її удосконалення [16].

На великогабаритних суднах нині встановлюються ротори Флеттнера, засновані на використанні ефекту Магнуса. На судні E-SHIP 1, побудованому у 2010 році на замовлення німецької компанії Enercon, на верхній палубі встановлено чотири ротора типу Флеттнер висотою 27 метрів і діаметром 4 метри. Двигунами слугують дев'ять силових установок Mitsubishi, ротори обертаються за допомогою парової турбіни виробництва Siemens, яка працює від відпрацьованих газів. Нині така технологія дозволяє зекономити паливо до 15%. Передбачається, що роторні вітрила можуть досягти до 30-40% економії.

Під час аналізу даних було з'ясовано, що застосування технології ефекту Магнуса доцільно використовувати на нових суднах, конструкція яких буде це передбачати. Це пов'язано з тим, що діючі судна будуть вимагати серйозних конструктивних змін і великих капіталовкладень, що є економічно недоцільним [17].

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** У статті розглянуто можливість скорочення викидів парникових газів при реконструкції та вдосконаленні процесів інертизації танків нафто-

наливних танкерів / продуктозовів і хімовозів з установкою інертного газу.

**Виклад основного матеріалу.** Система інертних газів може застосовуватися як основний засіб пожежогасіння в суховантажних трюмах, а також як засіб попередження виникнення пожежі шляхом створення і постійного підтримання у вантажних танках атмосфери, яка не запалюється.

Згідно з вимогами Конвенції SOLAS-74, система інертних газів є обов'язковою для танкерів дедвейтом 20 000 реєстр. тонн і більше. Система повинна підтримувати в будь-якій частині вантажного танка атмосферу із вмістом кисню не більше 8% за обсягом, а також надлишкового тиску не більше 20 кПа, який перешкоджає надходженню повітря. Згідно з Правилами Регістру, у вантажні танки повинен подаватися інертний газ з вмістом кисню не більше 5% за обсягом.

Система забезпечує подачу інертного газу у вантажні танки в кількості 125% від максимальної продуктивності розвантаження судна. Таким чином здійснюється заповнення обсягів танків, які вивантажуються з урахуванням можливості випаровування деякого об'єму інертного газу. Як інертний газ можуть використовуватися димові гази, що пройшли обробку від головних або допоміжних котлів.

Нині набули поширення спеціальні генератори інертних газів різного типу, які включають у себе джерело інертного газу, скруббер, магістральний трубопровід із відгалуженнями в захищені обсяги, вентилятори, захисні пристрої і арматуру, пристрої контролю та сигналізації. Джерелами інертного газу можуть слугувати головні або допоміжні котли і спеціальні газогенератори.

Проведено численні дослідження, присвячені оптимізації обладнання, що забезпечує безпеку вантажних перевезень, в результаті яких було розроблено покращену технологію виробництва інертних газів у суднопластві. Лідером за виробництвом є компанія Альфа Лаваль. При вдосконаленні технології виробництва інертних газів насамперед враховуються вимоги пожежної безпеки для різних типів суден, має значення і оптимізація процесу горіння та зменшення утворення сажі. В усіх системах головним елементом є газогенератор, у якому спалюють певну кількість палива [18].

Паралельно на суднах працює головний двигун, який забезпечує рух судна і виділяє достатню кількість інертних газів. При розробці технології з накопичення димових газів головного двигуна у призначених ємностях можлива економія палива. Роль газогенератора може виконувати головний двигун при накопиченні діоксиду карбону і його зберіганні в зрідженому стані на судні. Найбільш оптимальною для цієї мети є система уловлювання діоксиду карбону, запропонована Швейцарським центром енергетичних досліджень SCCER EIP. Він розробив технологію уловлювання діоксиду карбону з вихлопних

газів двигуна внутрішнього згоряння з використанням адсорбції при коливаннях температури.

Система поглинає діоксид карбону з вихлопних газів двигуна і дозволяє його накопичувати в зрідженому стані. Адсорбенти, леговані аміном, демонструють високі показники ефективності у водному середовищі, основним завданням яких є акумуляція CO<sub>2</sub> [19]. Система акумуляції CO<sub>2</sub> володіє енергетичною автономністю і не вимагає зовнішнього живлення. Технологія адсорбції зі зміною температури (далі – ТАЗТ) із турбокомпресорами є оптимальним вибором для CO<sub>2</sub>, що акумулюється з транспортних засобів без будь-яких енергетичних втрат.

Потік вихлопних газів охолоджується до 25°C, а вода конденсується і видаляється. У цьому випадку CO<sub>2</sub> акумулюється, стискається, зріджується і зберігається в резервуарі-сховищі. Критична точка CO<sub>2</sub> становить 31,1°C і 73,8 бар. Щоб зберегти рідкий CO<sub>2</sub> влітку за температури близько 25°C, буде потрібна ефективна система охолодження для роботи системи акумулювання та зберігання CO<sub>2</sub>. Запропонована система накопичення діоксиду карбону розроблена для вантажного автотранспорту. Дизельний двигун таких автомобілів споживає 6,25 л дизельного палива на годину. Це означає, що утворюється 13,19 кг CO<sub>2</sub>. Тобто система захоплення CO<sub>2</sub> потребує 131,88 кг/год (163,8 л/ч) адсорбенту. Тривалість циклу ТАЗТ становить 1 годину, а регенований адсорбент може бути використаний у наступному циклі ТАЗТ.

Запропонована система може бути використана для накопичення діоксиду карбону з метою інертизації вантажних приміщень, що дозволить заощадити певні обсяги палива. З метою визначення обсягів передбачуваної економії палива в судноплаванні у статті проаналізовано економію палива при реконструкції установки інертного газу на танкерах і хімовозах дедвейту 50 000 реєстр. тонн, яка спалює за годину 350 кг палива. Припустили, що судно експлуатувалося на лінії, на якій вивантаження відбувається раз на тиждень, протягом 24 годин. За цих умов при одній вантажній операції витратиться 350 кг пального на годину. Витрата палива за одну добу на одному судні складатиме 8400 кг, а за рік –

436 800 кг. Якщо витрату палива за рік помножити на кількість суден з аналогічною водотоннажністю, то можна визначити приблизні можливості економії палива у судноплаванні загалом.

У світі 7444 нафтоналивних танкери і 5734 хімовози [20]. Припустимо, що така система інертного газу встановлена на 6500 суден. При реконструкції цих систем у судноплаванні можлива економія палива обсягом 2 839 200 тонн викопного палива за рік. Отримані результати вказують на можливу економію великих обсягів викопного палива, проте вони є частково зниженими, оскільки можлива економія палива у судноплаванні визначена без урахування наявності аналогічних інертних систем на балкерах. Якщо 6,25 л дизельного палива утворюють 13,19 кг діоксиду карбону, то при спалюванні 2 839 200 тонн в атмосферу викидається 5 991 848 тонн CO<sub>2</sub>. Проведене дослідження показало, що цих викидів можна уникнути.

**Головні висновки.** До десяти найбільших забруднювачів атмосфери входить морський транспорт. Згідно з вимогами Конвенції SOLAS-74, система інертних газів є обов'язковою для танкерів дедвейтом 20 000 реєстр. тонн і більше. Як інертний газ використовуються димові гази, що пройшли обробку від допоміжних котлів або спеціальних газогенераторів.

У статті проаналізовано конструкцію і роботу газогенераторів суден із водотоннажністю до 50 000 тонн. При їх реконструкції з метою накопичення і подальшого використання димових газів головного двигуна для інертизації танків можливе зменшення викидів діоксиду карбону в атмосферу на шість мільйонів тонн за рік. Запропонована реконструкція зменшить не тільки викиди CO<sub>2</sub>, але і витрати при експлуатації суден.

При реконструкції системи інертних газів суден доцільно використовувати системи акумулювання діоксиду карбону, запропоновану Швейцарським центром енергетичних досліджень SCCER EIP. Він розробив технологію акумулювання діоксиду карбону з вихлопних газів двигуна внутрішнього згоряння з використанням адсорбції при коливаннях температури.

### Література

1. Білявський Г.О. Техногенний вплив на атмосферу. Основи екології. К. : Лібра, 2006. С. 170–176.
2. Джигирей В.С. Забруднення атмосфери. Екологія та охорона навколишнього середовища. К. : Знання, 2007. С. 170–176.
3. Джигирей В.С. Екологія та охорона навколишнього природного середовища. К. : Знання, 2007. С. 174–176.
4. О переломных моментах в истории климата Земли см. Spiegel Online. URL: <http://www.spiegel.de/flash/0,5532,17184,00.html> (дата звернення: 03.12.2020).
5. Ruth Lorenz, Zélie Stalhandske Erich M. Fischer. Detection of a Climate Change Signal in Extreme Heat, Heat Stress and Cold in Europe From Geophysical Research Letters, 17 July 2019. URL: <https://doi.org/10.1029/2019GL082062> (дата звернення: 11.11.2020).
6. UN report on oceans, frozen zones: the facts (2019, August 29) retrieved 20 November 2019. URL: <https://phys.org/news/2019-08-oceans-frozen-zones-facts> (дата звернення: 10.11.2020).
7. Сергей Колонов. Выбросы CO<sub>2</sub> в 2019 году вновь достигли рекорда. URL: <https://hightech.plus/2019/12/16/vibrosi-co2-v-2019-godu-vnov-dostigli-rekorda> (дата звернення: 06.11.2020).

8. Глобальный транспортный сектор: выбросы CO<sub>2</sub> растут. URL: <https://www.planete-energies.com/en/medias/close/global-transportation> (дата звернення: 03.11.2020).
9. Топливо в авиации и судоходстве. URL: <https://www.planete-energies.com/en/medias/close/fuels-aviation-and-shippingsector-co2-emissions-rise> (дата звернення: 03.11.2020).
10. Donaldi S. Permana et al, Disappearance of the last tropical glaciers in the Western Pacific Warm Pool (Papua, Indonesia) appears imminent National Academy of Sciences. December 26, 2019 116 (52) 26382-26388; first. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1822037116> (дата звернення: 25.11.2020)
11. Holland, p.r., bracegirdle, t.j., dutrieux, p. *Et al.* West antarctic ice loss influenced by internal climate variability and anthropogenic forcing Nature Geoscience. Volume 12. 2019. P. 718–724. URL: <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0420-9> (дата звернення: 25.11.2020).
12. Maya K. Buchanan, Michael Oppenheimer, Robert E. Kopp. Amplification of flood frequencies with local sea level rise and emerging flood regimes Published 7 June 2017. IOP Publishing Ltd Environmental Research Letters. Volume 12, Number 6. URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6cb3> (дата звернення: 22.11.2020).
13. Рогинко С.А. Итоги Парижской конференции ООН по климату 2015 года. Современная Европа. 2016. С. 42–52. URL: <http://dx.doi.org/10.15211/soveurope320164252> (дата звернення: 20.11.2020).
14. В Мадриде открылась 25-я климатическая конференция ООН. URL: <https://p.dw.com/p/3U5Eg> (дата звернення: 02.12.2020).
15. Горб С. Новые правила энергоэффективности для судов. Порты Украины. № 1(123). 2013. С. 34–35.
16. Ветряные фрахтовщики. URL: <https://phys.org/news/2015-01-wind-powered-freighters.html> (дата звернення: 11.11.2020).
17. Максимов С.Б. Использование энергии ветра – один из потенциальных путей повышения энергоэффективности морских судов // VIII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту»: матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції. Ізмаїл: ДІ НУ «ОМА», 2017. С. 172–176.
18. Система инертных газов. Морская библиотека. URL: <http://sea-library.ru/bezopasnost-plavanija/195-inertnie-gazi.html> (дата звернення: 11.11.2020).
19. Shivom Sharma, François Maréchal. Carbon Dioxide Capture From Internal Combustion Engine Exhaust Using Temperature Swing Adsorption, Front. Energy Res., 16 December, 2019. URL: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00143> (application Date: 21.11.2020).
20. Number of ships in the world merchant fleet as of January 1, 2019. URL: <https://www.statista.com/statistics/264024/number-of-merchant-ships-worldwide-by-type/> (application Date: 20.11.2020).