

УДК 621.431
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2023.1\(490\).3](https://doi.org/10.15589/znp2023.1(490).3)

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF ALTERNATIVE TYPES OF FUEL ON THE COST OF THE SHIP LIFE CYCLE

АНАЛІЗ ВПЛИВУ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВИДІВ ПАЛИВА НА ВАРТІСТЬ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ СУДНА

Liudmyla V. Pizintsali¹
lvpizintsali@gmail.com
ORCID: 0000-0002-8046-0917

Olena I. Rossomakha¹
eirossomakha@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4425-2192

Oleksandr M. Shumylo¹
shumylo.alexander@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0574-1951

Nadiia I. Aleksandrovska¹
a.nadegda@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6591-2068

Oleh A. Rossomakha¹
roleg.post@gmail.com
ORCID: 0000-0002-0230-9453

Tetiana V. Rabocha²
888tanyava8@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9475-334X

Oleksii V. Malyshkin²
ma-1960@ukr.net
ORCID: 0000-0002-2538-1167

Л.В. Пізінцалі¹,
канд. техн. наук, доцент

О.І. Россомаха¹,
канд. техн. наук, доцент

О.М. Шумило¹,
канд. техн. наук, професор

Н.І. Александровська¹,
канд. техн. наук, доцент,

О.А. Россомаха¹,
начальник навчального відділу, старший викладач

Т.В. Рабоча²,
канд. техн. наук, доцент

О.В. Малишкін²,
старший викладач

Merchant Marine Institute of Odesa National Maritime University, Odesa¹
Odesa Military Academy, Odesa²

*Навчально-науковий інститут морського флоту
Одеського національного морського університету, м. Одеса¹
Військова академія (м. Одеса), м. Одеса²*

Abstract

Introduction. The relevance of scientific research is determined by the strengthening of requirements for emissions into the atmosphere of harmful substances contained in the exhaust gases of the main ship's engines and the impact of ship's fuel on the cost of the ship's life cycle. The international convention MARPOL 73/78, adopted by the International Maritime Organization (IMO), is the main document containing a number of measures to prevent pollution of the marine environment from ships.

The above problem has been in the center of attention of specialists in the shipping industry for a long time.

Purpose. The article analyzes the use of alternative types of marine fuel and attempts to analyze their impact on the life cycle cost (LCC) of the vessel.

Today, an important long-term factor in the marine fuel market is the development of alternative types of fuels that should completely or partially replace hydrocarbons. The authors considered the peculiarities of the use of alternative fuels, the number and fate of which is constantly increasing: LNG, algae, edible oil, ammonia, electricity, methanol, solar energy, air, hydrogen.

Results. The authors tried to investigate the role of the influence of alternative types of marine fuel on the cost of the ship's fuel economy. Taking into account these realities, during the last decades in the industry, in parallel with classical

shipbuilding, the design and construction of ships using alternative energy sources as fuel: LNG, algae, edible oil, ammonia, electricity, methanol, solar energy, air, hydrogen is actively developing.

Today, fuel for SEU is considered not only from the standpoint of plant reliability and economy, but also taking into account the fulfillment of environmental requirements.

Conclusions. The results of the study showed that ways to reduce the cost of the ship's fuel economy, combat harmful emissions into the atmosphere, and significantly reduce operating costs depend on the use of alternative types of ship fuel, primarily liquefied natural gas and electricity.

Key words: alternative fuels; marine fuel; life cycle; ship life cycle cost; liquefied natural gas; algae; edible oil; ammonia; electricity; methanol; solar energy; air; hydrogen.

Анотація

Вступ. Актуальність наукового дослідження визначена посиленням вимог до викидів в атмосферу шкідливих речовин, що містяться у вихлопних газах головних суднових двигунів та впливу суднового палива на вартість життєвого циклу судна. Міжнародна конвенція МАРПОЛ 73/78, прийнята Міжнародною морською організацією (ІМО), є основним документом, що містить низку заходів щодо запобігання забрудненню морського середовища з суден.

Наведена вище проблема знаходиться в центрі уваги фахівців суднової галузі вже тривалий час.

Мета. В статті проведено аналіз використання альтернативних видів суднового палива та спроба проаналізувати їх вплив на вартість життєвого циклу (ЖЦ) судна.

Сьогодні на ринку суднового палива важливим довготривалим фактором стає розвиток альтернативних видів палив, які повинні повністю або частково замінити вуглеводні. Автори розглянули особливості використання альтернативних видів палива, кількість і доля яких постійно зростає: СПГ, водорості, харчова олія, аміак, електроенергія, метанол, сонячна енергія, повітря, водень.

Результати. Автори спробували дослідити роль впливу альтернативних видів суднового палива на вартість ЖЦ судна. З урахуванням даних реалій, протягом останніх десятиліть у галузі, паралельно з класичним суднобудуванням, активно розвивається проектування та будівництво суден, що використовують як паливо альтернативні джерела енергії: ЗПГ, водорості, харчова олія, аміак, електроенергія, метанол, сонячна енергія, повітря, водень. Сьогодні паливо для СЕУ розглядається не лише з позицій надійності роботи установок та економіки, а й з урахуванням виконання вимог щодо екології.

Висновки. Результати дослідження показали, що шляхи зниження вартості ЖЦ судна, боротьби з шкідливими викидами у атмосферу та значного зниження експлуатаційних витрат залежить від використання альтернативних видів суднового палива, в першу чергу, зрідженого природного газу і електроенергії.

Ключові слова: альтернативні види палива; суднове паливо; життєвий цикл; вартість життєвого циклу судна; зріджений природний газ; водорості; харчова олія; аміак; електроенергія; метанол; сонячна енергія; повітря; водень.

ВСТУП

Актуальність наукового дослідження визначена посиленням вимог до викидів в атмосферу шкідливих речовин при роботі головних суднових двигунів. Міжнародна конвенція МАРПОЛ 73/78, прийнята Міжнародною морською організацією (ІМО), є основним документом, що містить низку заходів щодо запобігання забрудненню морського середовища з суден.

Екологічні проблеми та зростання цін на паливо ведуть до необхідності пошуку нових рішень для судноплавства. Альтернатив не так багато. У статті розглядаються варіанти застосування альтернативних видів палива та їх вплив на вартість ЖЦ судна на прикладі електроенергії, зрідженого природного газу, водню та аміаку з низьким викидом в атмосферу, альтернативних видів палива на основі відпрацьованої олії, водоростей, вітру, сонячної енергії.

Основними нормативними документами з обмеження шкідливих викидів є вимоги Міжнародної конвенції MARPOL 73/78, Додаток VI «Правила поперед-

ження забруднення повітряного середовища з суден» морської міжурядової організації ІМО [1].

ПОСТАНОВА ЗАДАЧІ

Проблеми енергозбереження (економії палива) завжди були актуальними. Останні десятиліття вони загострилися вимогами щодо захисту довкілля від шкідливих викидів із суден.

Тому, судновласники вкладають великі гроші у «зелені» морські технології, що використовують альтернативні, поновлювані джерела палива, які повинні повністю або частково замінити вуглеводні. Актуальним є і аналіз впливу альтернативних видів суднового палива на вартість ЖЦ судна.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Наведена вище проблема знаходиться в центрі уваги фахівців суднової галузі вже тривалий час.

У роботах [2–4] в моделі визначення вартості ЖЦ судна автори врахували витрати на паливо-мастильні

матеріали з урахуванням власного значення інфляції та проведено оптимізацію параметрів вартості ЖЦ судна програмним комплексом IOSO NM, а також вдосконалення моделі визначення вартості ЖЦ судна шляхом впровадження методів аналізу ризиків.

У роботі [5] наведено детальний аналіз стану галузі паливно-енергетичних ресурсів. Проаналізовано основні тенденції щодо використання ключових традиційних джерел енергії як в Україні, так і в світі в цілому. Наведено головні недоліки та екологічні проблеми, пов'язані з використанням традиційних видів палива. Автором проаналізовано всі варіанти використання альтернативних видів рідкого палива та альтернативних видів газового палива. До найбільш перспективних альтернативних видів газового палива належать: газ (метан) вугільних родовищ та інше газове паливо, одержане з біологічної сировини, у тому числі з біологічних відходів; газ, одержаний з промислових відходів; стиснений та зріджений природний газ (ЗПГ), зріджений нафтовий газ, вільний газ метан, якщо вони одержані з газових, газоконденсатних та нафтових родовищ непромислового значення та вичерпаних родовищ і не належать до традиційних видів палива.

У роботі [6] приведений аналіз існуючих альтернативних палив для двигунів внутрішнього згорання сучасних енергетичних засобів та розглянута ефективність їх використання в залежності від типу двигуна.

У статті [7] автори вказують, що екологічні обмеження *MARPOL* привели до появи розвитку та використання нових видів енергії: палив з низьким вмістом сірки; зрідженого природного газу; електричної енергії, біопалива. Автори підкреслюють, що в прийнятій Національній транспортній стратегії України на період до 2030 року для вирішення системних проблем не передбачені нові шляхи і ефективні методи відновлення і розвитку водного транспорту України. Хоча в ній підкреслюється, що пріоритетами є використання паливо-економічних і екологічних транспортних засобів, застосування альтернативних видів палива, охорона навколишнього середовища і збереження природо охоронюваних територій при розвитку транспортної інфраструктури.

У статті [8] розглянуто питання розвитку альтернативних джерел палива в Україні. Досліджено роль і значення останніх у контексті формування вітчизняної енергетичної стратегії.

Водень, аміак, відновлюваний метанол, біоетанол, диметиловий ефір, біодизель та їх основні фізико-хімічні властивості, транспортування, зберігання, характеристика згорання, показники викидів були розглянуті у статті [9]. Було встановлено, що синтетичні види палива з нульовим вмістом вуглецю, включаючи водень та аміак, що супроводжуються

чистим виробництвом, можуть відігравати важливу роль у внутрішньому та каботажному судноплаванні. Метанол, ймовірно, є найбільш перспективним альтернативним паливом для глобальних морських перевезень замість інших видів біопалива з нульовим вмістом вуглецю, таких як природний газ, що відновлюється, біоетанол, біогенний диметиловий ефір і біодизель.

Потенціал використання водню як палива описується у статті [10]: «Водень забезпечує більш високу щільність енергії, ніж існуючі вуглеводневі палива, і можливість мінімізувати шкідливі викиди відпрацьованих газів».

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Проблеми енергозбереження (по суті, економія палива) та захисту навколишнього середовища від шкідливих викидів із суден, які були завжди актуальними, за останнє десятиліття ще більше загострилися. Це викликано нестійкістю світового нафтового ринку та посиленням вимог природоохоронних організацій, включаючи нові положення Міжнародної морської організації (ІМО).

Морська індустрія розвивається швидкими темпами. Щоб задовольняти усі вимоги сучасних правил і стандартів, нові судна будуються із застосуванням передових технологій – для зниження викидів та експлуатаційних витрат. Оскільки попит на екологічно чисті судна збільшується, судновласникикладають великі гроші у «зелені» морські технології, що використовують альтернативні, поновлювані джерела палива, які повинні повністю або частково замінити вуглеводні.

Постійно, особливо останні десятиліття, проводяться дослідження з пошуку більш економічних та екологічних суднових палив.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Автори статті за мету поставили провести аналіз існуючих сьогодні альтернативних видів суднового палива та їх вплив на вартість ЖЦ судна, та перспективні напрямки розвитку ринку суднового палива.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

У статті використано загальнонаукові методи наукового синтезу для ролі і значення використання альтернативних джерел енергії в СЕУ на морських судах, системний підхід для обґрунтування впливу вартості альтернативного суднового палива на ЖЦ судна.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

У загальному вигляді вартість ЖЦ судна складається з наступних доданків [2]:

– витрати на проектування та будівництво судна, його введення в експлуатацію – $C_{пс}$;

– витрати на експлуатацію (вміст екіпажу, страхування, податок на майно, витрати на забезпечення функціонування у період експлуатації) – C_E ;

– витрати на паливно-мастильні матеріали (паливо) – C_T , що розраховуються з урахуванням власного значення інфляції – I_T ;

– витрати на ремонт, включаючи вартість змінно-запасних частин і ремонтних матеріалів, – C_P ;

– вартість утилізації до моменту виведення судна з експлуатації – C_U .

З урахуванням дисконтування, формула розрахунку C_Σ набере вигляду:

$$C_\Sigma = C_{\text{пс}} + \sum_{t=1}^T \left[\frac{1}{(1+k)^t} \cdot C_E \right] + \sum_{t=1}^T \left[\frac{(1+I_T)^t}{(1+k)^t} \cdot C_T \right] + \sum_{t=1}^T \left[\frac{1}{(1+k)^t} \cdot C_P \right] + \frac{C_U}{(1+k)^T}, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт дисконтування; T – термін ЖЦ судна; t – поточний рік.

Міжнародний морський флот споживає приблизно 400 млн тонн палива щорічно. Витрати на паливо сьогодні складають 50–60 % вартості витрат всього ЖЦ судна. При цьому слід мати на увазі, що для суден витрати на обслуговування, паливо та ремонти у десятки разів перевищують вартість проектування і будівництва нового зразка [11].

На теперішній час найбільш споживаються традиційні види палива (таблиця 1).

Загальну витрату палива можна розділити на наступні основні складові [2]:

1. Паспортна (специфікаційна) витрата палива. Це витрата палива, що має бути у судна в припущенні хорошого стану корпусу, гвинтів, справного стану валопроводів, справного стану та правильного налаштування двигунів і котлів. Паспортна витрата палива визначається параметрами ходу судна (швид-

кість, число обертів головного двигуна), його осадки, навантаженням електростанції та режимом роботи котла.

2. Додаткова витрата палива, пов'язана з погіршенням стану корпусу судна (обростання). Обростання призводить до зменшення швидкості ходу (при заданому числі обертів гвинта), і збільшення навантаження на двигун.

3. Додаткова витрата палива, пов'язана з погіршенням стану гвинтів. Підвищена шорсткість поверхні лопатей, відгини і ушкодження лопатей призводять до збільшення навантаження на двигун.

4. Додаткова витрата палива, пов'язана з погіршенням стану валопроводів.

5. Ушкодження підшипників дейдвуда і ущільнень призводить до збільшення навантаження на двигун.

6. Додаткова витрата палива, пов'язана з погіршенням стану головних і допоміжних двигунів.

На думку авторів, додаткова витрата палива також пов'язана з навколишнім середовищем (вітер, хвилювання на морі) та з завантаженістю шляхів проходу (прохід у вузькостях або великий трафік на переході).

Зростання цін на бункерування, спільно з впровадженням нових регуляторних норм за контролем шкідливих викидів, примушують учасників ринку морських перевезень більше уваги приділяти паливній ефективності. Вже зараз нові розробки в суднобудуванні обіцяють скорочення споживання палива на 20 %.

З урахуванням даних реалій, протягом останніх десятиліть у галузі, паралельно з класичним суднобудуванням, активно розвивається проектування та будівництво суден, що використовують як паливо альтернативні джерела енергії: ЗПГ, водорості, харчова олія, аміак, електроенергія, метанол, сонячна енергія, повітря, водень.

Сьогодні паливо для СЕУ розглядається не лише з позицій надійності роботи установок та економії,

Таблиця 1. Котируємі сорти палива

№	Сорт палива	Марка	Характеристики
1	Темні сорти бункерного палива (мазут):	IFO 180 низько сірчистий	мазут низько сірчистий (масова доля сірки не більше 2,0 %) з максимальною в'язкістю 180
		IFO 380 високо сірчистий	мазут високо сірчистий (масова доля сірки не більше 5 %) з максимальною в'язкістю 380
		IFO 380 низько сірчистий	мазут низько сірчистий (масова доля сірки не більше 3,5 %) з максимальною в'язкістю 380
		IFO 180 високосірчистий	мазут високосірчистий (масова доля сірки не більше 3,5 %) з максимальною в'язкістю 180
2	Світлі сорти бункерного палива (дистиляти)	MGO (DMA) (S≤0,1 %)	газойль (дизпаливо з сіркою до 0,1 %) (Marine Gas Oil)
		MGO (DMA) (S≤0,5 %)	газойль (дизпаливо з сіркою до 0,5 %) (Marine Gas Oil)
		MDO (DMB)	дизельне паливо з сіркою до 0,5–2,0 % (Marine Diesel Oil)

Примітка. Палива суднові ИФО-180, ИФО-380 є аналогами судових залишкових палив класу Г, що випускаються за міжнародним стандартом ISO 8217: ИФО-180 – аналог ISO-F-RMF 25; ИФО-380 – аналог ISO-F-RMA 35

Джерело: [2]

а й з урахуванням виконання вимог щодо екології. Це складне завдання значною мірою можна вирішити, використовуючи газове паливо.

Зріджений природний газ, як паливо для суден, гратиме велику роль у майбутньому. Транспортна та морська індустрія рухається до ширшого використання зрідженого газу, в основному, за рахунок нових стандартів з викидів, що набули чинності у 2015 році.

Дослідження показують, що у порівнянні з мазутом, зріджений газ має удвічі більшу енергоємність.

Ціна на газове паливо ще один рушійний чинник – середня вартість зрідженого газу у два рази, нижча за ціну мазуту. Це вже суттєво вплине на вартість ЖЦ судна. Світові запаси газу набагато більші, ніж нафти, витрати на його здобич зменшуватимуться найближчими роками.

Згідно з останнім дослідженням об'єднаного класифікаційного товариства Det Norske Veritas – Germanischer Lloyd (DNV GL), у першому кварталі поточного року суттєво збільшилася кількість замовлень на будівництво суден з пропульсивними установками, що працюють на ЗПГ [10].

ЗПГ є звичайним природним газом, зрідження якого відбувається методом охолодження до -160°C . У такому стані він є рідиною без запаху і кольору, щільність якої вдвічі менша за щільність води. Зріджений не є токсичним, кипить при температурі від -158 до -163°C , складається на 95 % з метану, а в інші 5 % входять етан, пропан, бутан, азот [121].

За даними [12], відповідно до оцінок експертів DNV GL, всього за перші чотири місяці 2022 року було укладено контракти на спорудження 121 великого судна різних типів з двигунами на ЗПГ або пристосованими до роботи як на традиційному, так і на ЗПГ-паливі. При цьому лише у квітні 2022 року на верфях було розміщено 51 замовлення такого типу.

На даний час в експлуатації і на різних стадіях будівництва знаходиться 775 суден, що використовують як паливо виключно ЗПГ і ще 221 судно класифікується як «готові до роботи» на ЗПГ, хоча поки що переважно використовують традиційні види палива [12]. Прогноз попиту на ЗПГ у світі представлено на рис. 1, світовий ЗПГ-флот за основними типами суден за даними DNV GL на рис. 2.

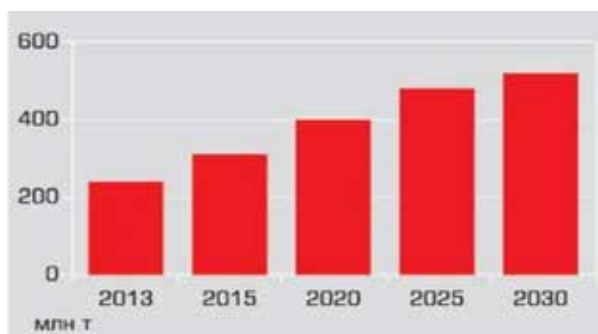


Рис. 1. Прогноз запиту на ЗПГ у світі

Джерело: Ernst & Young

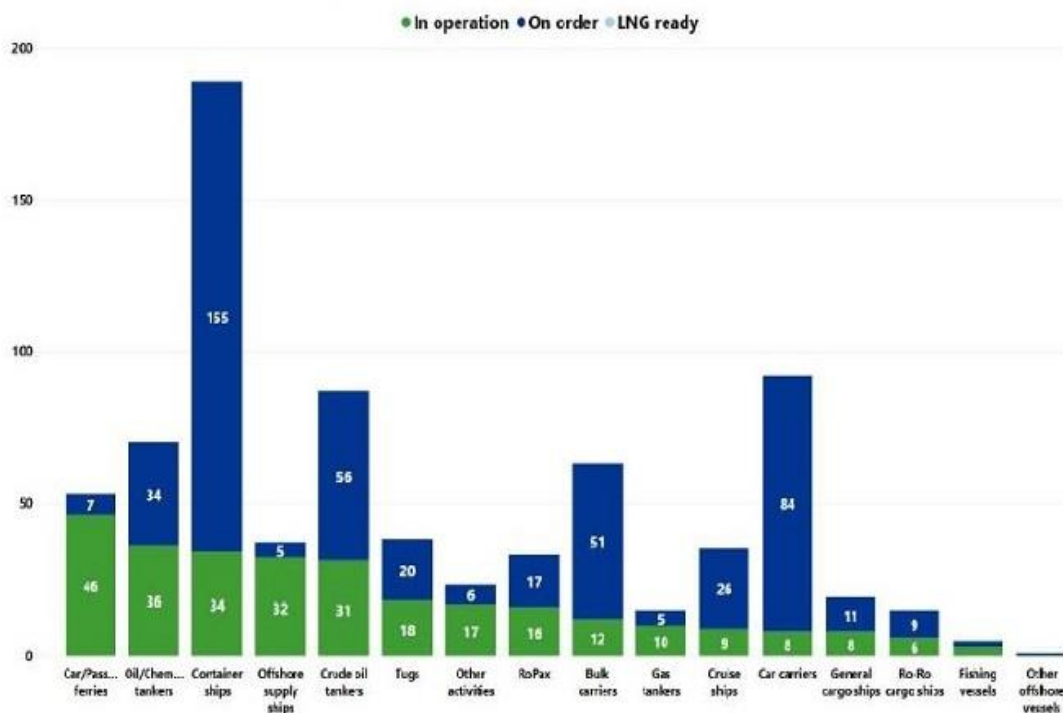


Рис. 2. Світовий ЗПГ-флот за основними типами суден

Джерело: DNV GL

Як бачимо з рис. 2, у чинному флоті найбільш численними за кількістю суден із ЗПГ-двигунами є вантажопасажирські пороми та танкери-продуктовози. Що ж до портфеля новобудови, то тут абсолютне лідерство належить замовленням на ЗПГ-контейнеровози (155 од.), за якими йдуть автомобілевози (81 од.) та наливні танкери (56 од.) [12].

Використання нового виду суднового палива зажадало вирішення цілого ряду технічних питань, в першу чергу – вдосконалення різних типів двигунів, що працюють на ЗПГ (з іскровим запаленням на збідненій паливній повітряній суміші; двопаливний двигун із запальним дизельним паливом та робочим газом низького тиску; двопаливний двигун із запальним паливом та робочим газом високого тиску).

У багатьох випадках існуючі дизельні двигуни можуть бути перетворені на двопаливні дизельно-газові двигуни. Подібне перетворення існуючих двигунів може бути економічно доцільним рішенням переведення морських суден на ЗПГ [13].

У разі збільшення масштабів використання газу на судах найбільш проблемними стають питання організації бункерування. Насамперед це ємності для зберігання газу на судах та бункерувальних терміналах. Сьогодні вже існують і використовуються системи зберігання ЗПГ у танках (балонах) спеціальної конструкції, які продумано вписуються в обводи судна без шкоди для його місткості. Найчастіше застосовуються контейнери-цистерни.

На думку авторів, широкому застосуванню ЗПГ як суднового палива перешкоджатиме нерозвиненість інфраструктури з бункерування суден газовим паливом. І тут, безпосередньо, стоїть питання про створення баз бункерування, наприклад, у кінцевих портах при лінійному судноплаванні та мобільних бункерувальних баз для дозаправки суден різних типів без заходу у порти або, взагалі, на ходу. Тому виникла об'єктивна потреба в судах – бункерувальників ЗПГ та створення надійних ємностей для зберігання та перевезення невеликих партій газу на судах для дозаправки.

На рис. 3 наведено зовнішній вигляд судна, що знаходиться в експлуатації, з розташуванням газових цистерн великої ємності на головній палубі.

У рамках аналізованої теми цікавим є створення міжнародного суспільства для просування газу як суднового палива.

Рада директорів Міжнародного товариства операторів газовозів і терміналів (SIGTTO) прийняла рішення створити суспільство, що просуває газ як суднове паливо (SGMF), у формі неурядової організації. Це важливий крок уперед у справі зміцнення безпеки та отримання досвіду у сфері використання ЗПГ як суднового палива. Членство в SGMF доступне всім зацікавленим сторін, що приймають участь у бункеруваннях ЗПГ, тобто. судновласників, операторів бун-



Рис. 3. Розташування газових цистерн на судні

керних суден, портових адміністрацій та регулюючих органів [13].

Особливістю тривалого зберігання ЗПГ є його випар і, як наслідок, підвищення тиску в ємності. На жаль, сучасні ємності не розраховані витримувати тиск більше 0,25 бар і тому необхідно випар відводити для підтримки прийнятного тиску. При цьому скидання його в атмосферу, наприклад, призведе до утворення хмари потенційно вибухонебезпечної газоповітряної суміші. Випар або спалюють у факельних установках, або використовують як паливо в СЕУ бункерувальника ЗПГ (як і на газовозах ЗПГ).

Виходячи з цього, автори підкреслюють, що обслуговування та експлуатація суден з газовим паливом мають виконуватися лише персоналом професійною підготовкою. Необхідна серйозна теоретична підготовка, що пов'язана з вивченням особливостей властивостей та характеристик газу, обов'язкове відпрацювання практичних навичок на тренажерах та в умовах реальних СЕУ. Тільки за такого алгоритму буде забезпечено безпеку впровадження газового палива в судноплавну індустрію.

Суднове паливо з водоростей. Проект з виробництва біопалива з високим вмістом олії створив американський нафтовий видобувач ExxonMobil спільно з компанією Synthetic Genomics, що займається питаннями виробництва альтернативних видів палива. Ініціатори проекту планують до 2025 року створити потужності, що дозволяють виробляти 10 тисяч барелів водоростевого палива на день. На такому паливі зможуть працювати судна, вантажівки та літаки [14].

Харчова олія. Як повідомляє журнал Seafarers Journal, у найближчому майбутньому морські судна зможуть працювати на біопаливі, яке виготовлене з харчової олії, побутових відходів та лісосічних відходів. Свій секретний рецепт виробництва біопалива розробила голландська компанія GoodFuels Marine [15].

Ця компанія провела пробні рейси із залученням флоту компаній «Norden» та «Samskip». У перший рейс на такому палеві з Роттердама до Таллінна вирушив танкер-продуктовоз Nord Highlander (2007 року

побудови) [11]. «Харчовий» еквівалент дозволяє суттєво знизити вартість палива та шкідливі викиди в атмосферу, а сірчані викиди в рамках цієї програми є нульовими [15].

Аміак. Голландська компанія C-Job Naval Architects як альтернативне суднове паливо для скорочення шкідливих викидів пропонує використовувати аміак. Було запропоновано концепцію аміакозову, який як паливо використовує частину власного вантажу. Дослідження показали, що найефективнішим варіантом генерування енергії за рахунок використання аміаку є застосування твердо оксидних паливних елементів [16].

Метанол. Напередодні набрання чинності стандартами ІМО по сірці 1 січня 2020 року судновласники, суднобудівні заводи, виробники обладнання та адміністрації портів Амстердам і Роттердам експерти галузі активно зайнялися вивченням питання використання метанолу як альтернативного суднового палива [17].

Енергія сонця. Презентовано судно на сонячних батареях, яке може проходити 160 кілометрів на день. Це 16-метрова презентована яхта Silent 55 (рис. 4) зможе залишатися далеко від берега тижнями та її живлення відбувається тільки від сонячних батарей. Судно обладнане 30 високоефективними фотоелектричними панелями [18].

Водень та вітроенергія. Використання дизельного палива у газотурбінних установках викликає економічні та екологічні проблеми. М. Morsy El Gohary та Ibrahim Sadek Seddiek пропонують альтернативні варіанти, робочі характеристики яких можуть забезпечити заміну даного виду палива. «Природний газ і водень можуть бути успішно використані як альтернатива дизельному паливу в газових турбінах. Було виявлено, що термодинамічні характеристики при використанні природного газу газотурбінному циклі близькі до характеристик при використанні дизельного палива. Також встановлено, що теплова ефективність газової турбіни у разі застосування водню на 1 % менша, ніж дизельне паливо» [19].

Водневі двигуни та вітроенергетика поширені набагато менше внаслідок високої вартості та низької продуктивності. Зокрема, єдиним судном, що використовує вітроенергетику, є побудоване в 2010 році на верфі Cassens Werft (Німеччина) судно E-Ship 1 (рис. 5).

На судні на додаток до двох дизель-генераторів сумарною потужністю 7 МВт встановлено 4 турбопаруси, що дозволяють виробляти до 1,5 МВт залежно від погодних умов. Разом з тим, конструкція вітрогенераторів значно підвищує вітровий опір при русі судна, а потужність, що видається, не дозволяє застосовувати даний вид палива в якості основного на судах.

Згідно з даними «Enercon», турбовітрила дозволяють заощадити 1,2 – 1,7 МВт потужності. Так, при потужності на валу 2769 кВт, не задіяючи турбовітрила, судно рухалося зі швидкістю 14,3 вузли, а з задіяними вітрилами при тій же потужності на валу – зі швидкістю 16,7 вузли. Для досягнення такої швидкості без вітрил, теоретично знадобилося б 4747 кВт. Із «зеконотомлених» 1978 кВт необхідно відняти 280 кВт, що витрачаються на обертання турбовітрил, щоб отримати економію в 1698 кВт [20].

Також слід відзначити єдиний у світі катамаран Energy Observer (рис. 6), який використовує унікальну комбінацію відновлюваних джерел енергії – вітер, сонячну енергію та водень.

Дане судно побудовано науково-дослідним інститутом CEA-Liten (Франція) і є плавучою лабораторією. Основним джерелом енергії на судні є сонячні панелі та дві вітряні турбіни, а система водневого джерела – бортовий електролізер, який розщеплює морську воду на кисень та водень. Останній зберігається у газоподібній формі в баках і використовується в безвітряні та похмурі дні [21].

Електроенергія. Міжнародна морська організація щороку встановлює зведення жорсткіших правил, що змушують судновласників вдаватися до пошуку альтернативних джерел енергії. У свою чергу, А. Ait Allala, К. Mansouria, М. Youssfia, М. Qbadoua пропонують таке альтернативне джерело енергії, як електроенергія. «Електропривід отримав безліч переваг порівня-



Рис. 4. Яхта Silent 55



Рис. 5. Судно E-Ship

Таблиця 2. Судна з електродвигунами

Судно	Місце побудови	Рік побудови	Район експлуатації	Потужність	Головні розмірвання і основні характеристики
BB Green	Latitude yachts (Латвія)	2016	Стокгольм, Швеція	2×280 кВт	Довжина – 20 м Ширина – 6 м, Висота борта – 3 м
Ampere	Fjellstrand (Норвегія)	2014	Лінія Лавік – Оппедал, Норвегія	1000 кВт	Довжина – 80 м Ширина – 21 м Місткість – 360 чол. і 120 автомобілей.
Tycho Brahe	STX Norway Offshore Langsten (Норвегія), модернізація – Öresund (Швеція) разом з ABB	1991 (модернізація – 2018)	Лінія Хельсінгєр (Данія) – Хельсінгборг (Швеція)	4,16 МВт	Довжина – 111 м Ширина – 28 м Місткість – 240 автомобілей і 1000 пасажирів
Aurora	STX Norway Offshore Langsten (Норвегія), модернізація – Öresund (Швеція) разом з ABB	1991 (модернізація – 2018)	Лінія Хельсінгєр (Данія) – Хельсінгборг (Швеція)	4,16 МВт	Довжина – 111 м Ширина – 28 м Місткість – 240 автомобілей і 1000 пасажирів
Elektra	Crist (Польща)	2017	Архипелаг Турку (Фінляндія)	2х530 кВт	Довжина – 97,87 м Ширина – 15,47 м Місткість – 90 автомобілей
Ellen	Navyard Group (Норвегія)	2019	Лінія Сьбю – Фюнсхав (Данія)	4,3 МВт/ч	Довжина – 60 м Ширина – 13 м

палив є економічно ефективним способом утилізації нецільових фракцій нафтопереробки.

Також підкреслимо, що посилені вимоги до екологічної безпеки роботи судових двигунів вимагають застосування присадок, які знижують димність газів, що відходять і збільшують повноту згоряння палива. На думку авторів, використання присадок (депресорної, протидимної) до судових палив для поліпшення їх експлуатаційних властивостей є дуже перспективним напрямом.

ВИСНОВКИ

1. Вартість палива є найдорожчою складовою ЖЦ будь-якого судна.

2. Розвиток світового суднобудування сьогодні визначається не тільки економічною ефективністю будівництва та подальшої експлуатації судна, а й екологічними вимогами, що систематично посилюються.

3. Сьогодні паливо для СЕУ розглядається не лише з позицій надійності роботи установок та еко-

номіки, а й з урахуванням виконання вимог щодо екології. Це складне завдання значною мірою можна вирішити, використовуючи газове паливо.

4. Шлях зниження вартості ЖЦ судна, боротьби зі шкідливими викидами в атмосферу та значного зниження експлуатаційних витрат це застосування альтернативних видів судового палива, насамперед ЗПГ та електроенергії.

5. Найбільш перспективним, нарівні із ЗПГ, є створення суден з електродвигунами.

6. На думку авторів, метанол, ймовірно, є найбільш перспективним альтернативним паливом для глобальних морських перевезень замість інших видів біопалива з нульовим вмістом вуглецю, таких як відновлювальний природний газ, біостанол, біогенний диметиловий ефір та біодизель.

7. Перспективним напрямом для поліпшення експлуатаційних властивостей суден, на думку авторів, також є і використання присадок до палива.

REFERENCES

- [1] MARPOL 73/78. Dodatok VI (perehlianytyi) do Konventsii «Pravyla zapobihannya zabrudnenniu povitrianooho seredovyshcha z suden». [MARPOL 73/78. Annex VI (revised) to the Convention «Rules for the Prevention of Air Pollution from Ships»]. Retrieved from: http://rise.odessa.ua/texts/MARPOL_VI_19.php3 (access 07.01.2023). [In Ukrainian].
- [2] Pizintsali L.V. (2021). *Metodolohichni osnovy orhanizatsiino-tekhnologichnykh protsesiv utylizatsii suden: monohrafiia. [Methodological foundations of organizational and technological processes of ship disposal: monograph.]*. Kherson: OLDI-PLIUS, 2021. – 308 s. ISBN 978-966-289-488-2. [In Ukrainian].
- [3] Shakhov A.V., & Pyzyntsal L.V. (2014). Model upravleniya stoyimosti zhyznennoho tsykla sudna. [Ship life cycle cost management model]. *Problemy tekhniki: Naukovo-vyrobnychiy zhurnal. – Technical problems: Scientific and industrial journal. Odesa: ONMU, Khmelnytsk: KhNU. 2014. Vyp. 3. S. 9 – 16.* [In Russian].

- [4] O.M. Shumylo, & O.I. Rossomakha, A.V. Shakhov. Udoskonalennia modeli vyznachennia vartosti zhyttievoho tsykladu sudna. [Improvement of the model for determining the cost of the ship's life cycle]. // *Rozvytok transportu. – Transport development* No 1(8), 2021. S. 113 – 124. [In Ukrainian].
- [5] Tsokolov M.V. (2021) Alternatyvni vydy palyva. [Alternative types of fuel]. / 2021: *Materialy XXII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Ekolohiia. Liudyna. Suspilstvo» – Proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference «Ecology. Man. Society»* (pp. 268 – 271) m. Kyiv (20-21 travnia 2021 r.). [In Ukrainian].
- [6] Mitkov B.V., & Mitkov V.B., Shulha O.V. (2020) Alternatyvni vydy palyva dlia transportnykh zasobiv. [Alternative fuels for vehicles]. *Naukovyi visnyk TDATU – Scientific bulletin TDATU*. Vypusk 1, Tom 3. S. 144 – 152. [In Ukrainian].
- [7] Pizincali L.V., & Aleksandrovskaia N.I., Rabochaya T.V. (2020) Analiz vlianiia sovremennykh ekologicheskikh trebovaniy na rynek topliva mirovogo sudohodstva. [Analysis of the impact of modern environmental requirements on the global shipping fuel market]. *Visn. Odeskogo nacionalnogo morskogo universitetu. Odesa: ONMU. – Bull. Odessa National Maritime University. Odesa: ONMU*. Vip. 2(62). S. 140 – 158. [In Russian].
- [8] Ivashkiv I. M., & Trukhan L. M. (2019). Perspektyvy rozvytku alternatyvnykh dzherel palyva v Ukraini. [Prospects for the development of alternative sources of fuel in Ukraine]. *Ekonomichniy analiz. – Economic analysis. Ternopil*. Tom 29. № 1. S. 178 – 182. [In Ukrainian].
- [9] Xing, H., Stuart, C., Spence, S., & Chen, H. (2021). Alternative fuel options for low carbon maritime transportation: Pathways to 2050. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126651. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126651>.
- [10] Veldhuis, I. J. S., Richardson, R. N., & Stone, H. B. J. (2007). Hydrogen fuel in a marine environment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(13), 2553–2566. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2006.11.013>.
- [11] Mirovye sudostroenie: kakie SPG-suda segodnya v mode. [World shipbuilding: what LNG ships are in fashion today]. Retrieved from: https://www.korabel.ru/news/comments/mirovye_sudostroenie_kakie_spg-suda_segodnya_v_mode.html (access 30.06.2022). [In Russian].
- [12] Szhizhennyj prirodnyj gaz (SPG). [Liquefied natural gas (LNG)]. Retrieved from: innodigest.com/Szhizhennyj_prirodnyj_gaz-spg-kak-alte/?lang=ru (access 30.06.2022). [In Russian].
- [13] I.I. Kostylev (2018). Szhizhennyj prirodnyj gaz kak sudovoe toplivo: problemy i perspektivy ih reshenie. [Liquefied natural gas as a marine fuel: problems and prospects for their solution]. *Ekologiya – Ecology* № 2 (75) 2018, S. 74 – 78. [In Russian].
- [14] Sudovoe toplivo zamenyat na toplivo iz vodoroslej? [Will marine fuel be replaced with algae fuel?] Retrieved from: <https://www.seafarersjournal.com/marine-news/sudovoe-toplivo-zamenyat-na-toplivo-iz-vodoroslej/> (access 21.03.22). [In Russian].
- [15] Suda perevedut na pishevoe maslo. [Vessels will be converted to edible oil]. Retrieved from: <https://www.seafarersjournal.com/technologies/suda-perevedut-na-pishhevoe-maslo/> (access 30.06.2022). [In Russian].
- [16] Alternativnoy sudovomu toplivu mozhet stat ammiak. [An alternative to marine fuel can be ammonia]. Retrieved from: <https://www.seafarersjournal.com/marine-news/alternativnoy-sudovomu-toplivu-mozhet-stat-ammiak/> (access 30.06.2022). [In Russian].
- [17] Metanol budet ispolzovatsya v kachestve alternativnogo sudovogo topliva? [Will methanol be used as an alternative marine fuel?]. Retrieved from: <https://www.seafarersjournal.com/marine-news/metanol-budet-ispolzovat-v-kachestve-alternativnogo-sudovogo-topliva/> (access 21.03.22). [In Russian].
- [18] Novye suda mogut nahoditsya v more nedelyami, «pitayasya» solncem. [New ships can stay at sea for weeks, “feeding” on the sun]. Retrieved from: <https://www.seafarersjournal.com/technologies/37017/> (access 05.06.2022). [In Russian].
- [19] Gohary, M. M. el, & Seddiek, I. S. (2013). Utilization of alternative marine fuels for gas turbine power plant onboard ships. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 5(1), 21–32. URL: <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0115>.
- [20] E-Ship 1 – Wikipedia. Retrieved from: https://uk.wikipedia.org/wiki/E-Ship_1 (access 12.01.2022). [In Ukrainian].
- [21] Suda na batarejkah – budushee sudohodstva? [Battery powered boats – the future of shipping?]. Retrieved from: <https://portnews.ru/comments/2852/> (access 05.06.2022). [In Russian].
- [22] Ait Allal, A., Mansouri, K., Youssfi, M., & Qbadou, M. (2019). Toward an evaluation of marine fuels for a clean and efficient autonomous ship propulsion energy. *Materials Today: Proceedings*, 13, 486–495. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.04.005>.
- [23] Elektrosuda: budushee sudohodstva ili uzka nisha? [Electric vessels: the future of shipping or a narrow niche?]. Retrieved from: <https://portnews.ru/comments/2890/> (access 05.06.2022). [In Russian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] МАРПОЛ 73/78. Додаток VI (переглянутий) до Конвенції «Правила запобігання забрудненню повітряного середовища з суден». Режим доступу: http://rise.odessa.ua/texts/MARPOL_VI_19.php3 (дата звернення 07.01.2023).
- [2] Пізінцалі Л.В. (2021) Методологічні основи організаційно-технологічних процесів утилізації суден: монографія. – Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2021. – 308 с. ISBN 978-966-289-488-2.
- [3] Шахов А.В., Пізінцалі Л.В. (2014) Модель управління стоимостью жизненного цикла судна. Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. Одеса: ОНМУ, Хмельницьк: ХНУ. 2014. Вип. 3. С. 9 – 16.
- [4] О.М. Шумило, О.І. Россомакха, А.В. Шахов. (2021) Удосконалення моделі визначення вартості життєвого циклу судна // *Розвиток транспорту*. N 1(8), 2021. С. 113 – 124.

- [5] Цоколов М.В. (2021) Альтернативні види палива / 2021: Матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» (20-21 травня 2021 р., м. Київ). С. 268 – 271.
- [6] Мітков Б.В., Мітков В.Б., Шульга О.В. (2020) Альтернативні види палива для транспортних засобів. Науковий вісник ТДАТУ. Випуск 1, Том 3. С. 144 – 152.
- [7] Пизинцали Л.В., Александровская Н.И., Рабочая Т.В. (2020) Анализ влияния современных экологических требований на рынок топлива мирового судоходства. Вісн. Одеського національного морського університету. Одеса: ОНМУ. 2020. Вип. 2(62). С. 140 – 158.
- [8] Івашків І. М., Трухан Л. М. (2019) Перспективи розвитку альтернативних джерел палива в Україні. Економічний аналіз. Тернопіль. 2019. Том 29. № 1. С. 178 – 182.
- [9] Xing, H., Stuart, C., Spence, S., & Chen, H. (2021). Alternative fuel options for low carbon maritime transportation: Pathways to 2050. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126651. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126651>.
- [10] Veldhuis, I. J. S., Richardson, R. N., & Stone, H. B. J. (2007). Hydrogen fuel in a marine environment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(13), 2553–2566. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2006.11.013>.
- [11] Мировое судостроение: какие СПГ-суда сегодня в моде. Режим доступу: https://www.korabel.ru/news/comments/mirovoe_sudostroenie_kakie_spg-suda_segodnya_v_mode.html (дата звернення 30.06.2022).
- [12] Сжиженный природный газ (СПГ). Режим доступу: innodigest.com/Сжиженный_природный-газ-спг-как-альте/?lang=ru (дата звернення 30.06.2022).
- [13] И.И. Костылев. Сжиженный природный газ как судовое топливо: проблемы и перспективы их решение /Экология № 2 (75) 2018, С. 74 – 78.
- [14] Судовое топливо заменят на топливо из водорослей? Режим доступу: <https://www.seafarersjournal.com/marine-news/sudovoe-toplivo-zamenyat-na-toplivo-iz-vodoroslej/> (дата звернення 21.03.22).
- [15] Суда переведут на пищевое масло. Режим доступу: <https://www.seafarersjournal.com/technologies/suda-perevedut-na-pishhevoe-maslo/> (дата звернення 30.06.2022).
- [16] Альтернативой судовому топливу может стать аммиак. Режим доступу: <https://www.seafarersjournal.com/marine-news/alternativnoj-sudovomu-toplivu-mozhet-stat-ammiak/> (дата звернення 30.06.2022).
- [17] Метанол будет использоваться в качестве альтернативного судового топлива? Режим доступу: <https://www.seafarersjournal.com/marine-news/metanol-budut-ispolzovat-v-kachestve-alternativnogo-sudovogo-topliva/> (дата звернення 21.03.22).
- [18] Новые суда могут находиться в море неделями, «питаются» солнцем. Режим доступу: <https://www.seafarersjournal.com/technologies/37017/> (дата звернення 05.06.2022).
- [19] Gohary, M. M. el, & Seddiek, I. S. (2013). Utilization of alternative marine fuels for gas turbine power plant onboard ships. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 5(1), 21–32. Retrieved from: <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0115>.
- [20] E-Ship 1 – Вікіпедія. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/E-Ship_1 (дата звернення 12.01.2022).
- [21] Суда на батарейках – будущее судоходства? Режим доступу: <https://portnews.ru/comments/2852/> (дата звернення 05.06.2022).
- [22] Ait Allal, A., Mansouri, K., Youssfi, M., & Qbadou, M. (2019). Toward an evaluation of marine fuels for a clean and efficient autonomous ship propulsion energy. *Materials Today: Proceedings*, 13, 486–495. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.04.005>.
- [23] Электросуда: будущее судоходства или узкая ниша? Режим доступу: <https://portnews.ru/comments/2890/> (дата звернення 05.06.2022).

© Л. В. Пізінцалі, О. І. Россомаха, О. М. Шумило, Н. І. Александровська, О. А. Россомаха, О. В. Малишкін
Дата надходження статті до редакції: 15.03.2023
Дата затвердження статті до друку: 24.03.2023