

УДК 629.5.038.068:662.613.12

doi: 10.32620/aktt.2026.4sup1.14

В. В. КОРОБКО, А. П. ШЕВЦОВ

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Україна

## РЕГАЗИФІКАЦІЯ КРІОГЕННИХ ПАЛИВ У СУДНОВИХ ГІБРИДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ ІЗ ПРОТОНООБМІННИМИ ПАЛИВНИМИ КОМІРКАМИ

У зв'язку з посиленням екологічних вимог до судноплавства зростає інтерес до суднових гібридних енергетичних установок (СГЕУ), які поєднують теплові двигуни, електрохімічні генератори, акумуляторні батареї та системи перетворення, накопичення й розподілу електричної енергії. Використання низьковуглецевих і безвуглецевих палив зменшує емісію оксидів вуглецю, однак не повністю усуває утворення інших продуктів згоряння. Тому перспективним напрямом є поєднання різних принципів перетворення енергії палива, зокрема електрохімічного та теплового, з утилізацією скидної теплоти. **Предметом дослідження** є процеси використання скидної теплоти низькотемпературних протонобмінних паливних комірок (РЕМ FC) у системах регазифікації кріогенних палив у складі СГЕУ. Для РЕМ FC температура скидних теплоносіїв становить 330 – 360 K, тоді як температура теплоприймача визначається типом кріогенного палива й змінюється від 20 K для рідкого водню ( $LH_2$ ) до 240 K для скрапленого аміаку ( $LNH_3$ ). **Метою роботи** є визначення раціональних схемних рішень для використання скидної теплоти РЕМ FC з урахуванням температурного потенціалу кріогенних палив під час їх регазифікації. Завдання дослідження охоплюють аналіз температурних рівнів джерела теплоти та кріогенного теплоприймача, порівняння умов регазифікації різних палив, оцінювання доцільності застосування низькотемпературних термоакустичних двигунів у складі системи рекуперації відхідної теплоти (WHRS) та визначення можливого приросту ефективності СГЕУ. **Методи дослідження** базуються на термодинамічному аналізі процесів теплообміну, розрахунковому оцінюванні теплових потоків під час регазифікації кріогенних палив і порівняльному аналізі схем утилізації скидної теплоти. **Результати дослідження** показали, що значний температурний напір між скидною теплою РЕМ FC і кріогенним паливом створює передумови для інтеграції процесів регазифікації та утилізації теплоти. Встановлено, що застосування низькотемпературних термоакустичних двигунів може забезпечити підвищення економічної ефективності СГЕУ на 8–15 % залежно від температурного напору між джерелом скидної теплоти та кріогенним середовищем. **Наукова новизна** дослідження полягає в обґрунтуванні використання температурного потенціалу кріогенних палив як низькотемпературного теплоприймача для утилізації скидної теплоти РЕМ FC. Практичне значення полягає у визначенні перспективних схемних рішень інтеграції регазифікації кріогенних палив, РЕМ FC і WHRS у складі СГЕУ. Показано, що найбільш ефективним є застосування таких систем у СГЕУ зі скрапленням аміаком.

**Ключові слова:** утилізація скидної теплоти, кріогенне паливо, скраплений газ, водень, аміак, термоакустичні двигуни, ефективність.

### Вступ

Мореплавство як глобальна транспортна галузь має забезпечувати потреби суспільства в логістиці та водночас відповідати вимогам ІМО щодо обмеження емісії парникових газів – Greenhouse Gases (GHG) [1]. Ці екологічні вимоги зумовлюють суттєві концептуальні зміни в конструкції суден і розвитку суднової енергетики [2].

Одним із дієвих шляхів зменшення емісії GHG, особливо оксидів вуглецю, є використання судновими енергетичними установками (СЕУ) альтернативних палив: метанолу, скраплених газів, зокрема LNG, а також безвуглецевих палив —  $LH_2$  і  $LNH_3$  [3]. Більш радикальним рішенням означеної проблеми є впровадження суднових гібридних енергетичних установок (СГЕУ) [4, 5].

Підґрунтям сучасних СГЕУ можна вважати концепцію Wärtsilä Energy Core, основні положення якої ілюструє рис. 1. Вочевидь, ця концепція формалізувала принципово нові підходи до структури СЕУ, які реалізують перехід від «менеджменту теплових потоків» до «менеджменту джерел енергії».

У наведеній концептуальній схемі присутні всі складові сучасної СГЕУ, зокрема інтегральна система керування джерелами і потоками енергії. Саме наявність на судні різних джерел механічної та електричної енергії дозволяє максимально реалізувати потенціал гібридних енергетичних систем.

На поточний момент на судах переважно використовуються протонобмінні паливні комірки – Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEM FC) [6]. Досягнутий технічний рівень таких систем дає змогу



створювати енергетичні установки мегаватної потужності, що повністю задовольняє потреби суднової енергетики. Створення ефективних СГЕУ є складною задачею, оскільки потребує організацію взаємодії різних за принципом дії компонентів.

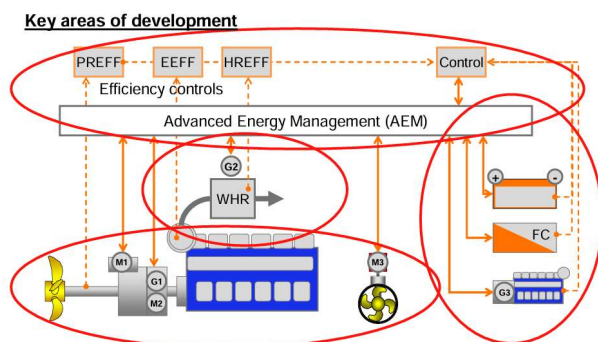


Рис. 1. Концепція Wärtsilä Energy Core

Вочевидь, у складі СЕУ мають бути реалізовані значні зміни; це відноситься як до головної, і допоміжної енергетичних установок, а також пропульсивного комплексу судна. Вирішення всього комплексу задач потребує застосування системного підходу до проектування судна та його енергетичної установки.

**Актуальність досліджень.** Сучасні СГЕУ є принципово новим рішенням, яке потребує спеціальних підходів до їх проектування та експлуатації. Ці енергетичні установки не можна розглядати як просте поєднання відомих рішень, це принципово інша технічна система, яка поєднує різні за принципом дії перетворення та споживання палив.

## 1. Постановка задачі дослідження

У СЕУ скидні теплові потоки енергетичного обладнання об'єднані загальною тепловою схемою. Частина цих енергетичних потоків може бути використана за допомогою суднової системи рекуперації відхідної теплоти (WHRs) за умов наявності відповідних технологій. Досвід експлуатації СЕУ з електрохімічними генераторами (ЕХГ) виявив потребу в нових рішеннях щодо складу допоміжної ЕУ судна, зокрема систем очистки повітря, паливopідготовки та енергозбереження. Досягнення максимального ефекту від використання PEM FC генераторів можливе за умов їх включення в теплову схему СЕУ та WHRS у найбільш раціональний спосіб.

Паливом для PEM FC є чистий водень з означеними теплофізичними властивостями. Тож у складі СЕУ мають бути відповідні системи паливopідготовки, здатні перетворювати скраплені кріогенні палива – LNG, LH<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> – на водень.

Умови й показники ефективного використання скидної теплоти СГЕУ з ЕХГ на основі PEM FC для

потреб систем регазифікації скраплених кріогенних палив є предметом цих досліджень.

Складність питань полягає в суттєвій різниці в хімічному складі та теплофізичних властивостях різних кріогенних палив. З огляду на ці обставини, в даному випадку доцільно розглядати систему паливopідготовки, як сукупність взаємопов'язаних підсистем регазифікації кріогенного палива та продукування водню.

**Метою досліджень** є пошук раціональних рішень щодо утилізації теплових викидів PEM FC СГЕУ за умов з використання підсистемою регазифікації кріогенного потенціалу скраплених палив – LNG, LH<sub>2</sub> або LNН<sub>3</sub>.

## 2. Утилізація теплових викидів СГЕУ

На поточний момент в суднової енергетиці використовуються різні рішення щодо утилізації теплових викидів енергетичних установок. Найбільш поширені суто теплофікаційні WHRS, які забезпечують роботу суднових опріснювачів і задовольняють загальносуднові потреби в обігріві.

Більш складні WHRS спроможні генерувати додаткову механічну роботу. Такі системи використовуються на судах у разі наявності достатньої кількості теплових викидів відповідного температурного потенціалу [7, 8]. Крім того, потрібні теплові двигуни, що здатні ефективно працювати в діапазоні низьких та кріогенних температур. Типові температури скидних теплових ресурсів різних типів СЕУ наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри скидних теплоносіїв СЕУ

| Температури теплових викидів СЕУ |                |           |           |
|----------------------------------|----------------|-----------|-----------|
| Теплоносіїв                      | МОД            | СОД       | РЕМ FC    |
|                                  | Температура, К |           |           |
| Відхідні гази                    | 490 – 530      | 500 – 690 | –         |
| Наддувне повітря                 | 400 – 490      | 380 – 470 | –         |
| Рідина системи охолодження       | 355 – 360      | 360 – 370 | 333 – 363 |
| Паливо LH <sub>2</sub>           | 20             |           |           |
| Паливо LNG                       | 111            |           |           |
| Паливо NH <sub>3</sub>           | 240            |           |           |

Аналіз складу сучасних СЕУ показує, що на нових судах практично відсутні системи WHRS, які здатні продукувати механічну роботу. Такий результат цілком передбачуваний з огляду на температурний потенціал наявних теплових викидів. Потенційні

можливості використання відомих технологій утилізації теплових викидів СЕУ ілюструє рис. 2.

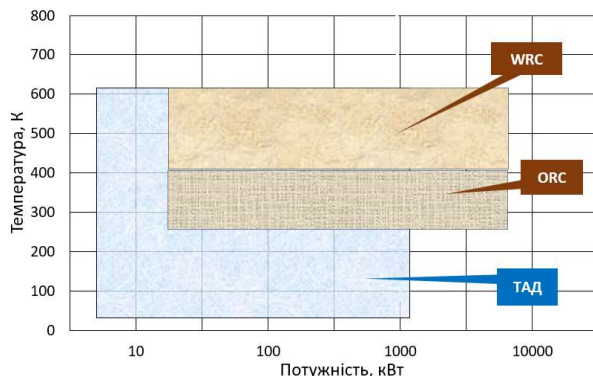


Рис. 2. Потенційні можливості використання відомих технологій утилізації теплових викидів СЕУ:

WRC – паросиловий цикл Ренкіна на воді;

ORC – органічний цикл Ренкіна;

ТАД – цикл термоакустичного двигуна

Можна бачити, що термоакустичні двигуни (ТАД) потенційно можуть бути альтернативою відомим технічним рішенням, оскільки вони не мають температурних обмежень.

### 3. Використання ТАД у підсистемі регазифікації кріогенного палива

Можливість створення ТАД, здатних працювати з кріогенними джерелами енергії, було показано в роботах, пов'язаних із використанням рідкого азоту [LN<sub>2</sub>] і LNG [9,10].

У запропонованій системі регазифікації скраплених палив (рис. 3) [10], замість нагрівачів використовуються низькотемпературні ТАД.

Унаслідок внутрішньої незворотності термоакустичного процесу теплота, що передається через ТАД, сприятиме підвищенню температури скрапленого газу, який прокачується через відповідний теплообмінний контур.

До складу системи входять: ємність 1 зі зрідженим природним газом (ЗПГ)–; насоси 2, 3; компресор 4; цистерна 5 з прісною водою–; зовнішній теплообмінник 6; теплообмінники ТАД, зокрема нагрівач 7 та охолоджувач 8; пориста матриця ТАД 9. Скорочення ГПГ зазначає газоподібний стан природного газу. Слід підкреслити, що таке схемне рішення може бути використане для регазифікації різних скраплених газових палив, які мають відмінні температури зберігання та випаровування.

Це пояснюється тим, що в ТАД як робоче тіло використовується гелій, що дає змогу уникнути безпосереднього впливу кріогенних температур на основний робочий процес у термоакустичному контурі та

зменшує ризики, пов'язані з роботою внутрішніх теплообмінників, зокрема процесів конденсації на поверхні охолоджувача.

Для перетворення акустичної енергії на електричну передбачено використання турбогенератора, привод якого здійснюється від імпульсної двонаправленої турбіни.

Необхідний для роботи ТАД температурний градієнт формується за рахунок різниці температур між теплоносієм системи охолодження головного двигуна, температура якого становить приблизно 355–360 К, і кріогенним паливом, що надходить до теплообмінника–охолоджувача.

У цій схемі теплообмінник 7 виконує функцію нагрівача ТАД, а теплообмінник 8 – функцію низькотемпературного охолоджувача, пов'язаного з контуром регазифікації палива.

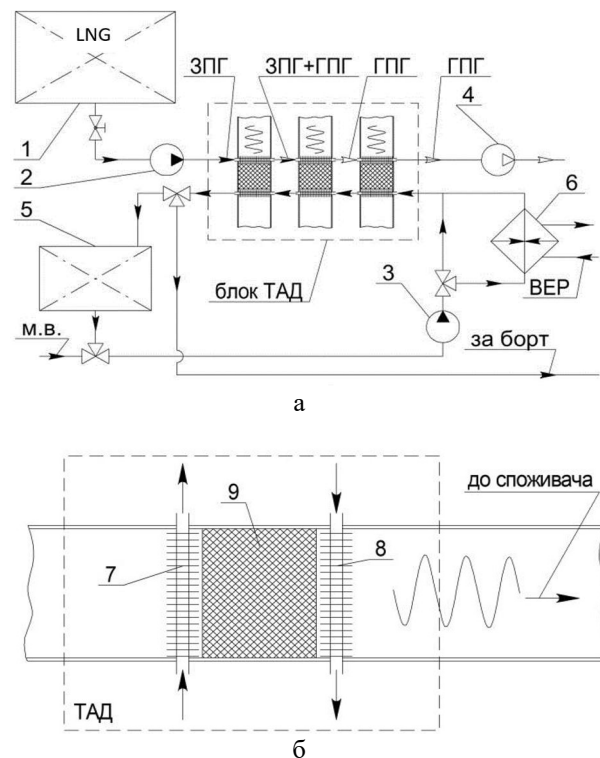


Рис. 3. Схема термоакустичної системи регазифікації скраплених палив:  
а – загальний вигляд, б – ТАД

### 4. Моделювання системи регазифікації кріогенного палива

Дослідження спрямоване на визначення умов і доцільності застосування низькотемпературних теплових двигунів у складі WHRS, інтегрованих із підсистемами регазифікації скраплених суднових палив, зокрема LH<sub>2</sub>, LNG та LNH<sub>3</sub>. Слід зазначити, що паливом для низькотемпературних PEM FC є високочистий водень [11, 12].

То ж, у разі застосування на судні LNG або  $\text{LNH}_3$  водень має бути отриманий після стадії регазифікації шляхом переробки відповідного палива. Для LNG таким процесом є переважно паровий риформінг метану, тоді як для  $\text{LNH}_3$  найбільш доцільним вважається процес каталітичного крекінгу з подальшим очищенням водню від залишків аміаку. У випадку використання  $\text{LH}_2$ , як суднового палива, такі процеси не потрібні, оскільки після регазифікації водень може бути безпосередньо підготовлений до подачі в низькотемпературні PEM FC.

Тому в роботі основну увагу зосереджено саме на процесах випаровування та подальшого підігріву палива до заданої температури перед його подачею до енергетичної установки.

Відповідно, в тепловому балансі WHRS не враховано теплові та енергетичні витрати, пов'язані з риформінгом LNG, крекінгом  $\text{NH}_3$ , очищенням  $\text{H}_2$ , компримуванням газу, а також енергоспоживанням допоміжних систем.

Моделювання системи регазифікації проводилось за таких умов: електрична потужність ЕХГ – 1000 кВт, К.К.Д – 55%, робоча температура – 358 К, паливо ЕХГ – чистий водень.

Витрата палива для споживання ЕХГ суттєво залежить від його складу та в кг/год за розрахунками дорівнює: для  $\text{LH}_2$  – 54,5; для LNG – 130,9; для  $\text{LNH}_3$  – 351,9 (рис. 4).

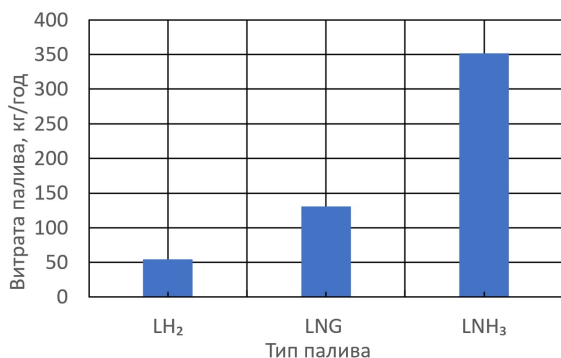


Рис. 4. Витрати скраплених палив в PEM FC

У табл. 2 надано результати розрахунків енергетичного балансу ЕХГ при заданих параметрах.

Підсистему регазифікації в цьому дослідженні розглянуто як сукупність двох послідовно встановлених теплообмінників: випарника та рекуператора.

Прийнято, що у випарнику скраплене паливо повністю переходить у газоподібний стан, а температура газу на виході з випарника на 5 К перевищує температуру зберігання відповідного скрапленого палива. У рекуператорі газ додатково нагрівається до кінцевої температури 298 К.

Таким чином, загальна потреба в теплоті для регазифікації визначається як сума:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{ev}} + Q_{\text{rec}},$$

де  $Q_{\text{ev}}$  – теплота, необхідна для випаровування скрапленого палива;  $Q_{\text{rec}}$  – теплота, витрачена на подальше нагрівання газу в рекуператорі.

Для PEM FC з електричною потужністю 1000 кВт при заданих умовах, необхідна хімічна потужність палива становить 1818,2 кВт.

Таблиця 2  
Енергетичний баланс ЕХГ

| Джерело теплоти                               | Тепловий потік, кВт |
|-----------------------------------------------|---------------------|
| Теплота, отримана від $\text{H}_2$            | 1818,2              |
| Скидна теплота від низькотемпературних PEM FC | 818,2               |
| Скидна теплота з катодного контуру            | 72,6                |
| Скидна теплота анодного контуру               | 2,6                 |
| Скидна теплота контуру охолодження            | 743,0               |

Тобто сумарна теплова потужність, що відводиться від PEM FC системою охолодження та викидами трактів реагентів, становить 818,2 кВт.

## 5. Результати та обговорення

Структура потреб у теплоті підсистемою регазифікації для різних скраплених палив показана на рис. 5. Аналізуючи наведені результати дослідження, можна бачити, що кількість скидної теплоти від низькотемпературних PEM FC є достатньою для регазифікації всіх трьох розглянутих скраплених газових палив.

При цьому сумарні потреби в теплоті для різних палив суттєво відрізняються:  $\text{LH}_2$  – 58.4 кВт; LNG – 32.9 кВт;  $\text{LNH}_3$  – 145.9 кВт.

Для  $\text{LH}_2$  основна частина споживання теплоти викидів припадає на рекуператор – 50.8 кВт, тобто близько 86.9 % сумарного теплового навантаження, що є результатом високої питомої теплоємності газоподібного водню.

Для LNG, за теплофізичними властивостями прийнятого як метан, теплова потреба процесу регазифікації становить 32.9 кВт. Навантаження випарника та рекуператора мають один порядок: 18.9 і 14.0 кВт, відповідно. Це робить LNG зручним паливом для інтеграції з WHRS теплоенергетичних генераторів або ТАД систем регазифікації.

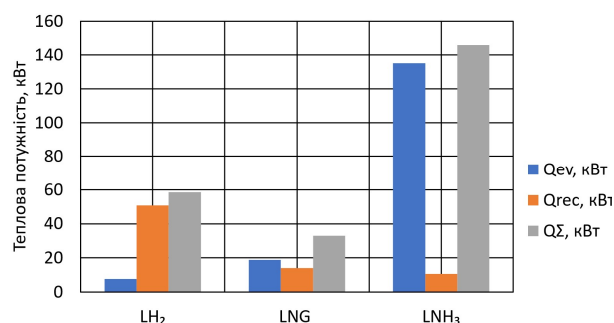


Рис. 5. Споживання теплоти компонентами системи регазифікації

Для LNH<sub>3</sub> процес регазифікації має найбільше енергоспоживання – 145.9 кВт. При цьому основне теплове навантаження припадає на випарник – 135.2 кВт; це близько 92.7 % і спричинено більшим значенням питомої теплоти випаровування аміаку порівняно з LH<sub>2</sub> і LNG.

Таким чином, інтеграція системи регазифікації LNH<sub>3</sub> із системою утилізації скидної теплоти PEM FC на основі WHRS може забезпечити підвищення загальної економічної ефективності гібридної суднової енергетичної установки на 8–15 %. Досягнутий ефект визначається робочою температурою PEM FC та температурним напором між джерелом скидної теплоти і криогенним паливом.

## Висновки

За кількісним тепловим балансом скидної теплоти PEM FC достатньо для регазифікації всіх розглянутих палив, але реальна можливість залежить від температурного рівня теплоносія, мінімальної різниці температур у теплообмінниках і втрат системи. Для LH<sub>2</sub> домінує теплота нагрівання газу в рекуператорі; для LNH<sub>3</sub> – теплота випаровування; для LNG навантаження випарника та рекуператора співставні.

Отримані результати розрахунків показують, що для кожного виду скрапленого газового палива системи регазифікації будуть мати суттєві відмінності.

Доцільність використання теплових двигунів у складі суднової WHRS потребує обґрунтування в кожному окремому випадку з урахуванням усіх особливостей судна та СГЕУ.

**Внесок авторів:** огляд і аналіз інформаційних джерел – **В. В. Коробко**; формулювання мети та постановка задач дослідження – **В. В. Коробко, А. П. Шевцов**; проведення математичного моделювання – **В. В. Коробко**, аналіз результатів дослідження – **В. В. Коробко, А. П. Шевцов**; формулювання висновків – **В. В. Коробко, А. П. Шевцов**; написання статті – **В. В. Коробко, А. П. Шевцов**.

## Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що в них немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

## Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

## Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

## Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

## Література

1. International Maritime Organization. 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. – Mode of access: <https://www.imo.org/en/our-work/environment/pages/2023-imo-strategy-on-reduction-of-ghg-emissions-from-ships.aspx>
2. DNV. Maritime Forecast to 2050: Energy Transition Outlook 2024. – Høvik, Norway : DNV, 2024. – 128 p. – Mode of access: <https://www.dnv.com/maritime/maritime-forecast>
3. Lim, Y. Alternative Fuels and 2023 IMO GHG Strategy / Y. Lim. – 2025. – 11 p. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-85082-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-85082-0_1).
4. Optimising the Design of a Hybrid Fuel Cell/Battery and Waste Heat Recovery System for Retrofitting Ship Power Generation / O. Yuksel, E. Blanco-Davis, A. Spiteri et al. // Energies. – 2025. – Vol. 18, iss. 2. – 40 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18020288>.
5. Nazemian, A. Hybrid and Alternative Fuel Power Management Systems in Ships – Multi-Criteria Decision-Making Assessment / A. Nazemian, E. Boulougouris, S. K. Meleladom // Proceedings of the 15th International Marine Design Conference, Amsterdam, The Netherlands, 2–6 June 2024. – Delft: Delft Open Publishing, 2024. – 22 p. DOI: <https://doi.org/10.59490/imdc.2024.861>.
6. Research Progress of Fuel Cell Technology in Marine Applications / Z. Zhang, X. Zheng, D. Cui et al. // Journal of Marine Science and Engineering. – 2025. – Vol. 13, iss. 4. – 60 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse13040721>
7. Korobko, V. Utilizing thermoacoustic technologies in marine hybrid power plants with fuel cells / V. Korobko, A. Shevtsov // Aerospace Technic and Technology. – 2023. – No. 4 (188). – P. 85–91. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2023.4.11>.

8. On-Board Liquid Hydrogen Cold Energy Utilization System for a Heavy-Duty Fuel Cell Hybrid Truck / M. Yang, S. Hu, F. Yang et al. // *World Electric Vehicle Journal*. – 2021. – Vol. 12, iss. 3. – 13 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj12030136>.

9. Characteristics of onset and damping in a standing-wave thermoacoustic engine driven by liquid nitrogen / L. M. Qiu, P. Lou, K. Wang et al. // *Chinese Science Bulletin*. – 2013. – Vol. 58, iss. 11. – P. 1325–1330. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5214-z>.

10. Коробко, В. В. Числове моделювання суднової термоакустичної системи регазифікації LNG палив / В. В. Коробко, О. О. Московко, Д. О. Тимошенко // *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. – Херсон, 2015. – № 1 (12). – С. 36–42.

11. A review of fuel cell systems for maritime applications / L. Van Biert, M. Godjevac, K. Visser, P. V. Aravind b// *Journal of Power Sources*. – 2016. – Vol. 327. – P. 345–364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.07.007>.

12. Fuel Cell Systems for Maritime: A Review of Research Development, Commercial Products, Applications, and Perspectives / A. G. Elkafas, M. Rivarolo, E. Gadducci et al. // *Processes*. – 2023. – Vol. 11, iss. 1. – 33 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11010097>.

## References

1. International Maritime Organization. 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. Available et: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/2023-imo-strategy-on-reduction-of-ghg-emissions-from-ships.aspx>

2. DNV. Maritime Forecast to 2050: Energy Transition Outlook 2024. Høvik, Norway : DNV, 2024. 128 p. Available et: <https://www.dnv.com/maritime/maritime-forecast>

3. Lim, Y. Alternative Fuels and 2023 IMO GHG Strategy. *Alternative Fuels for Environmentally-Friendly Ships*, 2025. 11 p. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-85082-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-85082-0_1)

4. Yuksel, O., Blanco-Davis, E., Spiteri, A., Hitchmough, D., Shagar, V., Carmela Di Piazza, M., Pucci, M., Tsoulakos, N., Armin, M., Wang, J. Optimising the Design of a Hybrid Fuel Cell/Battery and Waste Heat Recovery System for Retrofitting Ship Power Generation. *Energies*, 2025, vol. 18, iss. 2. 40 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18020288>.

5. Nazemian, A., Boulougouris, E., Melemadom, S. K. Hybrid and Alternative Fuel Power Management Systems in Ships – Multi-Criteria Decision-Making Assessment. *Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Marine Design Conference, Amsterdam, The Netherlands, 2–6 June 2024*. – Delft : Delft Open Publishing, 2024. – 22 p. DOI: <https://doi.org/10.59490/imdc.2024.861>.

6. Zhang, Z., Zheng, X., Cui, D., Yang, M., Cheng, M., Ji, Y. Research Progress of Fuel Cell Technology in Marine Applications. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2025, vol. 13, iss. 4. 60 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse13040721>

7. Korobko, V., Shevtsov, A. Utilizing thermoacoustic technologies in marine hybrid power plants with fuel cells. *Aerospace Technic and Technology*, 2023, no. 4 (188), pp. 85–91. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2023.4.11>.

8. Yang, M., Hu, S., Yang, F., Xu, L., Bu, Y., Yuan, D. On-Board Liquid Hydrogen Cold Energy Utilization System for a Heavy-Duty Fuel Cell Hybrid Truck. *World Electric Vehicle Journal*, 2021, vol. 12, iss. 3. 13 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj12030136>.

9. Qiu, L. M., Lou, P., Wang, K., Wang, B., Sun, D. M., Rao, J. F., Zhang, X. J. Characteristics of onset and damping in a standing-wave thermoacoustic engine driven by liquid nitrogen. *Chinese Science Bulletin*, 2013, vol. 58, iss. 11, pp. 1325–1330. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5214-z>.

10. Korobko, V. V., Moskovko, O. O., Tymoshenko, D. O. Chyslove modeliuvannia sudnovoi termoakustichnoi systemy rehazyfikatsii LNG palyv [Numerical modeling of ship thermoacoustic LNG regasification system]. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii* [Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy]. Kherson, 2015, vol. 1, no. 12, pp. 36–42.

11. Van Biert, L., Godjevac, M., Visser, K. A review of fuel cell systems for maritime applications. *Journal of Power Sources*, 2016, vol. 327, pp. 345–364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.07.007>.

12. Elkafas, A. G., Rivarolo, M., Gadducci, E., Magistri, L., Massardo, A. F. Fuel Cell Systems for Maritime: A Review of Research Development, Commercial Products, Applications, and Perspectives. *Processes*, 2023, vol. 11, iss. 1. 33 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11010097>.

Надійшла до редакції 29.06.2026, отримано в доопрацьованому вигляді 02.08.2026.

Дата ухвалення 19.08.2026, дата публікації 03.09.2026

## REGASIFICATION OF CRYOGENIC FUELS IN HYBRID SHIP POWER SYSTEMS WITH PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELLS

*Volodymyr Korobko, Anatoliy Shevtsov*

Due to tightening of environmental regulations for maritime transport, there is growing interest in hybrid ship power systems (HSPSSs), which combine heat engines, electrochemical generators, battery energy storage systems, and equipment for the conversion, storage, and distribution of electrical energy. The use of low-carbon and carbon-

free fuels reduces carbon oxide emissions; however, it does not completely eliminate the formation of other combustion products. Therefore, a promising approach is the integration of different principles of fuel energy conversion, in particular electrochemical and thermal conversion, with waste heat recovery.

The subject of this study is the utilization of waste heat from low-temperature proton exchange membrane fuel cells (PEM FCs) in cryogenic fuel regasification systems within HSPSs. For PEM FCs, the temperature of waste heat carriers is typically 330–360 K, whereas the temperature of the heat sink is determined by the type of cryogenic fuel and varies from 20 K for liquid hydrogen (LH<sub>2</sub>) to 240 K for liquefied ammonia (LNH<sub>3</sub>).

The aim of the study is to determine optimal system configurations for utilizing PEM FC waste heat, considering the temperature potential of cryogenic fuels during regasification. The research objectives include analyzing the temperature levels of the heat source and the cryogenic heat sink, comparing the regasification conditions of different fuels, assessing the feasibility of using low-temperature thermoacoustic engines in a waste heat recovery system (WHRS), and determining the potential increase in HSPS efficiency.

The research methods are based on thermodynamic analysis of heat transfer processes, computational assessment of heat flows during cryogenic fuel regasification, and comparative analysis of waste-heat recovery configurations.

The results show that the significant temperature difference between PEM FC waste heat and the cryogenic fuel creates the necessary conditions for integrating fuel regasification with waste heat recovery. It was established that using of low-temperature thermoacoustic engines can increase the economic efficiency of HSPSs by 8–15%, depending on the temperature difference between the waste heat source and the cryogenic medium.

The scientific novelty of the study lies in substantiating the use of the temperature potential of cryogenic fuels as a low-temperature heat sink for PEM FC waste heat recovery. The practical novelty consists in identifying promising configurations for integrating cryogenic fuel regasification, PEM FCs, and WHRSs within hybrid ship power systems. It is shown that such systems are most effective in HSPSs using liquefied ammonia as fuel.

**Keywords:** waste heat recovery, cryogenic fuel, liquefied gas, hydrogen, ammonia, thermoacoustic engines, efficiency.

**Коробко Володимир Владиславович** – доктор техн. наук, професор, професор кафедри експлуатації суднових стаціонарних енергетичних установок та теплоенергетики, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

**Шевцов Анатолій Павлович**, доктор технічних наук, професор, професор навчально–наукового центру морської інфраструктури, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

**Volodymyr Korobko** – Doctor of Tech. Sciences, Professor, Professor at the Department of Operation of Ship Power Plants and Thermal Power Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine;

e-mail: volodymyr.korobko@nuos.edu.ua, kvv001@gmail.com; ORCID: 0000-0001-5761-6824

**Anatoliy Shevtsov** – Doctor of Tech. Sciences, Professor, Professor at the Educational and Scientific Center of Marine Infrastructure, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine;

e-mail: aootnet@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8692-6458.