

УДК 629.5.036:621.43.056
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.2\(505\).3](https://doi.org/10.15589/znp2026.2(505).3)

CURRENT TECHNOLOGIES FOR LOW-GRADE WASTE HEAT RECOVERY IN HYBRID POWER SYSTEMS OF CONTAINER SHIPS UNDER SLOW STEAMING CONDITIONS: AN ANALYTICAL REVIEW

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНОЇ ТЕПЛОТИ В ГІБРИДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ КОНТЕЙНЕРОВОЗІВ В УМОВАХ РЕЖИМУ SLOW STEAMING: АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Pavlo A. Riazantsev
priazantsev@ukr.net
ORCID: 0009-0001-9106-0978

П. А. Рязанцев,
аспірант

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. *Aim.* To conduct an analytical review of modern waste heat recovery technologies in ship power systems of container vessels and to assess their effectiveness under slow steaming conditions, taking into account the potential of low-grade heat sources and their integration into hybrid energy systems.

Methodology. The study is based on a systematic and comparative analysis of scientific literature in the field of waste heat recovery for marine energy systems. The results of recent studies on organic Rankine cycle (ORC) systems, combined thermodynamic cycles, and multi-source heat recovery approaches have been analyzed and generalized.

Results. It has been established that the efficiency of conventional waste heat recovery systems based on exhaust gas utilization significantly decreases under partial engine load conditions typical for slow steaming. It has been shown that under such conditions the importance of low-grade heat sources, particularly cooling water, increases. The feasibility of applying multi-source heat recovery systems, which allow more complete utilization of available thermal energy, has been substantiated.

Scientific novelty. The influence of slow steaming conditions on the efficiency of waste heat recovery systems has been systematized, and the necessity of transitioning from single-source to multi-source approaches with emphasis on low-grade heat utilization has been justified.

Practical significance. The obtained results can be used in the design and modernization of ship power systems of container vessels to improve energy efficiency and reduce emissions through more effective utilization of thermal resources.

Key words: ship power systems; container ships; waste heat recovery; exhaust gas; low-grade heat; organic Rankine cycle; hybrid systems; slow steaming.

Анотація. *Мета.* Провести аналітичний огляд сучасних технологій утилізації теплоти в суднових енергетичних установках контейнеровозів та визначити їх ефективність в умовах режиму slow steaming з урахуванням потенціалу використання низькопотенційних джерел теплоти та інтеграції в гібридні енергетичні системи.

Методика. Дослідження виконано з використанням методів системного та порівняльного аналізу наукових джерел у сфері утилізації теплоти суднових енергетичних установок. Проведено узагальнення результатів сучасних досліджень щодо використання органічного циклу Ренкіна (ORC), комбінованих термодинамічних циклів та багатоджерельних систем утилізації теплоти.

Результати. Встановлено, що ефективність традиційних систем утилізації теплоти, орієнтованих на використання відхідних газів, суттєво знижується при роботі двигуна на часткових навантаженнях, характерних для режиму slow steaming. Показано, що в таких умовах зростає значення низькопотенційних джерел теплоти, зокрема теплоти систем охолодження. Обґрунтовано доцільність використання багатоджерельних систем утилізації теплоти, які забезпечують більш повне використання енергетичного потенціалу суднових двигунів.

Наукова новизна. Узагальнено вплив режиму slow steaming на ефективність систем утилізації теплоти та обґрунтовано необхідність переходу від однострумкових до багатоджерельних підходів з урахуванням ролі низькопотенційної теплоти.

Практична значимість. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації суднових енергетичних установок контейнеровозів з метою підвищення їх енергоефективності та зниження викидів за рахунок ефективного використання теплових ресурсів.

Ключові слова: суднові енергетичні установки; контейнеровози; утилізація теплоти; відхідні гази; низькопотенційна теплота; органічний цикл Ренкіна; гібридні системи; slow steaming.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасні контейнеровози є одним із ключових елементів глобальної транспортної інфраструктури, забезпечуючи основний обсяг міжконтинентальних вантажних перевезень. Водночас підвищення вимог до енергоефективності суден та зменшення викидів парникових газів, регламентованих міжнародними нормативами, зокрема MARPOL Annex VI та показниками EEXI і CII, обумовлює необхідність впровадження нових технологічних рішень у суднових енергетичних установках. Одним із найбільш перспективних напрямів підвищення ефективності суднових енергетичних систем є утилізація відпрацьованої теплоти. Відомо, що значна частина енергії палива, яка використовується в двигунах внутрішнього згорання, втрачається у вигляді теплових потоків через відхідні гази, системи охолодження та інші допоміжні контури. Традиційно основна увага приділяється утилізації високотемпературної теплоти відхідних газів, що забезпечує найбільший потенціал для виробництва додаткової енергії.

Проте сучасні експлуатаційні умови роботи контейнеровозів суттєво змінилися у зв'язку з широким впровадженням режиму зниженого навантаження (slow steaming), який передбачає зниження швидкості судна з метою зменшення витрат палива та викидів. Такий режим роботи призводить до зниження температури та масової витрати відхідних газів, що безпосередньо впливає на ефективність традиційних систем утилізації теплоти. У цих умовах зростає актуальність використання альтернативних джерел теплової енергії, зокрема низькопотенційної теплоти, що відводиться з систем охолодження двигуна, масляних систем та повітряних потоків. Однак такий підхід до декарбонізації створює технічне протиріччя: зниження навантаження головного двигуна призводить до суттєвого зменшення температури та масової витрати відхідних газів. Це робить традиційні системи утилізації теплоти (WHR), спроектовані для роботи на номінальних режимах, малоефективними.

Внаслідок цього виникає науково-практична потреба у переоцінці енергетичного потенціалу судна та пошуку шляхів ефективного використання низькопотенційних джерел теплоти (системи охолодження, масла), які в умовах часткових навантажень зберігають більшу стабільність теплових потоків.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Сучасні дослідження у сфері підвищення енергоефективності суднових енергетичних установок істотно активізувалися під впливом нових міжнародних екологічних вимог. Введення обов'язкових показників EEXI та CII з 1 січня 2023 року перевело питання паливної економічності та скорочення викидів із площини бажаних технічних удосконалень у площину

нормативної необхідності. Для контейнеровозів це особливо важливо, оскільки саме вони працюють у сегменті високої інтенсивності перевезень і є чутливими до будь-яких рішень, що впливають на витрати палива та вуглецеву інтенсивність перевезення [1, 2].

У широких оглядових роботах з морської теплоутилізації показано, що значна частка енергії палива в суднових дизелях втрачається у вигляді теплоти, а системи утилізації теплоти (WHR) розглядаються як один із найперспективніших шляхів підвищення загального ККД суднової енергетичної установки. У цьому контексті найбільш детально дослідженими є парові цикли, органічний цикл Ренкіна, цикл Каліни та утилізаційні цикли на вуглекислому газі. При цьому саме органічний цикл Ренкіна у літературі найчастіше розглядається як найбільш універсальна технологія для морських застосувань завдяки здатності працювати з нижчими температурами джерела теплоти, ніж класичні парові схеми [3, 4, 5].

Окремий пласт джерел присвячений саме органічному циклу Ренкіна для суднових установок. У таких роботах підкреслюється, що органічний цикл Ренкіна є технологічно зрілим рішенням для утилізації теплоти на борту суден, а потенціал його застосування залежить від типу судна, профілю навантаження двигуна, доступних джерел теплоти та складності інтеграції в бортову енергетичну систему. Водночас автори вказують, що економічна доцільність і практична реалізованість органічного циклу Ренкіна на флоті ще не є однозначно доведеними для всіх типів суден, а найбільш перспективними залишаються великі судна з високими і стабільними тепловими потоками. Це важливо для контейнеровозів, але одразу підводить до питання, як змінюється ця перспектива в умовах зниженого навантаження [3, 6].

У частині робіт, присвячених реальним експлуатаційним режимам, наголошується, що ефективність систем органічного циклу Ренкіна істотно залежить від навантаження головного двигуна. Дослідження морських систем органічного циклу Ренкіна при різних умовах експлуатації показують, що при зниженні навантаження двигуна зменшуються температура та витрата відхідних газів, а це прямо впливає на виробіток корисної енергії в утилізаційному циклі. Саме тому для сучасних контейнеровозів, де широко застосовується режим зниженого навантаження, висновки, отримані для номінальних режимів, не можна автоматично переносити на часткові навантаження без додаткового аналізу [7, 8].

На цьому тлі у сучасніших роботах простежується зсув уваги від суто вихлопної теплоти до багатоджерельних схем. Зокрема, у дослідженнях багаторівневої утилізації відхідної теплоти для двотактних суднових двигунів одночасно розглядаються відхідні гази, охолоджувальна вода циліндрів та наддувочне повітря. Такий підхід демонструє, що ефективність

системи можна підвищувати не лише за рахунок «гарячішого» джерела, а й через комбінування кількох теплових потоків з різними температурними рівнями. Це підтверджує тезу, що за умов зниження потенціалу утилізації відхідних газів зростає значення низькопотенційної або комбінованої теплоти [9].

Дослідження низькопотенційної теплоти окремо також підтверджують її практичний потенціал, хоча й із певними обмеженнями. Є роботи, в яких системи органічного циклу Ренкіна проєктуються спеціально під теплоту охолоджувальної води циліндрів судових двигунів, зокрема для температур близько 85 °С. Вони показують, що навіть за відносно низьких температур можлива стабільна генерація електроенергії, але ключовими проблемами залишаються менший термічний ККД, чутливість до умов охолодження та більш

жорсткі вимоги до підбору робочого тіла й компоновки теплообмінників. Отже, низькопотенційна теплота не виступає прямою альтернативою теплоті відхідних газів, проте є обґрунтованим вектором розвитку енергетичних систем [10, 11].

Ще один важливий напрям – комбіновані термодинамічні схеми. У роботах, де аналізується поєднання органічного циклу Ренкіна і циклу Каліни для судових двигунів, показано, що комбіновані системи можуть ефективніше використовувати одночасно високотемпературні та низкотемпературні джерела теплоти, ніж одноконтурні рішення. Водночас ці ж дослідження прямо вказують на підвищення конструктивної складності, складності керування та інтеграції в судову установку. Це означає, що з наукового погляду комбіновані цикли є перспективними,

Таблиця 1. Порівняльний аналіз сучасних досліджень у сфері утилізації теплоти судових енергетичних установок

Автори, рік	Об'єкт дослідження	Основні висновки	Виявлені обмеження	Значення для даної роботи
Larsen et al., 2018	Суднові малооборотіві двигуни	Системи органічного циклу Ренкіна є ефективним рішенням для утилізації теплоти, можливе зниження витрат палива до 10–15 %	Висока залежність від температури джерела	Підтверджує базову ефективність систем органічного циклу Ренкіна
Singh et al., 2015	Суднові енергетичні системи	Системи утилізації теплоти є одним із ключових напрямів підвищення ефективності	Недостатній аналіз інтеграції в гібридні системи	Загальний огляд технологій
Díaz-Secades et al., 2023	Суднові малооборотіві двигуни	Системи органічного циклу Ренкіна є найпоширенішою технологією утилізації теплоти	Обмежений аналіз часткових навантажень	Підтверджує сучасний стан технологій
Shu et al., 2017	Суднові малооборотіві двигуни	Ефективність систем органічного циклу Ренкіна знижується при частковому навантаженні двигуна	Не враховано комплексні системи	Підтверджує вплив режиму зниженого навантаження
Baldi et al., 2016	Суднові малооборотіві двигуни	Ефективність залежить від режиму роботи двигуна	Відсутній аналіз використання низькопотенційної теплоти	Підсилює аргумент про змінні режими
Yang et al., 2019	Суднові малооборотіві двигуни	Низькопотенційна теплота має значний потенціал	Низький термічний ККД	Обґрунтовує напрям використання низькопотенційної теплоти
Feng et al., 2025	Суднові малооборотіві двигуни	Багатоджерельні системи є ефективнішими за однострумкові	Складність реалізації	Ключ до комбінованого підходу
Zhang et al., 2020	Суднові малооборотіві двигуни	Комбіновані цикли підвищують ефективність	Висока складність інтеграції	Показує перспективу розвитку
Oh et al., 2022	Гібридні суднові установки	Інтеграція систем утилізації теплоти у гібридні системи є перспективною	Складність управління	Підтверджує тренд гібридизації
ORC review (DTU), 2018	Суднові енергетичні установки	Системи органічного циклу Ренкіна є технологічно зрілою системою для суден	Залежність від режиму роботи	Узагальнює підхід органічного циклу Ренкіна
Wärtsilä report	Суднові енергетичні установки	Ефективність залежить від експлуатаційного режиму	Недостатній аналіз режимів малих навантажень	Підсилює тему режиму зниженого навантаження
IMO, 2023	Морський транспорт	Посилення вимог до енергоефективності	Відсутній технічний аналіз	Обґрунтовує актуальність

але їх доцільніше розглядати їх як перспективний напрям, а не як базове практичне рішення для масового впровадження [3, 12].

У нових дослідженнях також посилюється інтерес до інтеграції теплоутилізації у ширші гібридні суднові архітектури. Наукові праці щодо гібридних пропульсивних систем із паливними елементами та утилізацією теплоти свідчать, що теплова енергія дедалі частіше розглядається не як побічний ресурс окремого двигуна, а як один із складників інтегрованого енергетичного контуру судна. З методологічної точки зору це має визначальне значення: оглядово-аналітичний характер дослідження дозволяє обґрунтувати тезу про те, що вектор розвитку технологій зміщується від удосконалення ізольованих модулів системи органічного циклу Ренкіна до їхньої системної інтеграції у склад гібридних енергетичних комплексів судна [13, 14].

Загалом огляд літератури демонструє виразну еволюцію наукових підходів: від досліджень, зосереджених переважно на утилізації теплоти відхідних газів, до праць, що аналізують багатоджерельні системи, утилізацію низькопотенційної теплоти та інтегровані гібридні схеми. Водночас саме для контейнеровозів у режимі зниженої швидкості кількість систематизованих оглядово-аналітичних узагальнень є незначною. Це дає підстави стверджувати, що подальший аналіз доцільно спрямувати на оцінювання того, як саме зміна експлуатаційного режиму впливає на відносну перспективність високотемпературних, низькопотенційних і комбінованих систем утилізації теплоти [5, 6, 7, 9].

У таблиці 1 наведено результати аналізу ключових досліджень, які демонструють еволюцію підходів до утилізації теплоти: від фокусування на високотемпературних відхідних газах до впровадження багатоджерельних систем. Дані підтверджують, що в умовах змінного навантаження головних двигунів саме використання низькопотенційної теплоти дозволяє забезпечити стабільність генерації енергії та компенсувати деградацію ефективності традиційних контурів.

ВИДІЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ ЧАСТИН ПРОБЛЕМИ (RESEARCH GAP)

Аналіз сучасних наукових досліджень у сфері утилізації теплоти суднових енергетичних установок свідчить про значний прогрес у розробці та впровадженні технологій підвищення енергоефективності. Зокрема, більшість робіт зосереджені на використанні органічного циклу Ренкіна (ORC) для утилізації теплоти відхідних газів, що дозволяє забезпечити помітне зниження витрат палива та підвищення загального коефіцієнта корисної дії суднових енергетичних систем. Водночас у літературі недостатньо уваги приділяється комплексному аналізу ефективності цих систем у змінних експлуатаційних режимах, характерних для сучасного транспортного флоту.

Окремим обмеженням існуючих досліджень є їх орієнтація переважно на номінальні або близькі до номінальних режими роботи двигунів. Як показують окремі роботи, ефективність систем утилізації теплоти, зокрема органічного циклу Ренкіна, суттєво залежить від навантаження двигуна та температурних параметрів відхідних газів. Проте систематизований аналіз впливу режиму зниженого навантаження, який сьогодні широко застосовується на контейнеровозах, у більшості досліджень відсутній або розглядається фрагментарно. Це створює невизначеність щодо реальної ефективності традиційних систем утилізації теплоти в умовах сучасної експлуатації суден.

Ще одним суттєвим обмеженням є домінування підходів, орієнтованих на використання високотемпературної теплоти відхідних газів, тоді як потенціал низькопотенційних джерел теплоти досліджений значно менше. Хоча окремі роботи демонструють можливість використання теплоти охолоджувальної води та інших низькотемпературних потоків, їх ефективність, технічна доцільність та роль у загальній енергетичній системі судна залишаються недостатньо обґрунтованими. Крім того, у сучасній науковій літературі недостатньо представлені комплексні дослідження, що розглядають утилізацію теплоти як частину гібридної суднової енергетичної системи. Більшість робіт аналізують окремі технології або окремі джерела теплоти, не враховуючи їх взаємодію в рамках інтегрованого енергетичного контуру судна. Це обмежує можливість формування системного підходу до підвищення енергоефективності контейнеровозів.

Таким чином, можна виділити основні невирішені частини проблеми:

- відсутність системного аналізу ефективності технологій утилізації теплоти в умовах режиму зниженого навантаження;
- недостатнє дослідження потенціалу низькопотенційних джерел теплоти в суднових енергетичних установках;
- обмежена кількість робіт, присвячених комплексному використанню кількох джерел теплоти;
- недостатній рівень інтеграції теплоутилізаційних систем у гібридні енергетичні установки суден.

Ураховуючи зазначене, доцільним є проведення аналітичного дослідження сучасних технологій утилізації теплоти з урахуванням змін експлуатаційних режимів контейнеровозів та визначення перспективних напрямів використання низькопотенційної теплоти в гібридних суднових енергетичних установках.

МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета дослідження

Метою даної роботи є проведення аналітичного огляду сучасних технологій утилізації теплоти в суднових енергетичних установках контейнеровозів та визначення їх ефективності в умовах змінних

режимів експлуатації, зокрема режиму зниженого навантаження, з урахуванням потенціалу використання низькопотенційних джерел теплоти та інтеграції в гібридні енергетичні системи.

Задачі дослідження

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі задачі:

1. Проаналізувати сучасний стан досліджень у сфері утилізації теплоти суднових енергетичних установок.
2. Визначити основні джерела теплових втрат у двигунах внутрішнього згоряння контейнеровозів та оцінити їх енергетичний потенціал.
3. Дослідити особливості впливу режиму зниженого навантаження на параметри теплових потоків та ефективність систем утилізації теплоти.
4. Виконати порівняльний аналіз існуючих технологій утилізації теплоти, зокрема систем на основі органічного циклу Ренкіна, комбінованих термодинамічних циклів та багатоджерельних систем.
5. Оцінити можливості використання низькопотенційних джерел теплоти в суднових енергетичних установках.
6. Проаналізувати перспективи інтеграції систем утилізації теплоти у гібридні енергетичні установки контейнеровозів.
7. Визначити перспективні напрямки розвитку технологій утилізації теплоти з урахуванням сучасних експлуатаційних умов.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У даній роботі застосовано комплекс загальнонауккових та спеціальних методів дослідження, що забезпечують системний аналіз сучасних технологій утилізації теплоти в суднових енергетичних установках.

Основним методом дослідження є аналіз наукових джерел (літературний огляд), який дозволяє узагальнити сучасний стан розвитку технологій утилізації теплоти, визначити основні напрями досліджень, а також виявити існуючі обмеження та невирішені проблеми у даній галузі.

Для систематизації отриманої інформації використано метод системного аналізу, який дозволяє розглянути суднову енергетичну установку як комплекс взаємопов'язаних елементів, включаючи джерела теплових втрат, системи утилізації та гібридні енергетичні компоненти.

З метою оцінювання ефективності різних технологічних рішень застосовано порівняльний аналіз, що передбачає зіставлення існуючих технологій утилізації теплоти за такими критеріями, як температурний рівень джерела теплоти, енергетична ефективність, складність реалізації та придатність до використання в умовах змінних режимів роботи судна.

Для визначення впливу експлуатаційних умов, зокрема режиму зниженого навантаження, на ефективність утилізації теплоти використано аналітичний

метод узагальнення результатів досліджень, що дозволяє встановити залежність ефективності систем від режимів роботи двигуна.

Крім того, застосовано елементи енергетичного підходу, які полягають у якісній оцінці розподілу теплових потоків у судновій енергетичній установці та визначенні потенціалу використання низькопотенційних джерел теплоти.

Таким чином, використання зазначених методів забезпечує комплексний підхід до аналізу сучасних технологій утилізації теплоти та дозволяє обґрунтувати перспективні напрямки їх розвитку в умовах гібридних суднових енергетичних установок.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Техніко-експлуатаційні характеристики сучасних контейнеровозів та їх енергетичних комплексів

Сучасний етап розвитку контейнерних перевезень характеризується введенням в експлуатацію надвеликих суден класу ULCV (Ultra Large Container Vessels) місткістю понад 20 000 TEU. Енергетичні установки таких суден базуються на двотактних низькооборотних дизелях, що мають високу одиничну потужність (до 60...80 МВт). Проте в умовах посилення екологічних вимог та впровадження режиму slow steaming, конфігурація СЕУ стає складнішою, включаючи системи валогенераторів (РТО/РТИ), системи очищення газів та розвинені контури теплоутилізації (WHR).

Нижче наведено порівняльний аналіз енергетичних комплексів 5-ти сучасних суден, що репрезентують різні технологічні підходи до декарбонізації: від класичних дизельних схем до використання LNG та метанолу [18, 19].

У таблиці 2 показано технічні параметри сучасних контейнеровозів великої місткості, що ілюструють практичне впровадження технологій підвищення енергоефективності. Наведені дані свідчать про те, що оснащення суден валогенераторами та інтегрованими системами утилізації теплоти є стандартним рішенням, яке дозволяє підтримувати високі показники паливної економічності навіть при тривалій експлуатації в режимах зниженої швидкості [15, 16, 17].

Аналіз технічних характеристик обраних суден дозволяє виділити кілька ключових тенденцій:

1. Уніфікація габаритів. Більшість ULCV мають граничну довжину 400 м та ширину близько 61 м, що зумовлено обмеженнями інфраструктури портів та судноплавних каналів.

2. Перехід на альтернативні палива. Судна типу CMA CGM Jacques Saadé та Ane Maersk демонструють відхід від традиційних нафтопродуктів на користь LNG та метанолу, що суттєво змінює параметри відхідних газів (менший вміст сірки дозволяє глибшу утилізацію теплоти без ризику корозії).

3. Гібридизація через валогенератори. Усі розглянуті судна обладнані валогенераторами. Це дозволяє використовувати частину потужності ГД для

Таблиця 2. Порівняльна характеристика сучасних контейнеровозів та їх енергетичних установок

Назва судна (Рік)	MSC Tessa (2023)	Ever Alot (2022)	CMA CGM Jacques Saadé (2020)	HMM Algeciras (2020)	Ane Maersk (2024)
Місткість, TEU	24 116	24 004	23 112	23 964	16 200
Довжина (L / LBP), м	399.9 / 383.0	399.9/383.5	399.9 / 382.4	399.9 / 383.0	350.6 / 335.5
Ширина/Осадка, м	61.5 / 17.0	61.5/17.0	61.3 / 16.0	61.0 / 16.5	53.5 / 16.3
Головний двигун (ГД)	WinGD 11X92	WinGD 11X92	WinGD 12X92DF (Dual-Fuel)	MAN B&W 11G95ME-C10.5	MAN B&W 8G95ME-C10.5-LGIM
Потужність ГД (MCR), кВт	70 500	70 500	63 840	60 390	44 300
Паливо	VLSFO / MGO	VLSFO/MGO	LNG / VLSFO	VLSFO / MGO	Methanol / VLSFO
Дизель-генератори	4 × 4500 кВт	4 × 4500 кВт	3 × 4000 кВт	4 × 4200 кВт	4 × 3800 кВт
Валогенератор (Shaft Gen.)	Так (Permanent Magnet)	Так	Так (PTO/PTI)	Так	Так
Система WHR	Робота в режимі PTO	Розвинена (ORC)	Комплексна	Скрубер + WHR	Низькотемпературна

вироблення електроенергії, що є особливо ефективним при роботі в режимі зниженого навантаження, коли ГД має надлишок потужності щодо необхідної для зниженої швидкості.

4. Комплексність WHR. Для суден місткістю понад 20 000 TEU системи утилізації теплоти є не просто допоміжними, а інтегрованими елементами, що забезпечують до 10...15 % потреб судна в електроенергії.

Енергетичний баланс контейнеровоза та джерела теплових втрат

Енергетична ефективність контейнеровозів значною мірою визначається характеристиками їх суднових енергетичних установок, основу яких складають двотактні низькообертові дизельні двигуни великої потужності. Такі двигуни характеризуються відносно високим ефективним коефіцієнтом корисної дії, який може досягати 45...50 %, однак значна частина енергії палива втрачається у вигляді теплоти, що відводиться в навколишнє середовище через різні контури [6].

Загальний енергетичний баланс суднового дизельного двигуна включає корисну механічну енергію, що передається на гребний гвинт, та теплові втрати, які розподіляються між кількома основними потоками. Найбільш суттєвими з них є теплота відхідних газів, теплота, що відводиться системою охолодження циліндрів, теплота масляних систем, а також втрати через випромінювання та інші допоміжні процеси [3].

За даними досліджень, частка теплових втрат у відхідних газах може становити приблизно 25...30 % від загальної енергії палива, тоді як втрати через систему охолодження можуть досягати 15...20 %. Інші джерела, такі як теплота масла та повітря наддуву, формують додатковий, хоча й менш значний, енергетичний потенціал. Таким чином, сумарний потенціал утилізації теплоти в суднових енергетичних установках є значним і може бути використаний для підвищення загальної ефективності системи [9].

Як видно з рис. 1, структура енергетичного балансу сучасного суднового малообертового дизеля характеризується значним обсягом теплових втрат. При корисному використанні лише 45...50 % енергії палива, решта 50...55 % розсіюється через контури відхідних газів (близько 25...30 %) та системи охолодження (15...20 %), що формує значний потенціал для впровадження технологій вторинної генерації.

Традиційно основна увага в системах утилізації теплоти приділяється використанню високотемпературного потоку відхідних газів, оскільки він має найбільший ексергетичний потенціал. Саме на цьому джерелі базується більшість існуючих рішень,

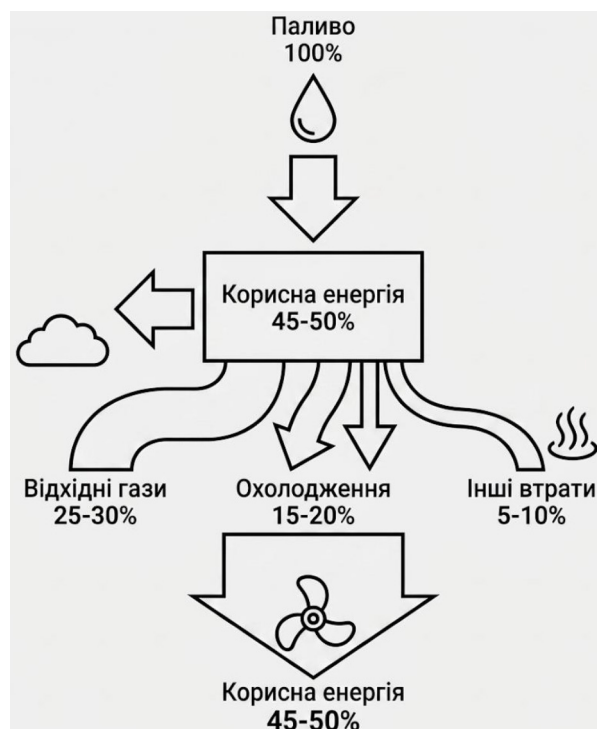


Рис. 1. Енергетичний баланс суднового дизеля
Джерело: розроблено автором за даними [9]

включаючи парові турбінні установки та системи на основі органічного циклу Ренкіна. Високий температурний рівень відхідних газів забезпечує відносно високий коефіцієнт перетворення теплової енергії у корисну роботу [6].

Водночас значна частина теплових втрат припадає на низькопотенційні джерела, зокрема системи охолодження двигуна, температура яких зазвичай знаходиться в діапазоні 70...90 °C. Хоча такі джерела мають менший термодинамічний потенціал, їх стабільність та значний сумарний обсяг роблять їх перспективними для використання в системах утилізації теплоти, особливо у поєднанні з іншими джерелами [10].

Таким чином, енергетичний баланс контейнеровоза характеризується наявністю кількох джерел теплових втрат із різними температурними рівнями та потенціалом утилізації. Це обумовлює необхідність переходу від використання окремих джерел теплоти до комплексних багатоджерельних систем, що дозволяють більш повно використовувати доступні енергетичні ресурси.

Вплив режиму зниженого навантаження на ефективність утилізації теплоти

Однією з ключових тенденцій у сучасній експлуатації контейнеровозів є широке впровадження режиму зниженого навантаження, який передбачає зниження швидкості судна з метою скорочення витрат палива та викидів шкідливих речовин. Зменшення швидкості судна супроводжується відповідним зниженням навантаження на головний двигун, що призводить до зміни параметрів робочого процесу, зокрема температури та масової витрати відхідних газів [2].

Як показують дослідження, ефективність систем утилізації теплоти, зокрема на основі органічного циклу Ренкіна (ORC), істотно залежить від

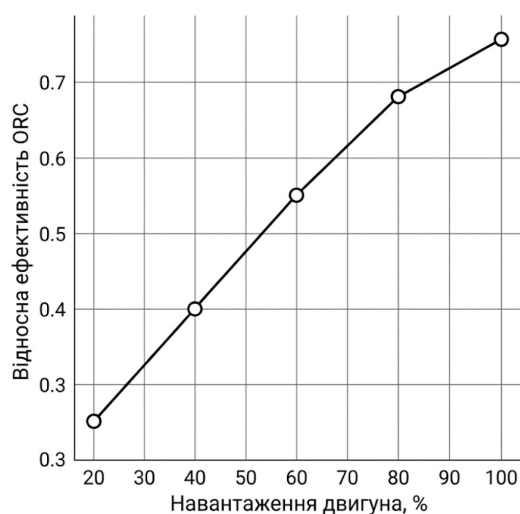


Рис. 2. Залежність температури вихлопних газів / ККД системи на основі органічного циклу Ренкіна (ORC) від навантаження двигуна.

Джерело: розроблено автором за даними [7]

температурного рівня джерела теплоти. При роботі двигуна на часткових навантаженнях температура відхідних газів знижується, що призводить до зменшення термодинамічного потенціалу системи утилізації. Крім того, зменшується масова витрата газів, що обмежує кількість доступної теплової енергії. У результаті ефективність перетворення теплоти у корисну роботу значно знижується порівняно з номінальними режимами [7].

На рис. 2 представлено графічні залежності, що ілюструють деградацію параметрів утилізації в режимі зниженого навантаження. Аналіз робіт, присвячених моделюванню судових систем на основі органічного циклу Ренкіна (ORC), підтверджує, що при зниженні навантаження двигуна відбувається непропорційне падіння виробітку енергії в утилізаційних циклах. Це пов'язано не лише зі зниженням температури, але й зі зміною теплового балансу двигуна в цілому, коли відносна частка низькопотенційних теплових потоків зростає. Таким чином, ефективність систем, орієнтованих виключно на відхідні гази, у режимі зниженого навантаження стає обмеженою [6].

Водночас у ряді досліджень зазначається, що при зниженні навантаження двигуна відбувається відносно збільшення частки теплоти, що відводиться через систему охолодження. Це пов'язано зі зміною теплового режиму роботи двигуна та зниженням ефективності процесу згоряння. У таких умовах потенціал використання низькопотенційної теплоти стає більш значущим у порівнянні з високотемпературними джерелами [9].

Зазначені особливості призводять до того, що традиційні системи утилізації теплоти, спроектовані для роботи при номінальних навантаженнях, не забезпечують очікуваної ефективності в умовах реальної експлуатації сучасних контейнеровозів. Це обумовлює необхідність перегляду підходів до організації процесу утилізації теплоти з урахуванням змінного характеру роботи двигуна та переходу до більш гнучких систем.

У цьому контексті перспективним напрямом є використання багатоджерельних систем утилізації теплоти, які дозволяють компенсувати зниження потенціалу окремих джерел за рахунок їх комбінованого використання. Такі системи забезпечують більш стабільну роботу в широкому діапазоні навантажень та краще адаптуються до умов зниженого навантаження [9].

Таким чином, режим зниженого навантаження суттєво змінює умови роботи систем утилізації теплоти, знижуючи ефективність традиційних рішень, орієнтованих на відхідні гази, та підвищуючи значущість низькопотенційних і комбінованих джерел теплової енергії. Це підтверджує доцільність переходу до комплексних підходів у проектуванні судових енергетичних систем.

Аналіз сучасних технологій утилізації теплоти

Сучасні технології утилізації теплоти суднових енергетичних установок можна умовно розділити на кілька основних груп залежно від температурного рівня джерела теплоти та принципу перетворення енергії. Найбільш поширеними є системи, орієнтовані на використання високотемпературної теплоти відхідних газів, серед яких домінують парові турбінні установки та системи на основі органічного циклу Ренкіна (ORC) [6].

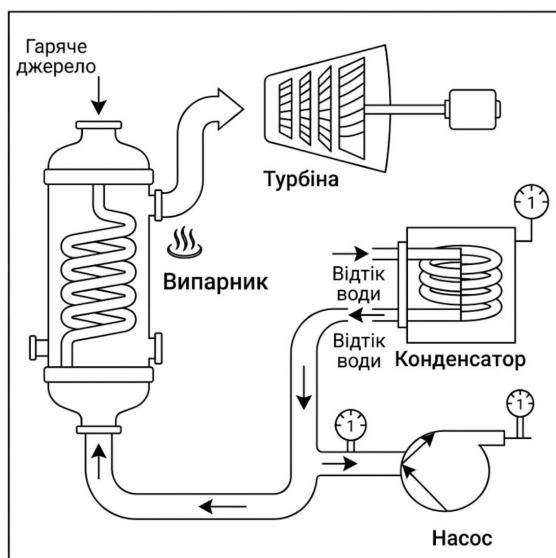


Рис. 3. Схема системи на основі органічного циклу Ренкіна (ORC).

Джерело: розроблено автором за даними [6]

Принципова схема установки на основі органічного циклу Ренкіна, наведена на рис. 3, демонструє взаємодію основних компонентів: випарника, турбіни, конденсатора та живильного насоса. Така конфігурація дозволяє трансформувати теплову енергію низькокиплячого робочого тіла у корисну електричну потужність.

Парові системи утилізації теплоти історично були першими рішеннями, що використовувались на судах, і забезпечують ефективне використання теплової енергії при високих температурах. Однак вони характеризуються значною масою, складністю конструкції та обмеженою ефективністю при змінних режимах роботи двигуна. У зв'язку з цим у сучасних дослідженнях все частіше розглядаються альтернативні рішення, зокрема системи на основі органічного циклу Ренкіна (ORC), які мають більшу гнучкість та здатність працювати в ширшому діапазоні температур [3].

Технології на основі органічного циклу Ренкіна (ORC) є найбільш дослідженим і поширеним рішенням для суднової теплоутилізації. Вони дозволяють ефективно використовувати теплоту відхідних газів, а також можуть бути адаптовані для роботи з нижчими

температурами шляхом вибору відповідного робочого тіла. Водночас ефективність органічного циклу Ренкіна суттєво залежить від температури джерела теплоти та режиму роботи двигуна, що обмежує їх застосування в умовах часткових навантажень [6].

З метою підвищення ефективності використання теплових ресурсів у сучасних дослідженнях активно розглядаються комбіновані термодинамічні цикли, зокрема поєднання органічного циклу Ренкіна та циклу Каліні. Такі системи дозволяють одночасно використовувати як високотемпературні, так і низькопотенційні джерела теплоти, що забезпечує більш повне використання енергетичного потенціалу двигуна. Однак підвищення ефективності супроводжується зростанням складності системи, що ускладнює її практичне впровадження [12].

Окрему групу становлять технології утилізації низькопотенційної теплоти, які базуються на використанні тепла систем охолодження двигуна, масляних контурів та повітряних потоків. Хоча такі джерела характеризуються нижчим температурним рівнем, їх значний обсяг і стабільність роблять їх перспективними для використання, особливо в умовах змінних режимів роботи судна. Разом з тим, ефективність перетворення низькопотенційної теплоти залишається обмеженою, що потребує застосування спеціалізованих технологічних рішень [10].

Подальший розвиток технологій утилізації теплоти пов'язаний із переходом до багатоджерельних систем, які дозволяють одночасно використовувати кілька теплових потоків різного температурного рівня. Такі системи демонструють вищу ефективність у порівнянні з традиційними рішеннями, оскільки забезпечують більш рівномірне використання доступної теплової енергії та підвищують стабільність роботи при змінних навантаженнях [9].

Крім того, сучасні тенденції розвитку суднової енергетики передбачають інтеграцію систем утилізації теплоти у гібридні енергетичні установки, що поєднують традиційні двигуни внутрішнього згоряння, електричні накопичувачі енергії та альтернативні джерела генерації. У таких системах теплова енергія розглядається як важливий елемент загального енергетичного балансу, що може використовуватись для підвищення ефективності всієї установки [13].

Використання низькопотенційних джерел теплоти в суднових енергетичних установках

Як було показано у попередніх підрозділах, сучасні умови експлуатації контейнеровозів, зокрема широке впровадження режиму зниженого навантаження, призводять до зниження температурного потенціалу відхідних газів та, відповідно, ефективності традиційних систем утилізації теплоти. У зв'язку з цим зростає актуальність використання низькопотенційних джерел теплоти, які раніше розглядалися як другорядні [7].

До основних низькопотенційних джерел теплоти в суднових дизельних установках належать теплота системи охолодження циліндрів, теплота масляних систем, а також теплота повітря наддуву. Температурний рівень цих джерел зазвичай знаходиться в діапазоні 70...120 °С, що значно нижче, ніж у відхідних газах, однак їх сумарний енергетичний потенціал є суттєвим. За результатами досліджень, частка теплоти, що відводиться через систему охолодження, може досягати 15...20 % від загальної енергії палива [9].

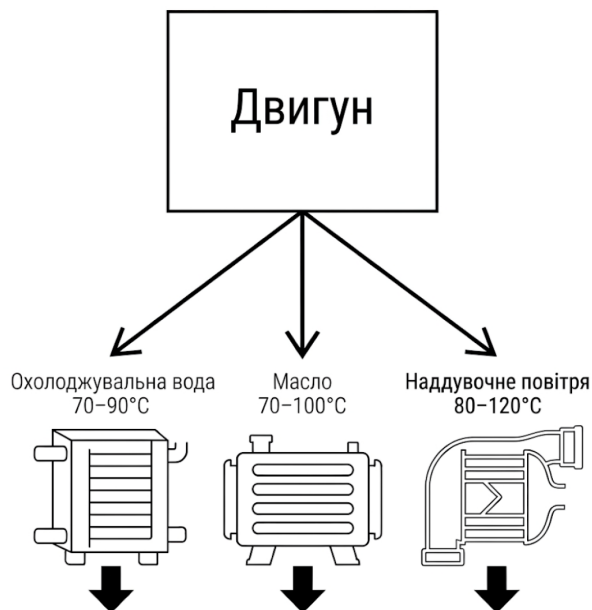


Рис. 4. Джерела низькопотенційної теплоти в двигуні.
Джерело: розроблено автором за даними [9]

На рис. 4 деталізовано вузли двигуна, що є джерелами низькопотенційної теплоти. До них належать система охолодження циліндрів, масляна система та охолоджувач наддувочного повітря, які, на відміну від відхідних газів, зберігають відносну термодинамічну стабільність при зміні швидкості ходу судна.

Основною проблемою використання низькопотенційної теплоти є її обмежений термодинамічний потенціал, що призводить до зниження коефіцієнта корисної дії відповідних систем утилізації. Для ефективного використання таких джерел необхідно застосовувати спеціалізовані рішення, зокрема системи на основі органічного циклу Ренкіна (ORC) з робочими тілами, адаптованими до низьких температур, або інші цикли, здатні працювати у відповідному температурному діапазоні [10].

У сучасних дослідженнях показано, що використання лише одного низькопотенційного джерела теплоти є малоефективним, однак їх комбіноване використання може забезпечити суттєве підвищення загальної ефективності системи. Зокрема, такий підхід, який передбачає одночасне використання теплоти охолоджувальної води, відхідних газів та інших

потоків, дозволяє компенсувати низький температурний рівень окремих джерел та підвищити стабільність роботи утилізаційної установки [9].

Важливою перевагою низькопотенційних джерел теплоти є їх відносна стабільність у широкому діапазоні режимів роботи двигуна. На відміну від відхідних газів, параметри яких суттєво змінюються при зниженні навантаження, теплота системи охолодження має більш рівномірний характер, що створює передумови для стабільнішої роботи систем утилізації в умовах зниженого навантаження.

Разом з тим, впровадження систем утилізації низькопотенційної теплоти пов'язане з рядом технічних обмежень, зокрема необхідністю збільшення площ теплообміну, використання ефективних робочих тіл, а також забезпечення ефективної інтеграції таких систем у загальну структуру суднової енергетичної установки. Це обумовлює необхідність комплексного підходу до проектування теплоутилізаційних систем.

Таким чином, використання низькопотенційних джерел теплоти є перспективним напрямом підвищення енергоефективності суднових енергетичних установок, особливо в умовах змінних режимів експлуатації. Найбільш доцільним підходом є їх комбіноване використання разом із високотемпературними джерелами, що дозволяє забезпечити більш повне використання енергетичного потенціалу двигуна.

Перспективи розвитку технологій утилізації теплоти в суднових енергетичних установках

Аналіз сучасних досліджень та технологічних рішень у сфері утилізації теплоти свідчить про поступову зміну підходів до підвищення енергоефективності суднових енергетичних установок. Якщо раніше основна увага приділялася використанню високотемпературної теплоти вихлопних газів, то сучасні умови експлуатації суден, зокрема режим зниженого навантаження, обумовлюють необхідність переходу до більш гнучких та комплексних систем.

Одним із ключових напрямів розвитку є впровадження багатоджерельних систем утилізації теплоти, які дозволяють одночасно використовувати кілька теплових потоків різного температурного рівня. Такий підхід забезпечує більш повне використання енергетичного потенціалу двигуна та підвищує стабільність роботи системи в умовах змінних навантажень [9].

Концептуальна архітектура інтегрованої енергосистеми на рис. 5 відображає синергію багатоджерельного модуля утилізації з електричними накопичувачами (ESS). Така інтеграція під управлінням інтелектуальної системи дозволяє ефективно розподіляти утилізовану енергію для покриття пікових навантажень судна.

Важливою тенденцією є також розвиток технологій, орієнтованих на ефективне використання низькопотенційної теплоти. Це включає вдосконалення

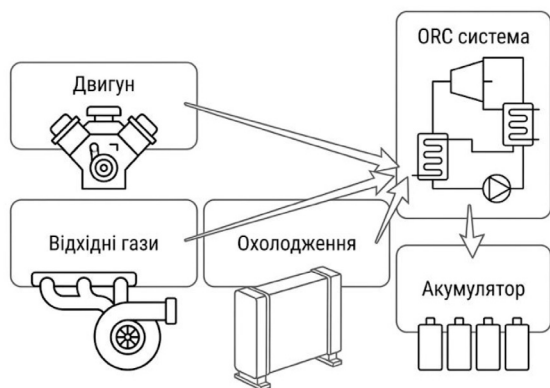


Рис. 5. Концептуальна схема багатоджерельної / гібридної системи.

Джерело: розроблено автором за даними [9]

систем на основі органічного циклу Ренкіна (ORC), зокрема за рахунок підбору оптимальних робочих тіл, а також розробку альтернативних термодинамічних циклів, здатних працювати в умовах низьких температур. У подальшому саме цей напрям може стати ключовим для підвищення ефективності суднових енергетичних установок у реальних експлуатаційних режимах [10].

Крім того, перспективним є розвиток комбінованих термодинамічних схем, що поєднують кілька циклів у межах однієї системи. Такі рішення дозволяють ефективніше використовувати теплоту різного температурного рівня, однак потребують подальшого дослідження з точки зору оптимізації конструкції, підвищення надійності та зниження складності експлуатації [12].

Окремим напрямом розвитку є інтеграція систем утилізації теплоти у гібридні суднові енергетичні установки. У таких системах теплова енергія розглядається як складова інтегрованого енергетичного контуру, що взаємодіє з електричними накопичувачами енергії, системами управління енергоспоживанням та альтернативними джерелами енергії. Це дозволяє не лише підвищити ефективність використання енергії, але й забезпечити більш гнучке управління енергетичними потоками на судні [13].

Водночас подальші дослідження мають бути спрямовані на врахування реальних умов експлуатації суден, зокрема змінних режимів роботи двигунів, характерних для контейнеровозів. Це включає необхідність розробки адаптивних систем утилізації теплоти, здатних ефективно працювати в широкому діапазоні навантажень та температурних режимів.

Таким чином, перспективи розвитку технологій утилізації теплоти пов'язані з переходом до інтегрованих, багатоджерельних та адаптивних систем, які враховують специфіку експлуатації сучасного флоту та забезпечують максимальне використання доступних енергетичних ресурсів.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного аналізу сучасних технологій утилізації теплоти в суднових енергетичних установках контейнеровозів встановлено наступне:

1. Визначено, що суднові дизельні двигуни характеризуються значними тепловими втратами, сумарний обсяг яких може досягати 40...50 % від енергії палива, що обумовлює високий потенціал для підвищення енергоефективності за рахунок їх утилізації.

2. Встановлено, що найбільш поширеними технологіями утилізації теплоти є системи, орієнтовані на використання високотемпературної теплоти відхідних газів, зокрема парові установки та системи на основі органічного циклу Ренкіна (ORC), які демонструють високу ефективність у номінальних режимах роботи двигуна.

3. Показано, що ефективність традиційних систем утилізації теплоти суттєво залежить від режиму роботи двигуна та знижується при експлуатації в умовах часткових навантажень, характерних для режиму зниженого навантаження, що є типовим для сучасних контейнеровозів.

4. Встановлено, що в умовах зниження температурного потенціалу відхідних газів зростає відносна значущість низькопотенційних джерел теплоти, зокрема теплоти систем охолодження, масляних систем та повітряних потоків.

5. Визначено, що використання низькопотенційної теплоти окремо є обмеженим за ефективністю, однак її комбіноване використання разом із високотемпературними джерелами дозволяє підвищити загальну ефективність суднових енергетичних установок.

6. Встановлено, що найбільш перспективним напрямом розвитку є впровадження багатоджерельних систем утилізації теплоти, а також інтеграція теплоутилізаційних систем у гібридні суднові енергетичні установки.

7. Обґрунтовано, що подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку адаптивних систем утилізації теплоти, які враховують змінні режими роботи суднових двигунів та забезпечують ефективне використання як високотемпературних, так і низькопотенційних джерел енергії.

REFERENCES

- [1] IMO (2023) 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. Available at: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/2023-imo-strategy-on-reduction-of-ghg-emissions-from-ships.aspx>
- [2] IMO (2023) EEXI and CII – Frequently Asked Questions. Available at: <https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/eexi-cii-faq.aspx>
- [3] A review of waste heat recovery technologies for maritime applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119308196>
- [4] A review of waste heat recovery technologies for maritime applications. Available at: https://www.researchgate.net/publication/290220776_A_review_of_waste_heat_recovery_technologies_for_maritime_applications
- [5] Recent advances in marine waste heat recovery systems. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277278312300033X>
- [6] Larsen, U., Pierobon, L., Haglind, F., Gabriell, C. (2018) Design and optimisation of organic Rankine cycles for waste heat recovery in marine applications. Available at: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/148642914/1_s2.0_S136403211830162X_main.pdf
- [7] Shu, G., Liang, Y., Wei, H., Tian, H., & Zhao, J. (2013). A review of waste heat recovery on two-stroke IC engine aboard ships. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 5(3), 385–401. DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0141
- [8] Lion, S., Vlaskos, I., Taccani, R. (2019) A review of waste heat recovery technologies for maritime applications. Available at: https://arts.units.it/retrieve/e2913fde-bfa5-f688-e053-3705fe0a67e0/2980357_Lion_et_al_ORC_2019-PostPrint.pdf
- [9] Multi-source waste heat recovery system for marine engines. *Journal of Marine Science and Engineering*. Available at: <https://www.mdpi.com/2077-1312/13/9/1679>
- [10] Performance analysis of ORC systems for low-temperature heat sources. *Energy*. Available at: <https://ideas.repec.org/a/eee/energy/v228y2021ics0360544221008458.html>
- [11] Mitsubishi Heavy Industries (2020) Waste Heat Recovery System for Marine Engines. Available at: <https://www.mhi.com/technology/review/sites/g/files/jwhtju2326/files/tr/pdf/e524/e524053.pdf>
- [12] Zhang, et al. (2020) Combined cycle systems for marine waste heat recovery. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11630-020-1351-x>
- [13] Hybrid energy systems with waste heat recovery. *International Journal of Hydrogen Energy*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319922054519>
- [14] Advanced energy systems integration for marine applications. *Energies*. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/2/288>
- [15] MSC Mediterranean Shipping Company (2023). MSC Tessa: Technical Specifications and Innovations in Sustainability. Official Fleet Overview. Available at: <https://www.msc.com/en/newsroom/press-releases/2023/march/msc-takes-delivery-of-msc-tessa-the-worlds-first-24116-teu-vessel>
- [16] CMA CGM Group (2020). CMA CGM Jacques Saadé: The World's First LNG-Powered Ultra Large Container Vessel. Technical Review. Available at: <https://www.cma-cgm.com/news/3241/the-cma-cgm-jacques-saade-the-world-s-first-lng-powered-23-000-teu-containership-is-ready-to-join-the-group-s-fleet>
- [17] Maersk (2024). Ane Maersk: The Era of Methanol-Enabled Container Shipping. Technical Data Sheet. Available at: <https://www.maersk.com/news/articles/2024/01/26/maersk-presents-ane-maersk>
- [18] MAN Energy Solutions (2023). Two-Stroke Engines for Methanol and LNG Propulsion: Technical Documentation for G95 and X92 series. Available at: <https://www.man-es.com/marine/products/two-stroke-engines>
- [19] DNV (2024). Maritime Forecast to 2050: Energy Transition and New Fuel Technologies for Container Fleet. Available at: <https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast-2050/>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] IMO (2023) 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. URL: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/2023-imo-strategy-on-reduction-of-ghg-emissions-from-ships.aspx>
- [2] IMO (2023) EEXI and CII – Frequently Asked Questions. URL: <https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/eexi-cii-faq.aspx>
- [3] A review of waste heat recovery technologies for maritime applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119308196>
- [4] A review of waste heat recovery technologies for maritime applications. URL: https://www.researchgate.net/publication/290220776_A_review_of_waste_heat_recovery_technologies_for_maritime_applications
- [5] Recent advances in marine waste heat recovery systems. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277278312300033X>
- [6] Larsen, U., Pierobon, L., Haglind, F., Gabriell, C. (2018) Design and optimisation of organic Rankine cycles for waste heat recovery in marine applications. URL: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/148642914/1_s2.0_S136403211830162X_main.pdf
- [7] Shu, G., Liang, Y., Wei, H., Tian, H., & Zhao, J. (2013). A review of waste heat recovery on two-stroke IC engine aboard ships. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 5(3), 385–401. DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0141

- [8] Lion, S., Vlaskos, I., Taccani, R. (2019) A review of waste heat recovery technologies for maritime applications. URL: https://arts.units.it/retrieve/e2913fde-bfa5-f688-c053-3705fe0a67e0/2980357_Lion_et_al_ORC_2019-PostPrint.pdf
- [9] Multi-source waste heat recovery system for marine engines. Journal of Marine Science and Engineering. URL: <https://www.mdpi.com/2077-1312/13/9/1679>
- [10] Performance analysis of ORC systems for low-temperature heat sources. Energy. URL: <https://ideas.repec.org/a/eee/energy/v228y2021ics0360544221008458.html>
- [11] Mitsubishi Heavy Industries (2020) Waste Heat Recovery System for Marine Engines. URL: <https://www.mhi.com/technology/review/sites/g/files/jwhtju2326/files/tr/pdf/e524/e524053.pdf>
- [12] Zhang, et al. (2020) Combined cycle systems for marine waste heat recovery. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11630-020-1351-x>
- [13] Hybridenergysystems with waste heat recovery. International Journal of Hydrogen Energy. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319922054519>
- [14] Advanced energy systems integration for marine applications. Energies. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/2/288>
- [15] MSC Mediterranean Shipping Company (2023). MSC Tessa: Technical Specifications and Innovations in Sustainability. Official Fleet Overview. URL: <https://www.msc.com/en/newsroom/press-releases/2023/march/msc-takes-delivery-of-msc-tessa-the-worlds-first-24116-teu-vessel>
- [16] CMA CGM Group (2020). CMA CGM Jacques Saadé: The World's First LNG-Powered Ultra Large Container Vessel. Technical Review. URL: <https://www.cma-cgm.com/news/3241/the-cma-cgm-jacques-saade-the-world-s-first-lng-powered-23-000-teu-containership-is-ready-to-join-the-group-s-fleet>
- [17] Maersk (2024). Ane Maersk: The Era of Methanol-Enabled Container Shipping. Technical Data Sheet. URL: <https://www.maersk.com/news/articles/2024/01/26/maersk-presents-ane-maersk>
- [18] MAN Energy Solutions (2023). Two-Stroke Engines for Methanol and LNG Propulsion: Technical Documentation for G95 and X92 series. URL: <https://www.man-es.com/marine/products/two-stroke-engines>
- [19] DNV (2024). Maritime Forecast to 2050: Energy Transition and New Fuel Technologies for Container Fleet. URL: <https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast-2050/>

© Рязанцев П. А.

Дата першого надходження статті до видання: 24.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)