

УДК 629.5.067.6:504.05:621.1

DOI: 10.31498/2225-6733.50.2025.336423

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

Гончарук І.П.

канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5306-4206>, e-mail: h.onmu@ukr.net

В умовах глобального потепління та активізації кліматичної політики питання енергетичної та екологічної безпеки водного транспорту набуває особливої актуальності. Міжнародна морська організація встановила амбітну мету – досягнення нульових чистих викидів парникових газів до 2050 року, що вимагає кардинального переосмислення підходів до енерговикористання на морських судах. У зв'язку з цим впровадження інноваційних технологій утилізації відпрацьованого тепла розглядається як ключовий інструмент підвищення енергоефективності суден та зниження негативного впливу на навколишнє середовище. У статті подано систематизований аналіз сучасних інженерних рішень з утилізації теплоти, яка втрачається в процесі експлуатації суднових енергетичних установок. Розглянуто принципи роботи та ефективність таких технологій, як органічний цикл Ренкіна (ORC), цикл Каліни, турбокомпаундні системи, а також термоелектричні генератори. Проаналізовано технічні параметри, енергетичну продуктивність, екологічні переваги та економічну доцільність впровадження в умовах реального судноплавства. Результати дослідження показують, що впровадження технологій утилізації відпрацьованого тепла дає змогу досягти економії палива на рівні 3-7% і суттєво знизити викиди CO₂, NO_x, SO_x. Найбільш ефективними виявилися системи ORC, які мають високу адаптивність до різних температурних джерел тепла на борту судна. Водночас технології турбокомпаундування, зокрема у поєднанні з паровими інжекційними модулями, продемонстрували перспективність за умов модернізації дизельних двигунів великої потужності. Досліджено також ризики, пов'язані з безпекою, просторовими обмеженнями на борту та особливостями обслуговування систем. На основі огляду наукової літератури, міжнародних стандартів та результатів моделювання, у роботі визначено ключові критерії вибору технологій утилізації відпрацьованого тепла для конкретних типів суден і сценаріїв експлуатації. Сформульовано рекомендації щодо проектування енергоефективних енергетичних систем суден та обґрунтовано необхідність розвитку гібридних систем, що поєднують переваги ORC, циклу Каліни та новітніх термоелектричних рішень. Узагальнено перспективи подальших досліджень і розглянуто можливості інтеграції технологій утилізації відпрацьованого тепла у стратегічне планування енергетичної модернізації флоту на шляху до декарбонізації морського транспорту.

Ключові слова: енергетична безпека, екологічна безпека, енергетична ефективність, утилізація відпрацьованого тепла, морський транспорт, органічний цикл Ренкіна, турбокомпаундна система, цикл Каліни.

Постановка проблеми

Сучасне морське судноплавство перебуває на перехресті технологічних, екологічних та нормативних викликів. На тлі зростаючих вимог Міжнародної морської організації (ІМО) щодо зниження викидів парникових газів і покращення енергоефективності суден, впровадження інноваційних технологій стало ключовим інструментом забезпечення енергетичної та екологічної безпеки морського транспорту. За результатами третього дослідження ІМО щодо парникових газів, морські судна відповідають приблизно за 2,8% глобальних викидів парникових газів, водночас генеруючи значні обсяги втраченої теплоти внаслідок низької ефективності двигунів внутрішнього згорання.

Метою цієї оглядової статті є систематизація сучасних технічних рішень і технологій, спрямованих на підвищення рівня енергетичної та екологічної безпеки суден. У статті розглядаються технічні характеристики, ефективність та практична доцільність впровадження різних систем з урахуванням специфіки морської експлуатації. Особливу увагу приділено відповідності сучасних технологій вимогам нормативної бази ІМО, потенціалу зменшення викидів CO₂, SO_x і NO_x, підвищенню енергоефективності суден, а також забезпеченню відповідності довгостроковим цілям у межах

декарбонізації міжнародного судноплавства. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати нормативно-правові вимоги Міжнародної морської організації щодо скорочення викидів парникових газів та підвищення енергоефективності морського транспорту;
- описати та класифікувати сучасні технології систем утилізації відпрацьованого тепла (СУВТ), зокрема на основі органічного циклу Ренкіна (ОЦР), циклу Каліни, турбокомпаундних систем тощо;
- розглянути практичні приклади впровадження систем енергозбереження на судах, включаючи результати експериментальних або симуляційних досліджень;
- оцінити переваги та обмеження основних технологічних рішень, зокрема з погляду паливної економічності, зменшення викидів CO₂, NO_x, SO_x, а також експлуатаційної надійності;
- визначити фактори, що впливають на вибір оптимальної технології з урахуванням типу судна, умов експлуатації, економічної доцільності та безпеки;
- узагальнити тенденції та перспективи розвитку систем підвищення енергетичної та екологічної безпеки суден, враховуючи вимоги щодо декарбонізації морського транспорту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У відповідь на загрозу зміни клімату ІМО затвердила оновлену Стратегію зі скорочення викидів парникових газів із суден 2023 року (резолюція МЕРС.377(80)), яка передбачає досягнення нульових чистих викидів до або близько 2050 року, а також встановлює проміжні цілі: скорочення викидів на 20-30% до 2030 року та на 70-80% до 2040 року (відносно рівня 2008 року). Паралельно, з 2023 року набули чинності технічні та експлуатаційні заходи, зокрема Індекс енергоефективності для існуючих суден (ЕЕХІ) та Індикатор інтенсивності викидів вуглецю (СІ) (МЕРС.328(76)), а також оновлені керівні принципи з Плану управління енергоефективністю судна (SEEMP) (МЕРС.401(83)).

Одним із перспективних напрямів зменшення споживання палива й пов'язаних із ним викидів є впровадження систем утилізації відпрацьованого тепла. Такі системи дозволяють перетворювати теплову енергію, втрачану з вихлопними газами, охолоджувальною водою та іншими потоками, на корисну електричну або механічну енергію без додаткового споживання палива. Серед основних технологій – цикл Ренкіна (у тому числі органічні та надкритичні), цикл Каліни, термоелектричні генератори [1], а також турбокомпаундні системи, які реалізуються як у вигляді автономних рішень [2], так і в комбінованих конфігураціях [3].

Таким чином, стаття пропонує комплексний огляд сучасних технологій утилізації відпрацьованого тепла як одного з ключових інструментів підвищення енергоефективності та екологічної безпеки морських суден у контексті виконання вимог ІМО. На основі аналізу наявних технічних рішень, зокрема органічного циклу Ренкіна, циклу Каліни, турбокомпаундних систем і термоелектричних генераторів, у роботі розглядаються їхні переваги, обмеження, умови ефективного впровадження, а також відповідність новим регуляторним нормам. Особливу увагу приділено оцінці енергетичного потенціалу різних джерел тепла на борту судна, аналізу конструктивної сумісності технологій із судовими енергетичними системами, а також економічній доцільності їх застосування. Представлений матеріал може бути використаний як методична основа для подальших досліджень, техніко-економічного обґрунтування рішень у суднобудуванні та розробки інноваційних стратегій модернізації флоту відповідно до цілей декарбонізації морського транспорту.

Мета статті

Мета статті – аналіз і систематизація сучасних технологій утилізації відпрацьованого тепла з метою підвищення енергетичної та екологічної безпеки суден відповідно до вимог декарбонізації морського транспорту.

Виклад основного матеріалу

Щоб задовольнити потреби в електроенергії для роботи, а також з огляду на їхню мобільність та розташування, більшість суден мають спеціальну бортову електростанцію, що зазвичай використовує дизельні двигуни, парові турбіни та газові турбіни. Ці системи спалюють викопне паливо для перетворення теплової енергії згоряння в механічну енергію, яка далі перетворюється в інші форми відповідно до потреб. Побічні продукти згоряння палива є основним джерелом викидів і, як наслідок, більшість судових викидів збільшується паралельно зі споживанням палива. Тому, щоб зменшити викиди, необхідно зменшити споживання палива від поточного рівня. Як один з варіантів досягнення цієї мети є шляхи покращення загальної ефективності силової установки.

Дизельний двигун на сьогоднішній день є найпоширенішим варіантом для виробництва енергії на широкому спектрі типів суден. З точки зору максимальної встановленої потужності всіх цивільних суден водотоннажністю понад 100 бруто-реєстрових тонн, 96% цієї енергії виробляється дизельними установками. Через відсутність альтернативних силових установок з аналогічною питомою потужністю, вартістю і паливною ефективністю, очікується, що дизельні двигуни не будуть замінені в осяжному періоді часу [4]. Сучасні великі дизельні двигуни ефективно використовують паливо приблизно на 50%, а решта теплової енергії палива втрачається в навколишнє середовище у вигляді відпрацьованого тепла [5]. Ефективна утилізація відпрацьованої теплової енергії може підвищити ефективність роботи станції та зменшити викиди, використовуючи спеціальні системи утилізації відпрацьованого тепла для виробництва електроенергії або використовуючи її для опалення. Для звичайного судна навантаження на опалення є незначним порівняно з наявним відпрацьованим теплом, що призводить до того, що значна частина теплової енергії залишається невикористаною. Допоміжна енергетична установка може утилізувати решту відпрацьованого тепла для виробництва механічної або електричної енергії, яка потім може подаватися на потреби судової енергосистеми, яка потім може задовольнити попит на силову установку та допоміжні послуги без додаткових витрат на паливо і з нульовим рівнем викидів CO₂. Компанія «MAN Diesel» [6] бачить можливість для досягнення загальної ефективності 60% для утилізованої енергії палива на бортовому дизелі, в той час як Baldi і Gabrielli [7] прогнозують, виходячи з ексергетичного аналізу, досяжна економія палива становить 4-16% для танкерів середньої дальності за рахунок використання СУВТ.

У представленому дослідженні проаналізовано найефективніші технології утилізації відпрацьованого тепла для морських застосувань, серед яких:

- цикл Ранкіна – традиційне рішення для середньотемпературних джерел тепла (вище 350°C), здатне підвищити ККД енергетичної установки на 2-4%;

- органічний цикл Ранкіна – ефективний при температурах 100–300°C, завдяки використанню органічних робочих тіл, забезпечує приріст ККД до 10%;

- суперкритичний цикл Ранкіна – дозволяє досягти ще більшого ефекту за рахунок зменшення втрат енергії при перетворенні теплоти в роботу;

- цикл Каліни – найбільш ефективне рішення для утилізації низькотемпературних джерел (нижче 200°C), з потенціалом підвищення ККД до 15%;

- турбокомпаундні системи – використовують енергію вихлопних газів, підвищуючи продуктивність двигуна без збільшення витрат пального;

- термоелектричні генератори – перспективна технологія з прямим перетворенням тепла в електрику, що не має рухомих частин і придатна для застосування в умовах обмеженого простору.

Методологія цього огляду ґрунтується на контент-аналізі наукової літератури, що стосується застосування органічного циклу Ранкіна та турбокомпаундних систем як систем утилізації відпрацьованого тепла на морських судах. Для досягнення мети дослідження було здійснено систематизований аналіз публікацій, що охоплюють техніко-економічні, енергетичні та екологічні аспекти впровадження таких систем у морській енергетиці.

Пошук релевантної літератури здійснювався у наукових базах даних Scopus, Web of Science, Elsevier ScienceDirect, Taylor & Francis, SpringerLink та інших відкритих джерелах. Пошук за ключовими словами: «відпрацьоване тепло» або «теплова енергія», або «рекуперація тепла», або «рекуперація енергії»; «корабель» або «судно», або «морський», або «човен»; «двигун» або «мотор», або «рушій», або «енергетична установка»; «ефективність» або «продуктивність», або «оптимізація», або «утилізація»; «система» або «технологія», або «метод», або «процес». До аналізу включались лише ті дослідження, які відповідали таким критеріям: публікація у рецензованих наукових журналах; наявність технічного або термодинамічного моделювання ОЦР або турбокомпаундної системи для суднових дизельних двигунів; оцінка енергоефективності, викидів або паливної економічності; обґрунтування вибору робочих тіл або конфігурації циклу; аналіз практичної придатності до суднових умов експлуатації.

Було відібрано понад 20 ключових джерел, з яких 6 присвячені моделюванню ОЦР-систем [8-13], а інші розкривають технічну реалізацію та ефективність турбокомпаундування, зокрема із впорскуванням пари [14, 15]. Також було враховано праці, що аналізують комбіновані цикли [16] та системи з використанням енергії хвиль і відновлюваних джерел [17].

Кожне дослідження було проаналізоване з точки зору:

- потенціалу зниження витрати палива;
- величини підвищення загальної термічної ефективності;
- зменшення викидів CO₂ та інших шкідливих речовин;
- рівня складності впровадження на судах (нове будівництво або модернізація);
- економічної доцільності (період окупності).

На рисунку 1 представлено тематичну мапу, згенеровану на основі наукової аналітики бази даних Scopus, яка відображає основні напрями досліджень, пов'язаних із технологіями утилізації відпрацьованого тепла в морських двигунах (Технологія утилізації відпрацьованого тепла) в суднових двигунах. Дана структура візуалізує міждисциплінарну взаємодію чотирьох ключових доменів: практичні приклади впровадження (Кейс-стаді), підвищення ефективності (Підвищення ефективності), екологічні аспекти (Вплив на навколишнє середовище) та технологічні рішення (Технології). У межах кожного з напрямів відокремлені найбільш актуальні під тематики. Зокрема: (Чиста вихідна потужність) і (Техніко-економічне обґрунтування) ілюструють прикладні дослідження ефективності реальних систем; (Ексергетична ефективність) та (Використання енергії) стосуються оцінки використання енергії з точки зору термодинаміки; (Скорочення викидів CO₂ – NO_x) і (Забруднення води) представляють вплив СУВТ на довкілля; (Термоелектричне обладнання) та (Органічний цикл Ранкіна) позначають провідні технічні рішення.

Для оцінки ефективності та практичної придатності ОЦР-систем також враховувались типові джерела тепла на судах: вихлопні гази, система охолодження, маслоохолоджувачі та повітря з ресивера наддуву. Застосовувалися порівняльні підходи до оцінки ОЦР проти традиційних парових циклів у різних температурних діапазонах. Особливу увагу було приділено питанням безпеки (займистість робочих тіл), просторовим обмеженням суднових енергетичних установок і відповідності сучасним вимогам ІМО щодо скорочення викидів (MARPOL Annex VI, резолюції МЕРС.328(76), МЕРС.377(80)).

Таким чином, отримані дані дозволяють сформувати комплексне уявлення про технологічну ефективність, екологічні переваги та бар'єри впровадження ОЦР – і турбокомпаундних СУВТ як складових стратегії підвищення енергетичної та екологічної безпеки суден.

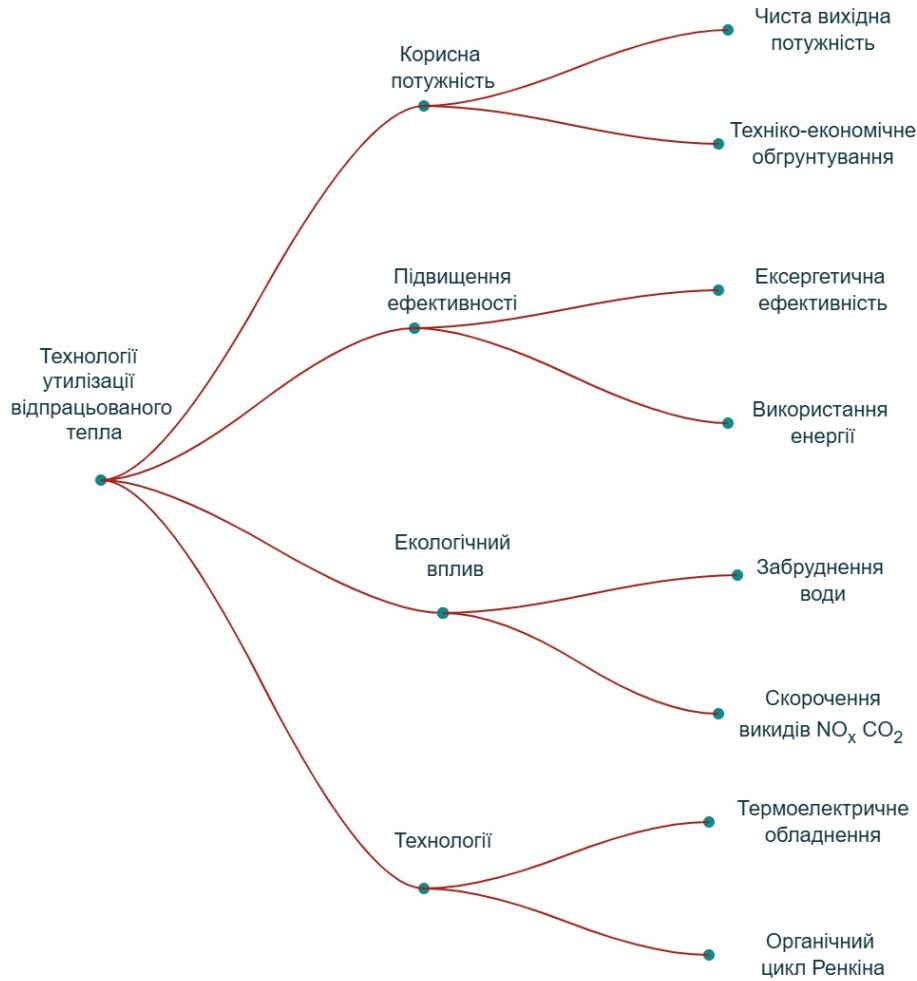


Рис. 1 – Семантична структура ключових напрямів досліджень у сфері утилізації відпрацьованого тепла в суднових енергетичних установках

Аналіз досліджень, присвячених застосуванню органічного циклу Ренкіна як системи утилізації відпрацьованого тепла на морських судах, показав наступне.

У дослідженні [18] розглядається робота ОЦР в умовах змінного навантаження морського дизельного двигуна. Автори демонструють, що впровадження ОЦР дозволяє підвищити загальну теплову ефективність на понад 6% і згенерувати електричну потужність, еквівалентну 4% механічної потужності двигуна. Перевагою є аналіз кількох джерел тепла – від вихлопних газів до охолоджуючої води. Однак стаття не містить глибокого аналізу економічної доцільності та не розглядає питання довготривалої надійності системи в умовах морської експлуатації. Автори у дослідженні [8] подають детальний термодинамічний аналіз ОЦР для суднових дизельних двигунів. Він демонструє ефективність роботи ОЦР у межах різних експлуатаційних режимів. Перевагою є глибоке моделювання й аналіз параметрів продуктивності. Недоліком є відсутність ексергетичного та економічного аналізу, а також

обмежений розгляд екологічних характеристик робочих рідин. У роботі [11] проведено порівняльне дослідження ефективності органічних рідин і води для циклу Ренкіна. Результати підтверджують перевагу ОЦР у використанні низькотемпературних джерел тепла. Автори дослідили теплову відповідність і екологічну безпеку різних робочих тіл. Проте, аналіз не включає дані з практичної реалізації системи на судні та не повністю враховує ризики токсичності й займистості органічних рідин. Стаття [9] вирізняється використанням розширеного ексергетичного аналізу ОЦР для морської електростанції. Ідентифіковано основні джерела втрат енергії в системі, що дозволяє пропонувати конкретні інженерні рішення щодо її оптимізації. Проте, робота є суто теоретичною, без експериментальної або техніко-економічної валідації результатів. У статті [16] авторами запропоновано комбіновану систему, що поєднує паровий цикл Ренкіна зі схемою ОЦР, що дозволяє ефективніше використовувати енергію різних температурних рівнів. Дослідження демонструє значне підвищення загальної ефективності системи утилізації.

Однак така система ускладнює конструкцію, потребує складного керування та не включає детальний аналіз надійності чи обслуговування. У дослідженні [10] виконано тепловий розрахунок ОЦР для великого нафтового танкера з використанням тепла головного двигуна та насосів для нафти. Представлена модель добре масштабована і демонструє придатність для великотоннажних суден. Однак не розглянуто інтеграцію системи з енергетичною архітектурою судна, а також є технічні обмеження, пов'язані з теплоізоляцією та розміщенням обладнання. У статті [11] представлено порівняльне дослідження ефективності органічних рідин і води як робочих тіл у циклі Ренкіна для утилізації відпрацьованого тепла на судах. Автори встановили, що ОЦР має кращу ефективність при низькотемпературних джерелах тепла, ніж традиційний паровий цикл. Також розглянуто екологічні аспекти застосування різних робочих рідин. Проте дослідження є переважно теоретичним, без апробації на реальних судових енергетичних установках. Обмежено розглянуто ризики, пов'язані з токсичністю і займистістю органічних рідин. У роботі [18] проведено термодинамічне моделювання ОЦР-системи при різних режимах роботи морського дизельного двигуна. Виявлено, що впровадження ОЦР дозволяє підвищити загальну теплову ефективність до 6% та зменшити викиди CO₂ приблизно на 6,9%. Дослідження охоплює використання кількох джерел тепла, включаючи вихлопні гази, сорочку охолодження та маслоохолоджувач. Проте відсутній докладний економічний аналіз, а також оцінка практичних аспектів інтеграції такої системи на судні. В огляді [19] авторами систематизовано результати понад 100 наукових праць, присвячених застосуванню ОЦР у морських умовах. Представлено типові архітектури систем, оцінено ефективність перетворення енергії, вибір робочих тіл і основні джерела тепла. Також розглянуто практичні приклади впровадження та демонстраційні проекти. Проте огляд не містить глибокого порівняльного аналізу з альтернативними циклами (наприклад, цикл Каліни) та не дає повної оцінки економічної доцільності в морських умовах. У статті [12] авторами проаналізовано транскритичну конфігурацію органічного циклу Ренкіна для утилізації тепла судового дизельного двигуна. Було проведено термодинамічну оптимізацію параметрів циклу, що дозволило досягти більшої ефективності у порівнянні з традиційною ОЦР-системою. Автори акцентують увагу на екологічних перевагах, включаючи зниження шкідливих викидів. Водночас запропонована система має складну архітектуру та вимагає точного керування, що може ускладнити її інтеграцію в стандартні судові енергосистеми. У дослідженні [13] застосовано методи байєсівської оптимізації для вибору найефективніших робочих тіл для ОЦР-системи, з урахуванням параметрів конкретного судового двигуна. Результати показують, що такий підхід дозволяє підвищити ефективність та адаптивність системи до умов реальної експлуатації. Проте запропонована методика вимагає високого рівня

обчислювальної підтримки, а результати ще потребують валідації у вигляді практичного впровадження на судах.

Аналіз досліджень, присвячених турбокомпаундним системам як засобу утилізації відпрацьованого тепла на морських судах. У дослідженні [14] представлено енергетичний та ексергетичний аналіз нової пароінжекційної турбокомпаундної системи (Турбокомпресування з впорскуванням пари – ТВП), застосованої на двотактному судовому дизельному двигуні. Система дозволяє зменшити витрати палива на 5,1% у порівнянні з традиційним турбокомпаундуванням. Також виявлено, що поєднання впорскування пари з турбіною покращує відбір енергії з вихлопних газів. Однак у дослідженні не розглянуто аспекти інтеграції системи на реальному судні, а також не проаналізовано вплив змінних навантажень двигуна на стабільність роботи ТВП-системи. В роботі [15] авторами проведено порівняння термодинамічної ефективності та техніко-економічних характеристик пароінжекційної турбокомпаундної системи з традиційною паровою системою Ренкіна. ТВП-система виявилась більш ефективною при менших витратах інвестицій і коротшому періоді окупності (4,7 року), забезпечуючи економію палива до 5,2%. Проте дослідження не включає оцінки довготривалої надійності системи в реальних умовах морської експлуатації, а також не враховує обмежень простору та ваги на судні. У статті [17] розглянуто загальний підхід до утилізації відпрацьованого тепла головного судового двигуна. Описано потенційні джерела тепла та варіанти їх використання, зокрема через турбіну або допоміжні генератори. Автори підкреслюють можливість підвищення паливної економічності та зменшення шкідливих викидів. Проте робота є оглядовою і не містить кількісного аналізу чи математичного моделювання. Відсутні конкретні дані щодо конфігурації або ефективності турбокомпаундних систем у порівнянні з альтернативними технологіями. У дослідженні [20] виконано техніко-економічний і екологічний аналіз парових систем рекуперації тепла для суден далекого плавання з урахуванням реальних профілів експлуатації. Хоча основна увага приділена паровим системам, автори надають загальну оцінку ефективності різних типів утилізації, включаючи турбокомпаундування [21]. Перевагою є врахування змінних режимів судової роботи, що наближає результати до практичних умов. Однак дослідження не деталізує конкретні аспекти роботи турбокомпаундних систем і не проводить прямого порівняння між ТВП, ОЦР та іншими технологіями.

Турбокомпаундні системи, особливо модифіковані за технологією ТВП, мають значний потенціал зменшення витрат палива (до 5,2%) при порівняно невеликих інвестиційних витратах [22]. Водночас головними обмеженнями залишаються складність інтеграції, недослідженість довготривалої експлуатаційної надійності та недостатня кількість практичних кейсів у морській галузі [23].

Усі дослідження підтверджують перспективність використання ОЦР як системи утилізації відпрацьованого тепла для морських двигунів. Найбільш розвинені роботи містять або глибокий термодинамічний аналіз, або інноваційні конструктивні підходи [24]. Основні обмеження – це відсутність експериментальних даних, практичного аналізу інтеграції з судновими системами та економічної оцінки життєвого циклу.

Рисунок 2 ілюструє логічну структуру аналізу ефективності систем утилізації відпрацьованого тепла у морських енергетичних установках, охоплюючи як технічні, так і екологічні аспекти. У центрі моделі розміщено базову категорію – «Утилізація відпрацьованого тепла», яка розгалужується на три ключові напрями:

1. Кейс-стаді – включає аналіз реальних прикладів впровадження з акцентом на генерування потужностей;

2. Підвищення ефективності – охоплює покращення енергетичних показників із фокусом на екологічний вплив;

3. Ексергетичний ККД – спрямований на оцінку використання енергії з точки зору ексергії.

Екологічний вплив виступає центральним інтегруючим елементом і має два піднапрями:

1. Забруднення водного середовища, що на пряму пов’язане з зменшенням викидів CO₂ і NO_x;

2. Термоелектричне обладнання, як сучасне технологічне рішення, що включає органічний цикл Ренкіна як одну з найбільш перспективних технологій СУВТ.

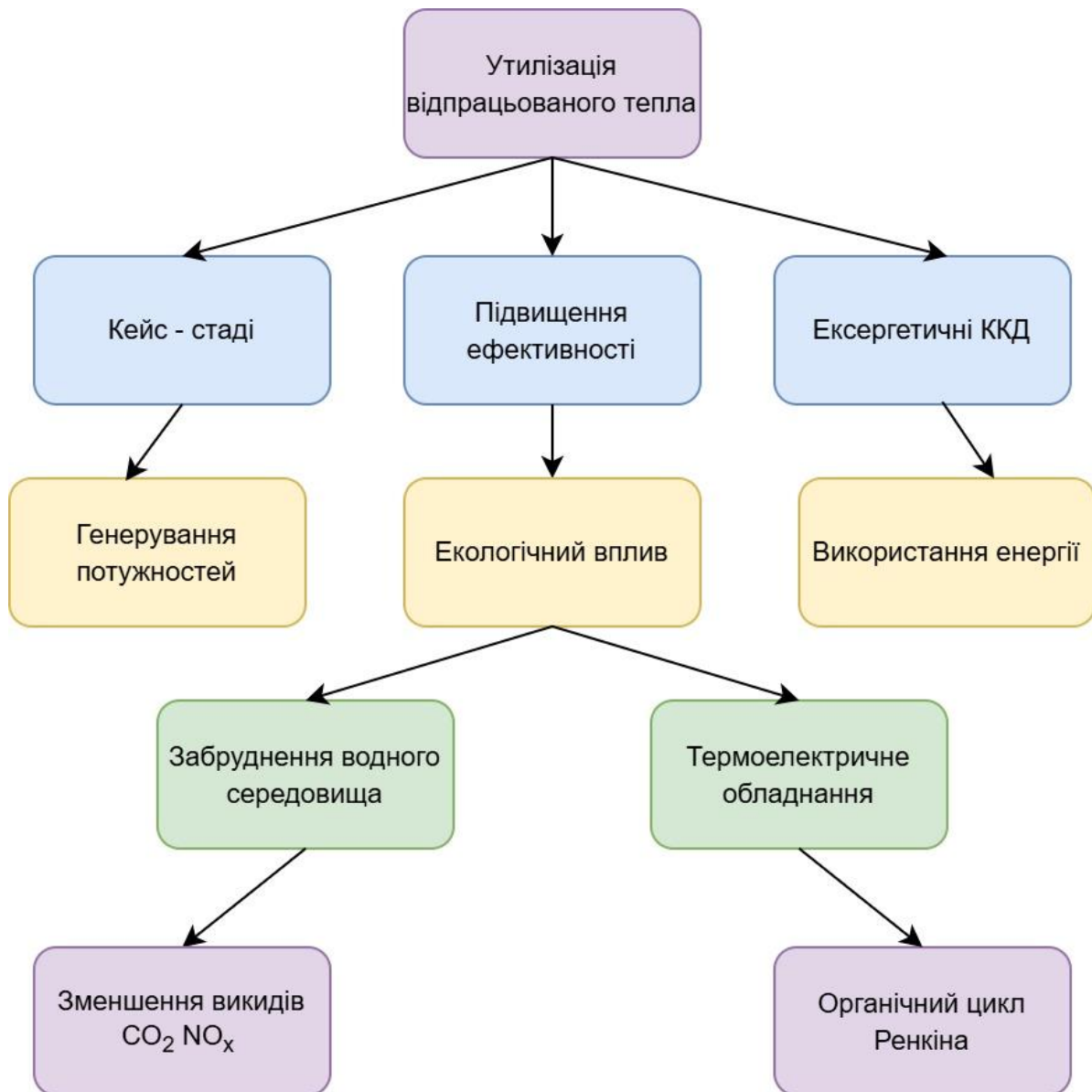


Рис. 2 – Концептуальна модель взаємозв’язку технічних і екологічних чинників у системах утилізації відпрацьованого тепла

Ця структура дозволяє візуально систематизувати взаємозв'язки між різними параметрами, що впливають на ефективність впровадження систем утилізації тепла, та є основою для прийняття інженерних рішень у рамках стратегії декарбонізації морського транспорту.

Висновки

У результаті проведеного дослідження встановлено, що міжнародна нормативна база, сформована ІМО, дедалі активніше спрямовується на досягнення цілей декарбонізації судноплавства. Зокрема, Стратегія ІМО 2023 року щодо скорочення викидів парникових газів передбачає досягнення нульових чистих викидів до 2050 року, що визначає вектор розвитку енергетичних технологій у морській галузі.

Класифікація та аналіз сучасних технологій СУВТ свідчать про високий потенціал систем на основі органічного циклу Ренкіна, циклу Каліни, а також турбокомпаундних систем. Ці рішення демонструють різну ефективність залежно від температурного діапазону джерел тепла, конструктивних особливостей судна та вимог до генерації енергії.

Розглянуті експериментальні й чисельні дослідження підтверджують, що впровадження СУВТ дозволяє досягти економії палива на рівні 3-7%, зменшити викиди CO₂, NO_x, SO_x, а також покращити загальну екологічну безпеку експлуатації суден. Найбільш вивченими та практично апробованими є ОЦР-системи, у той час як ТВП-модифікації турбокомпаундування потребують подальшої дослідної апробації.

Оптимальний вибір СУВТ залежить від таких факторів, як тип судна, характер маршруту, обсяг доступного тепла, економічна доцільність модернізації, просторові обмеження та вимоги до безпеки робочих тіл. Загальна тенденція свідчить про зростання уваги до гібридних та адаптивних рішень, здатних поєднувати ОЦР або цикл Каліни з іншими технологіями утилізації.

Таким чином, системи утилізації відпрацьованого тепла посідають провідне місце в реалізації стратегії підвищення енергетичної та екологічної безпеки флоту та становлять ключовий елемент декарбонізаційної трансформації морського транспорту.

Перелік використаних джерел

- [1] Features of optimization of maintenance plan for thermoelectric generators of marine propulsion systems / A. Golovan et al. *TRANSBALTICA XV: Transportation Science and Technology* : Proceedings of the 15th International Conference TRANSBALTICA, Vilnius, Lithuania, 19-20 September 2024. Pp. 26-35. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-85390-6_3.
- [2] Golovan A., Gritsuk I., Honcharuk I. Reliable ship emergency power source: A Monte Carlo simulation approach to optimize remaining capacity measurement frequency for Lead-Acid battery maintenance. *SAE International Journal of Electrified Vehicles*. 2023. Vol. 13(2). DOI: <https://doi.org/10.4271/14-13-02-0009>.
- [3] Enhancing Information Exchange in Ship Maintenance through Digital Twins and IoT: A Comprehensive Framework / A. Golovan et al. *Computers*. 2024. Vol. 13(10). Article 261. DOI: <https://doi.org/10.3390/computers13100261>.
- [4] Emissions from international shipping: 2. Impact of future technologies on scenarios until 2050 / Eyring V., Köhler H.W., Lauer A., Lemper B. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2005. Vol. 110, iss. D17. Article D17306. DOI: <https://doi.org/10.1029/2004JD005620>.
- [5] Thermo efficiency system for reduction of fuel consumption and CO₂. MAN Diesel and Turbo, 2014.
- [6] MAN Diesel and Turbo. Exhaust gas emission control today and tomorrow application on MAN B&W two-stroke marine diesel engines. Copenhagen, Denmark : MAN Diesel, 2008.
- [7] Baldi F., Gabrielli C. A feasibility analysis of waste heat recovery systems for marine applications. *Energy*. 2015. Vol. 80. Pp. 654-665. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.020>.
- [8] Thermodynamic analysis of the organic rankine cycle as a waste heat recovery system of marine diesel engine / Jin J., Lee H., Park G., Choi J. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*. 2012. Vol. 36(7). Pp. 711-719. DOI: <https://doi.org/10.3795/ksme-b.2012.36.7.711>.
- [9] Koroglu T. Advanced exergy analysis of an organic rankine cycle waste heat recovery system of a marine power plant. *Journal of Thermal Engineering*. 2017. Vol. 3(2). Pp. 1136-1148. DOI: <https://doi.org/10.18186/thermal.298614>.
- [10] Thermal design and analysis of an organic rankine cycle system utilizing the main engine and cargo oil pump turbine based waste heats in a large tanker ship / O. Konur et al. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 368. Article 133230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133230>.
- [11] De La Fuente S.S., Greig A.R. Making shipping greener: comparative study between organic fluids and water for Rankine cycle waste heat recovery. *Journal of Marine Engineering & Technology*. 2015. Vol. 14(2). Pp. 70-84. DOI: <https://doi.org/10.1080/20464177.2015.1077601>.
- [12] Akman M., Ergin S. Thermo-environmental analysis and performance optimisation of transcritical organic Rankine cycle system for waste heat recovery of a marine diesel engine. *Ships and Offshore Structures*. 2020. Vol. 16(10). Pp. 1104-1113. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445302.2020.1816744>.
- [13] Parametric study of organic Rankine working fluids via Bayesian optimization of a preference learning ranking for a waste heat recovery system applied to a case study marine engine / L.A. Diaz-Secades et al. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 306. Article 118124.

DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118124>.

- [14] Energy and exergy analysis of a novel steam injected turbocompounding system applied on the marine two-stroke diesel engine / Zhu S., Ma Z., Zhang K., Deng K. *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 221. Article 113207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113207>.
- [15] Thermodynamic and techno-economic comparisons of the steam injected turbocompounding system with conventional steam Rankine cycle systems in recovering waste heat from the marine two-stroke engine / Zhu S., Sun K., Bai S., Deng K. *Energy*. 2022. Vol. 245. Article 123245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123245>.
- [16] A novel waste heat recovery system combining steam Rankine cycle and organic Rankine cycle for marine engine / X. Liu et al. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 265. Article 121502. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121502>.
- [17] Zhemin J., Yuxin Y. Analysis of waste heat utilization of ship main engine. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 165. Article 06027. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016506027>.
- [18] Akman M., Ergin S. An investigation of marine waste heat recovery system based on organic Rankine cycle under various engine operating conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2018. Vol. 233(2). Pp. 586-601. DOI: <https://doi.org/10.1177/1475090218770947>.
- [19] Konur O., Colpan C.O., Saatcioglu O.Y. A comprehensive review on organic Rankine cycle systems used as waste heat recovery technologies for marine applications. *Energy Sources Part a Recovery Utilization and Environmental Effects*. 2022. Vol. 44(2). Pp. 4083-4122. DOI: <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2072981>.
- [20] Waste heat recovery steam systems techno-economic and environmental investigation for ocean-going vessels considering actual operating profiles / Theotokatos G., Rentizelas A., Guan C., Ancic I. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 267. Article 121837. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121837>.
- [21] Improving the process of vehicle units diagnosis by applying harmonic analysis to the processing of discrete signals / A. Golovan et al. *SAE Technical Papers*. 2018-01-1774. 2018. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1774>.
- [22] Aspects of remote monitoring of the transport vessel under operating conditions / A. Golovan et al. *ICTE in Transportation and Logistics*. 2019. Pp. 295-301. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_37.
- [23] Aspects of forming the information V2I model of the transport vessel / A. Golovan et al. *IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 23-25 September 2019. Pp. 390-393. DOI: <https://doi.org/10.1109/mees.2019.8896595>.
- [24] Golovan A., Gritsuk I., Honcharuk I. Principles of transport means maintenance optimization: equipment cost calculation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. Vol. 5. Pp. 77-84. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-5/077>.

PERSPECTIVE DIRECTIONS FOR IMPROVING THE ENERGY AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF WATER TRANSPORT MEANS

Honcharuk I.P.

PhD (Engineering), associate professor, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5306-4206>, e-mail: h.onmu@ukr.net

In the context of global warming and the intensification of climate policy, the issue of energy and environmental safety of water transport is becoming particularly relevant. The International Maritime Organization has set an ambitious goal of achieving zero net greenhouse gas emissions by 2050, which requires a radical rethinking of approaches to energy use on ships. In this regard, the introduction of innovative waste heat utilization technologies is considered a key tool for improving the energy efficiency of ships and reducing the negative impact on the environment. The article presents a systematic analysis of modern engineering solutions for utilization of heat lost during the operation of ship power plants. The principles of operation and efficiency of such technologies as the organic Rankine cycle (ORC), the Kalina cycle, turbo-compound systems, and thermoelectric generators are considered. The technical parameters, energy productivity, environmental benefits and economic feasibility of implementation in real shipping conditions are analyzed. The results of the study show that the introduction of waste heat utilization technologies can achieve fuel savings of 3-7% and significantly reduce CO₂, NO_x, and SO_x emissions. ORC systems have proven to be the most effective, as they are highly adaptable to different temperature sources of heat on board. At the same time, turbo-compounding technologies, in particular in combination with steam injection modules, have shown promise in the modernization of high-power diesel engines. The risks associated with safety, space constraints on board, and system maintenance are also investigated. Based on a review of scientific literature, international standards, and modeling results, the paper identifies key criteria for selecting waste heat recovery technologies for specific types of ships and operating scenarios. Recommendations for the design of

energy-efficient ship energy systems are formulated and the need to develop hybrid systems that combine the advantages of ORC, the Kalina cycle, and the latest thermoelectric solutions is substantiated. The prospects for further research are summarized and the possibilities of integrating waste heat recovery technologies into the strategic planning of energy modernization of the fleet on the way to decarbonization of maritime transport are considered.

Keywords: energy security, environmental safety, energy efficiency, waste heat utilization, marine transport, WHRS systems, organic Rankine cycle, turbo-compound system, Kalina cycle.

References

- [1] A. Golovan, I. Gritsuk, I. Honcharuk, O. Volska, Y. Grytsuk, and V. Hritsuk, «Features of optimization of maintenance plan for thermoelectric generators of marine propulsion systems», in Proc. of the 15th Int. Conf. «TRANSBALTICA XV. Transportation Science and Technology, Vilnius, Lithuania, 2024, pp. 26-35. doi: [10.1007/978-3-031-85390-6_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-85390-6_3).
- [2] A. Golovan, I. Gritsuk, and I. Honcharuk, «Reliable ship emergency power source: A Monte Carlo simulation approach to optimize remaining capacity measurement frequency for Lead-Acid battery maintenance», *SAE International Journal of Electrified Vehicles*, vol. 13(2), 2023. doi: [10.4271/14-13-02-0009](https://doi.org/10.4271/14-13-02-0009).
- [3] A. Golovan et al., «Enhancing Information Exchange in Ship Maintenance through Digital Twins and IoT: A Comprehensive Framework», *Computers*, vol. 13(10), article 261, 2024. doi: [10.3390/computers13100261](https://doi.org/10.3390/computers13100261).
- [4] V. Eyring, H.W. Köhler, A. Lauer, and B. Lemper, «Emissions from international shipping: 2. Impact of future technologies on scenarios until 2050», *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 110, iss. D17, article D17306, 2005. doi: [10.1029/2004JD005620](https://doi.org/10.1029/2004JD005620).
- [5] *Thermo efficiency system for reduction of fuel consumption and CO₂*. MAN Diesel and Turbo, 2014.
- [6] *Exhaust gas emission control today and tomorrow application on MAN B&W two-stroke marine diesel engines*. Copenhagen, Denmark: MAN Diesel Publ., 2008.
- [7] F. Baldi, and C. Gabriellii, «A feasibility analysis of waste heat recovery systems for marine applications», *Energy*, vol. 80, pp. 654-665, 2015. doi: [10.1016/j.energy.2014.12.020](https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.020).
- [8] J. Jin, H. Lee, G. Park, and J. Choi, «Thermodynamic analysis of the organic rankine cycle as a waste heat recovery system of marine diesel engine», *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, vol. 36(7), pp. 711-719, 2012. doi: [10.3795/ksme-b.2012.36.7.711](https://doi.org/10.3795/ksme-b.2012.36.7.711).
- [9] T. Koroglu, «Advanced exergy analysis of an organic rankine cycle waste heat recovery system of a marine power plant», *Journal of Thermal Engineering*, vol. 3(2), pp. 1136-1148, 2017. doi: [10.18186/thermal.298614](https://doi.org/10.18186/thermal.298614).
- [10] O. Konur, O. Yuksel, S.A. Korkmaz, C.O. Colpan, O.Y. Saaticioglu, and I. Muslu, «Thermal design and analysis of an organic rankine cycle system utilizing the main engine and cargo oil pump turbine based waste heats in a large tanker ship», *Journal of Cleaner Production*, vol. 368, article 133230, 2022. doi: [10.1016/j.jclepro.2022.133230](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133230).
- [11] S.S. De La Fuente, and A.R. Greig, «Making shipping greener: comparative study between organic fluids and water for Rankine cycle waste heat recovery», *Journal of Marine Engineering & Technology*, vol. 14(2), pp. 70-84, 2015. doi: [10.1080/20464177.2015.1077601](https://doi.org/10.1080/20464177.2015.1077601).
- [12] M. Akman, and S. Ergin, «Thermo-environmental analysis and performance optimisation of transcritical organic Rankine cycle system for waste heat recovery of a marine diesel engine», *Ships and Offshore Structures*, vol. 16(10), pp. 1104-1113, 2020. doi: [10.1080/17445302.2020.1816744](https://doi.org/10.1080/17445302.2020.1816744).
- [13] L.A. Díaz-Secades, R. González, N. Rivera, J.R. Quevedo, and E. Montañés, «Parametric study of organic Rankine working fluids via Bayesian optimization of a preference learning ranking for a waste heat recovery system applied to a case study marine engine», *Ocean Engineering*, vol. 306, article 118124, 2024. doi: [10.1016/j.oceaneng.2024.118124](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118124).
- [14] S. Zhu, Z. Ma, K. Zhang, and K. Deng, «Energy and exergy analysis of a novel steam injected turbocompounding system applied on the marine two-stroke diesel engine», *Energy Conversion and Management*, vol. 221, article 113207, 2020. doi: [10.1016/j.enconman.2020.113207](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113207).
- [15] S. Zhu, K. Sun, S. Bai, and K. Deng, «Thermodynamic and techno-economic comparisons of the steam injected turbocompounding system with conventional steam Rankine cycle systems in recovering waste heat from the marine two-stroke engine», *Energy*, vol. 245, article 123245, 2022. doi: [10.1016/j.energy.2022.123245](https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123245).
- [16] X. Liu, M.Q. Nguyen, J. Chu, T. Lan, and M. He, «A novel waste heat recovery system combining steam Rankine cycle and organic Rankine cycle for marine engine», *Journal of Cleaner Production*, vol. 265, article 121502, 2020. doi: [10.1016/j.jclepro.2020.121502](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121502).
- [17] J. Zhemin, and Y. Yuxin, «Analysis of waste heat utilization of ship main engine», *E3S Web of Conferences*, vol. 165, article 06027, 2020. doi: [10.1051/e3sconf/202016506027](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016506027).
- [18] M. Akman, and S. Ergin, «An investigation of marine waste heat recovery system based on organic Rankine cycle under various engine operating conditions», in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, vol. 233(2), pp. 586-601, 2018. doi: [10.1177/1475090218770947](https://doi.org/10.1177/1475090218770947).

- [19] O. Konur, C.O. Colpan, and O.Y. Saatcioglu, «A comprehensive review on organic Rankine cycle systems used as waste heat recovery technologies for marine applications», *Energy Sources Part a Recovery Utilization and Environmental Effects*, vol. 44(2), pp. 4083-4122, 2022. doi: **10.1080/15567036.2022.2072981**.
- [20] G. Theotokatos, A. Rentizelas, C. Guan, and I. Ancic, «Waste heat recovery steam systems techno-economic and environmental investigation for ocean-going vessels considering actual operating profiles», *Journal of Cleaner Production*, vol. 267, article 121837, 2020. doi: **10.1016/j.jclepro.2020.121837**.
- [21] A. Golovan et al., «Improving the process of vehicle units diagnosis by applying harmonic analysis to the processing of discrete signals», *SAE Technical Papers*, 2018-01-1774, 2018. doi: **10.4271/2018-01-1774**.
- [22] A. Golovan, I. Gritsuk, M. Kurtsev, O. Ischuka, and R. Vrublevskiy, «Aspects of remote monitoring of the transport vessel under operating conditions», *ICTE in Transportation and Logistics*, pp. 295-301, 2019. doi: **10.1007/978-3-030-39688-6_37**.
- [23] A. Golovan, I. Gritsuk, S. Rudenko, V. Saravas, A. Shakhov, and O. Shumylo, «Aspects of forming the information V2I model of the transport vessel», in Proc. of the IEEE Int. Conf. on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, 2019, pp. 390-393. doi: **10.1109/mees.2019.8896595**.
- [24] A. Golovan, I. Gritsuk, and I. Honcharuk, «Principles of transport means maintenance optimization: equipment cost calculation», *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol. 5, pp. 77-84, 2023. doi: **10.33271/nvngu/2023-5/077**.

Стаття надійшла 23.04.2025

Стаття прийнята 07.05.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Гончарук І.П. Перспективні напрями підвищення енергетичної та екологічної безпеки засобів водного транспорту. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 254-263. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336423>.