

УДК 621.4
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.1\(503\).1.20](https://doi.org/10.15589/znp2026.1(503).1.20)

EFFICIENCY OF THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS IN SURFACE SHIP AND VESSEL POWER PLANTS

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧИХ СИСТЕМ В СКЛАДІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ НАДВОДНИХ КОРАБЛІВ ТА СУДЕН

Heorhii V. Kuznetsov
kuznetsov_georgiy@ukr.net
ORCID: 0000-0002-1028-4102

Г. В. Кузнецов,
аспірант

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. *The aim of the research* is to improve the technical and economic performance of waste heat recovery, distribution and utilization processes in thermal energy storage systems of ship and vessel power plants, taking into account deterministic and probabilistic components of ship speed in operational cycles for the needs of the plants themselves, their systems, equipment and the crew. *The research method* is the mathematical modeling of heat accumulation processes in working media from thermal sources in a thermal energy storage system with its subsequent use for engine pre-start preparation, as well as for the needs of ship or vessel, technical systems and the crew. *The results of the research:* dependencies of thermal energy storage system utilization efficiency on the thermophysical properties of phase change materials, ship operating conditions and consumer composition are determined and evaluated by a set of technical and economic parameters, including time-energy equivalent, utilization efficiency, quality factor and thermal efficiency of the thermal energy storage system. *The scientific novelty* lies in the substantiated sequence of selecting phase change material based on a set of integral parameters that take into account the thermophysical properties of the material (latent heat of phase change, density and melting temperature), as well as geometric dimensions of the energy storage unit and operational cycles of ships (sailing and parking time). For the first time, the possibility of improving the efficiency of ship power plants by applying a thermal energy storage system using different waste heat sources with corresponding temperature potentials is proven. *The practical significance* lies in the formation of an initial data base for the development of schematic solutions for waste heat recovery using phase-change thermal energy storage systems and its further use on ships and vessels as part of their power plants and technical systems for practical application.

Key words: utilization; accumulation; heat; preparation; consumption; systems; load; efficiency.

Анотація. *Метою дослідження* є підвищення техніко-економічних показників процесів утилізації, розподілу та використання скидної теплоти в теплоакumuлюючих системах енергетичних установок кораблів та суден з урахуванням детермінованих та ймовірнісних складових швидкостей ходу в експлуатаційних циклах на потреби установок, їх систем та екіпажу. *Методом дослідження* є математичне моделювання процесів акумулювання теплоти робочих середовищ теплових джерел у теплоакumuлюючій системі з подальшим її використанням на передпускову підготовку двигунів, потреби технічних систем корабля або судна та екіпажу. *Результати дослідження:* визначено залежності ефективності використання теплоакumuлюючої системи від теплофізичних властивостей теплоакumuлюючих матеріалів, умов експлуатації кораблів та складу споживачів, що оцінюються наступними техніко-економічними показниками: часово-енергетичним еквівалентом, показником ефективності використання теплоакumuлюючої системи, її якості та теплової ефективності. *Наукова новизна отриманих результатів дослідження* полягає в обґрунтованій послідовності визначення теплоакumuлюючого матеріалу для підвищення ефективності процесів акумуляції та витрат теплоти з фазовим переходом в теплоакumuлюючих системах енергетичних установок надводних кораблів та суден на підставі інтегральних показників, які враховують теплофізичні властивості матеріалу (теплоту фазового переходу, густину та температуру плавлення), габаритні розміри теплоакumuлятора та експлуатаційні цикли (часи ходу і стоянки). Вперше доведено можливість підвищення ефективності енергетичної установки надводних кораблів застосуванням теплоакumuлюючої системи при використанні різних джерел скидної теплоти з відповідними температурними потенціалами. *Практична значимість отриманих результатів* полягає в базі вихідних даних для розробки схемних рішень утилізації скидної теплоти теплоакumuлюючими системами з фазовим переходом та її використання на надводних кораблях та суднах у складі їх енергетичних установок.

Ключові слова: утилізація; акумуляція; теплота; підготовка; споживання; системи; навантаження; економічність.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Умови роботи корабельних та суднових енергетичних установок характеризуються різними режимами двигунів у часі, які носять ймовірнісний характер і залежать від виконуваних завдань і зовнішніх умов, що склалися. Можливість використання для одного класу кораблів та суден різних типів енергетичних установок з головними та допоміжними двигунами – дизель-генераторами потребує обґрунтування вибору техніко-економічних показників теплоакумуючих систем (ТАС) з урахуванням їх ефективності. Ефективність ТАС залежить від їх структури, експлуатаційних циклів, джерел утилізованої теплоти, конструкції теплоаккумулятора, теплоакмулюючого матеріалу та складу споживачів.

Тому визначення критеріїв раціонального використання ТАС у складі корабельних та суднових енергетичних установок з урахуванням теплофізичних властивостей теплоакмулюючих матеріалів, параметрів зовнішнього середовища та характеристик навантаження головних і допоміжних двигунів у часі є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інформація щодо застосування ТАС на кораблях відсутня, а для суден обмежена [1–14]. Результати вітчизняних дослідників представлені у працях авторських колективів: Варшамова А.В., Голеншина В.В., Харитонова Ю.М., Шалухіна В.І. [1–4]; Вербовського В.С., Грицука І.В., Погорлицького Д.С., Худякова І.В. [5–10].

У роботах професора Харитонова Ю.М. та його співавторів визначено перспективні схеми систем передпускового прогріву дизельних двигунів енергетичних установок суден портофлоту, які відповідають вимогам нормативів і показникам собівартості, конструктивної та технологічної простоти, надійності та безпечності під час експлуатації.

На підставі експериментальних досліджень професора Грицука І.В. та його співавторів підтверджено, що температурний потенціал відпрацьованих газів дозволяє використовувати ТАС з фазовим переходом для передпускової підготовки та запуску головного дизельного двигуна [5, 6]. Показано можливість модернізації системи охолодження суднового двигуна MAN D2876LE301 за рахунок встановлення теплоаккумулятора з фазовим переходом, що наведена в [7].

Особливості роботи контактної теплоаккумулятора фазового переходу системи регулювання температури охолоджувальної рідини й моторної оливи дизельного двигуна виконано математичним моделюванням визначено шляхом математичного моделювання параметрів його роботи дизельного двигуна. За отриманими результатами використання ТАС на суднах обґрунтовано спосіб утилізації теплоти відпрацьованих газів при застосуванні системи теплової підготовки з теплоаккумулятором фазового переходу, яка призначена для прогріву охолоджуючої рідини, головки і блоку циліндрів [8, 9].

Дослідження експериментального зразка теплоаккумулятора, встановленого у системі охолодження дизельного двигуна енергетичної установки для передпускового прогріву в холодних кліматичних умовах виконано науковцями Навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування та Національного технічного університету міста Херсон [10]. За результатами роботи визначено часи зарядки і перебування теплоаккумулятора в зарядженому стані, потрібна маса теплоакмулюючого матеріалу і габарити теплоаккумулятора, а також режими його роботи при зарядці та розрядці.

Результати, отримані зарубіжними дослідниками, характеризуються наступним: запропоновано конструкцію пластинчастого теплоаккумулятора енергоємністю 45–46 кВт·год/м³ для суден з обмеженими масогабаритними параметрами машинного відділення [11]; використання ТАС для систем гарячого водопостачання, опалення, вентиляції та кондиціонування на круїзних суднах знижує навантаження на дизель-генератори на стоянках і зменшує споживання палива [12, 13]; експериментально досліджена інтегрована система утилізації теплоти, що об'єднує двигун Стірлінга, ORC-установку і теплоаккумулятор, величина акумульованої теплоти в якій склала близько 8,7 кВт·год (7,7% від загальної витрати енергії палива) [14].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Перераховані обставини не дають змоги правильно визначити умови утилізації та використання акумульованої теплоти для передпускової підготовки двигуна та інших потреб корабля або судна при різних послідовностях зміни швидкостей руху. Більш того, при розгляді використання ТАС у складі енергетичних установок кораблів та суден не враховуються конструктивні характеристики теплоаккумулятора та вплив ТАС на їх економічність і масогабаритні показники. Недостатньою мірою досліджено вибір теплоакмулюючого матеріалу з урахуванням теплофізичних властивостей теплоносіїв та гідравлічних втрат при їх переміщенні.

Відсутність комплексного використання ресурсів скидної теплоти енергетичних установок, а також умов їх експлуатації не дозволяють раціонально використовувати ТАС у їх складі. Тому необхідне обґрунтування впливу на ефективність використання ТАС з урахуванням структури енергетичних установок, експлуатаційних циклів корабля або судна, джерел скидної теплоти, конструкції теплоаккумулятора, ТАМ та складу споживачів.

Мета дослідження – підвищення техніко-економічних показників процесів утилізації, розподілу та використання скидної теплоти в ТАС енергетичних установках кораблів та суден з урахуванням детермінованих та ймовірнісних складових швидкостей ходу

в експлуатаційних циклах на потреби енергетичних установок, їх систем та екіпажу.

Методом дослідження є математичне моделювання процесів акумулювання теплоти робочих середовищ теплових джерел у ТАС з подальшим її використанням на передпускову підготовку двигунів, потреби технічних систем корабля або судна та екіпажу.

Об'єктом дослідження є процеси утилізації, акумулювання і використання теплоти з визначенням ефективності ТАС енергетичних установок кораблів та суден.

Предметом дослідження є показники ефективності використання ТАС та їх залежності від складу і теплофізичних властивостей елементів системи та джерел теплоти.

ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Досягнення поставленої мети досягається шляхом вирішення наступних завдань:

1) дослідити особливості представлення характеристик енергетичних установок кораблів та суден з урахуванням їх спектру навантажень для окремих етапів експлуатаційних циклів;

2) оцінити значення критеріїв оптимальності ТАС з урахуванням структури енергетичної установки корабля або судна, експлуатаційного циклу надводного корабля або судна, джерел утилізованої теплоти, конструкції теплоаккумулятора, ТАМ та складу споживачів;

3) визначити ефективність використання ТАС у складі енергетичної установки корабля або судна від теплофізичних властивостей ТАМ, умов експлуатації кораблів або суден та складу енергетичної установки і споживачів;

4) розробити рекомендації щодо впровадження ТАС у складі корабельних або суднових енергетичних установок за умови їх ефективного використання для відповідного складу енергетичної установки та класу надводного корабля або судна.

Основний матеріал. Особливості представлення характеристик енергетичних установок кораблів та суден. Окремі етапи експлуатаційного циклу корабля або судна у вигляді множин швидкостей та часових інтервалів в залежності від способів задання можуть бути представлені як детерміновані, ймовірнісні або невизначені. Для цих випадків необхідно визначити умови використання ТАС у складі енергетичних установок при ефективному використанні їх потужності шляхом зв'язку з гідродинамічними характеристиками корпусу і рушіїв.

У зв'язку з цим математичне моделювання процесів утилізації скидної теплоти енергетичних установок для інтервалу часу Δt при її акумулюванні і використанні на потреби самої установки, технічних систем корабля або судна та екіпажу базується на системі наступних рівнянь:

– час процесу

$$\tau_i = \tau_0 + \sum_{i=1}^n \Delta \tau_i; \quad (1)$$

– швидкість ходу

$$v_i = v_i(n_i, v_0), \quad i = 1 \dots n; \quad (2)$$

де n_i – число оборотів гвинта;

– потужність головного двигуна

$$N_{ГД} = N_{ГД}(n_i, N_0); \quad (3)$$

– температури джерел теплоти: відпрацьованих газів – T_{1i} , мастила – T_{2i} та охолоджуючої рідини – T_{3i} відповідно

$$T_{1i} = T_1(N_{ГД}, T_0) \quad (4)$$

$$T_{2i} = T_2(N_{ГД}, T_{20}) \quad (5)$$

$$T_{3i} = T_3(N_{ГД}, T_{30}) \quad (6)$$

– утилізована теплота

$$Q_{yi} = Q_{y1i} + Q_{y2i} + Q_{y3i} \quad (7)$$

– акумульована теплота

$$Q_{ai} = Q_{a1i} + Q_{a2i} + Q_{a3i} \quad (8)$$

– маса теплоакumuлюючого матеріалу

$$M_{ТАМ} = M_{ТАМ}(Q_a); \quad (9)$$

де $Q_a = \sum_{i=1}^n Q_{ai}$;

– об'єм теплоаккумулятора

$$V_{ТА} = V_{ТАМ}(M_{ТАМ}); \quad (10)$$

– додатковий опір руху теплоносія джерела теплоти

$$\Delta P_{ТА} = \Delta P_{ТА}(Q_a); \quad (11)$$

У представлених виразах (1-6) величини (τ_0 , v_0 , N_0 , T_{10} , T_{20} , T_{30}) характеризують початкові умови однозначності.

Температури джерел теплоти визначаються режимом роботи двигунів, а процеси теплопередачі теплофізичними властивостями теплоносіїв та конструктивними показниками пристроїв.

Математична модель (1-11) має наступні обмеження:

$$\tau_{зар} \leq \sum \tau_{ходj}, \quad j = 1 \dots k;$$

$$\tau_{нм} \leq \tau_{пп};$$

$$\tau_{нор} \leq \tau_{пп};$$

$$Q_a \leq Q_{тл} + Q_{кл};$$

$$L_{ТА} \cdot B_{ТА} \cdot H_{ТА} \leq L_{М} \cdot B_{М} \cdot H_{М};$$

$$\Delta P_{ТА} \leq \Delta P_{ДОП},$$

де $\tau_{зар}$, $\tau_{ход}$, $\tau_{нм}$, $\tau_{нор}$, $\tau_{пп}$ відповідно часи зарядки, ходу, нагріву мастила, охолоджуючої рідини та передпускової підготовки; Q_a , $Q_{тл}$, $Q_{кл}$ відповідно кількість теплот акумульованої, на технічні системи корабля або судна та їх екіпажу; L , B , H відповідно габаритні розміри, $ТА$ – теплоаккумулятор та $М$ – машинне відділення; ΔP – надлишок тиску на переміщення теплоносіїв, $ДОП$ – допустимі.

Для цільової функції часу зарядки теплоаккумулятора $\tau_{зар}$, що є функцією двох параметрів управління v і зовнішніх умов x розглянуті три варіанти при заданні вихідних даних швидкості руху корабля або судна $v_i(\tau_i)$ в часі: детермінованими, при постійному

значенні x ; ймовірнісними $v_{1j}, v_{2j}, \dots, v_{lj}$ з відповідними відомими ймовірностями появи цих значень $p_1, p_2, \dots, p_l$ та невизначеними. Оптимізована цільова функція для першого варіанту, як функція тільки параметра $\tau_{зар}(v)$ має єдиний розв'язок, для другого як математичне сподівання функціоналу мети $M\tau_{зар}$

$$M\tau_{зар}(v_{онм}) = \min_{j=1}^k p_j \cdot \tau_{зарij} \cdot (x_j, v_{ionm})$$

та третього, беручи до уваги, що зовнішні умови є стихійними, на основі теорії прийняття рішень за допомогою критерію вибору Гурвіца

$$M\tau_{зар}(v_{онм}) = \min_i [\alpha \cdot \max_j \tau_{зарij} + (1-\alpha) \cdot \min_j \tau_{зарij}],$$

де α – коефіцієнт «песимізму-оптимізму».

Формалізація спектру швидкостей та часу для різних етапів експлуатаційного циклу корабля наведена на рис. 1, а відповідні оцінки для детермінованого, ймовірнісного і невизначеного варіантів представлені в таблиці 1.

Час автономності τ_a визначається як сума часів окремих етапів циклу

$$\tau_a = \tau_1 + \tau_2 + \tau_{31} + \tau_{32} + \tau_{33} + \tau_{34} + \tau_4 + \tau_5,$$

де $\tau_1, \tau_2, \tau_{31}, \tau_{32}, \tau_{33}, \tau_{34}, \tau_4, \tau_5$ – відповідно час виходу з бази; переходу в район несення служби; патрулювання при різних швидкостях ходу – економічному, максимальному, дрейфі та швартовних операціях; повернення з району несення служби і захід до бази.

За приведеними даними можливо оцінити час зарядки теплоакумулятора в залежності від варіанту представлення результатів. Для детермінованого варіанту його відносне значення часу становить не більше $0,347\tau_a$; для ймовірнісного та невизначеного відповідно $0,330\tau_a$ та $0,303\tau_a$ при коефіцієнті «песимізму-оптимізму» $\alpha = 0,3$.

Оцінка очікуваного часу зарядки може бути виконана як середньозважене значення на основі даних оптимістичного $\tau_o = 0,303\tau_a$, песимістичного

$\tau_{\Pi} = 0,347\tau_a$ та найбільш ймовірного прогнозів зарядки $\tau_{HB} = 0,330\tau_a$ згідно виразу

$$\tau_{зар} = (\tau_o + 4 \cdot \tau_{HB} + \tau_{\Pi}) / 6 = 0,328 \cdot \tau_a.$$

Згідно з розподілом часу і потужності головного двигуна визначаються температури і витрати відпрацьованих газів, мастила і охолоджуючої рідини по етапам несення експлуатаційного циклу для розрахунків утилізованої теплоти (таблиця 2).

Результати розрахунків кількості утилізованої та акумульованої теплоти для теплоакумулюючого матеріалу натрію гідроксиду з температурою плавлення $T_{плав} = 596$ K та теплотою фазового переходу $r = 393$ кДж/кг представлені в таблиці 3.

Кількість теплоти для передпускової підготовки двигуна Q_{um} з початковою температурою мастила та охолоджуючої рідини на рівні 293...300 K, розраховувалося на підставі експериментальних даних працюючого двигуна [6], а для побутового споживання Q_{ub} згідно стандарту [15].

Оцінка значення критеріїв оптимальності ТАС. Оцінка ефективності використання ТАС проводиться за наступними критеріями оптимальності:

– часовим-енергетичним еквівалентом, який дорівнює різниці між утилізованою теплотою від джерел скидної теплоти та витрат на транспортування теплоносіїв (Q_{eum}) з урахуванням енергії від зовнішніх джерел (Q_{30}):

$$ЧЕЕ_l = \frac{Q_{ymTAC} - (Q_{eum} + Q_{30})}{\tau_a},$$

– ефективності використання ТАС, який дорівнює відношенню теплоти, що споживається від ТАС на потреби енергетичних установок, їх систем та екіпажу, що утилізується ТАС від джерел корабельної або суднової енергетичних установок:

$$\eta_{ETAC} = \frac{Q_{nom}}{Q_{yTAC}};$$

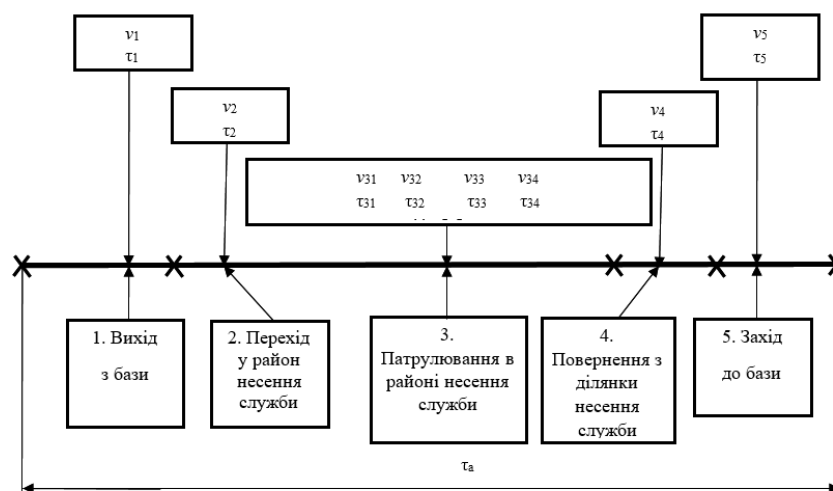


Рис. 1. Показники етапів експлуатаційного циклу корабля: 3.1 – економічний хід, 3.2 – максимальний хід, 3.3 – дрейф, 3.4 – швартовні операції

Таблиця 1. Результати представлення оцінки спектру ходових режимів

Етап несення експлуатаційний цикл корабля	Детермінований	Варіант представлення	
		Ймовірнісний	Невизначений
1. Вихід з бази	$\tau_1/\tau_a=0,003$	$0,002 \leq \tau_1/\tau_a \leq 0,005$	$0,002 \leq \tau_1/\tau_a \leq 0,005$
	$v_1/v_m=0,273$	$0,1 \leq p_1 \leq 0,5$	
	$N_1/N_m=0,031$	$0,164 \leq v_1/v_m \leq 0,410$ $0,030 \leq N_1/N_m \leq 0,077$	$0,164 \leq v_1/v_m \leq 0,410$ $0,030 \leq N_1/N_m \leq 0,077$
2. Перехід у район несення експлуатаційний цикл	$\tau_2/\tau_a=0,028$	$0,025 \leq \tau_2/\tau_a \leq 0,030$	$0,025 \leq \tau_2/\tau_a \leq 0,030$
	$v_2/v_m=0,682$	$0,2 \leq p_2 \leq 0,3$	
	$N_2/N_m=0,295$	$0,637 \leq v_2/v_m \leq 0,764$ $0,277 \leq N_2/N_m \leq 0,385$	$0,637 \leq v_2/v_m \leq 0,764$ $0,277 \leq N_2/N_m \leq 0,385$
3. Патрулювання в районі несення експлуатаційний цикл:	$\tau_{31}/\tau_a=0,283$	$0,025 \leq \tau_{31}/\tau_a \leq 0,030$	$0,025 \leq \tau_{31}/\tau_a \leq 0,030$
	$v_{31}/v_m=0,682$	$0,2 \leq p_{31} \leq 0,3$	$0,637 \leq v_{31}/v_m \leq 0,764$
	$N_{31}/N_m=0,295$	$0,637 \leq v_{31}/v_m \leq 0,764$ $0,277 \leq N_{31}/N_m \leq 0,385$	$0,637 \leq v_{31}/v_m \leq 0,764$ $0,277 \leq N_{31}/N_m \leq 0,385$
	$\tau_{32}/\tau_a=0,033$	$0,030 \leq \tau_{32}/\tau_a \leq 0,035$	$0,030 \leq \tau_{32}/\tau_a \leq 0,035$
	$v_{32}/v_m=1$	$0,2 \leq p_{32} \leq 0,3$	$0,95 \leq v_{32}/v_m \leq 1,05$
	$N_{32}/N_m=1$	$0,95 \leq v_{32}/v_m \leq 1,05$ $0,94 \leq N_{32}/N_m \leq 1,08$	$0,94 \leq N_{32}/N_m \leq 1,08$
	$\tau_{33}/\tau_a=0,617$	$0,600 \leq \tau_{33}/\tau_a \leq 0,620$	$0,600 \leq \tau_{33}/\tau_a \leq 0,620$
	$v_{33}/v_m=0$	$0,2 \leq p_{33} \leq 0,3$	$v_{33}/v_m=0$
	$N_{33}/N_m=0$	$v_{33}/v_m=0$	$N_{33}/N_m=0$
	$\tau_{34}/\tau_a=0,005$	$0,003 \leq \tau_{34}/\tau_a \leq 0,007$	$0,003 \leq \tau_{34}/\tau_a \leq 0,007$
	$v_{34}/v_m=0,046$	$0,2 \leq p_{34} \leq 0,3$	
	$N_{34}/N_m=0,001$	$0,033 \leq v_{34}/v_m \leq 0,077$ $N_{34}/N_m \approx 0,001$	$0,033 \leq v_{34}/v_m \leq 0,077$ $N_{34}/N_m \approx 0,001$
4. Повернення з району несення експлуатаційний цикл	$\tau_4/\tau_a=0,028$	$0,025 \leq \tau_4/\tau_a \leq 0,030$	$0,025 \leq \tau_4/\tau_a \leq 0,030$
	$v_4/v_m=0,682$	$0,2 \leq p_4 \leq 0,3$	
	$N_4/N_m=0,295$	$0,637 \leq v_4/v_m \leq 0,764$ $0,277 \leq N_4/N_m \leq 0,385$	$0,637 \leq v_4/v_m \leq 0,764$ $0,277 \leq N_4/N_m \leq 0,385$
5. Захід до бази	$\tau_5/\tau_a=0,003$	$0,002 \leq \tau_5/\tau_a \leq 0,005$	$0,002 \leq \tau_5/\tau_a \leq 0,005$
	$v_5/v_m=0,273$	$0,1 \leq p_5 \leq 0,5$	
	$N_5/N_m=0,031$	$0,164 \leq v_5/v_m \leq 0,410$ $0,030 \leq N_5/N_m \leq 0,077$	$0,164 \leq v_5/v_m \leq 0,410$ $0,030 \leq N_5/N_m \leq 0,077$

Таблиця 2. Показники температури T , К та масової витрати G , кг/с відпрацьованих газів двигуна CAT C18

Етап несення експлуатаційний цикл корабля	Варіант представлення		
	Песимістичний $\tau_{II}=0,347\tau_a$	Оптимістичний $\tau_{II}=0,303\tau_a$	Очікуваний $\tau_{II}=0,328\tau_a$
1. Вихід з бази	$T_{11}=565$ $G_{11}=0,099$	$565 \leq T_{11} \leq 570$ $0,089 \leq G_{11} \leq 0,099$	$565 \leq T_{11} \leq 570$ $0,089 \leq G_{11} \leq 0,099$
2. Перехід у район несення служби	$T_{12}=588$ $G_{12}=0,144$	$587 \leq T_{12} \leq 612$ $0,144 \leq G_{12} \leq 0,279$	$587 \leq T_{12} \leq 612$ $0,144 \leq G_{12} \leq 0,279$
3. Патрулювання:	$T_{131}=588$ $G_{131}=0,144$	$587 \leq T_{131} \leq 612$ $0,144 \leq G_{131} \leq 0,279$	$587 \leq T_{131} \leq 612$ $0,144 \leq G_{131} \leq 0,279$
3.1 економічний хід			
3.2 максимальний хід	$T_{132}=672$ $G_{132}=1,094$	$673 \leq T_{132} \leq 681$ $1,094 \leq G_{132} \leq 1,119$	$673 \leq T_{132} \leq 681$ $1,094 \leq G_{132} \leq 1,119$

Таблиця 3. Кількості теплоти Q , 10^{-6} Дж

Етап несення експлуатаційний цикл корабля	Варіант представлення		
	Песимістичний $\tau_{II}=0,347\tau_a$	Оптимістичний $\tau_{II}=0,303\tau_a$	Очікуваний $\tau_{II}=0,328\tau_a$
1. Вихід з бази	$Q_{y11}=27,8$ $Q_{a11}=26,1$	$44,8 \leq Q_{y11} \leq 46,0$ $42,1 \leq Q_{a11} \leq 42,8$	$41,7 \leq Q_{y11} \leq 43,0$ $39,2 \leq Q_{a11} \leq 40,2$
2. Перехід у район несення експлуатаційний цикл	$Q_{y12}=416$ $Q_{a12}=392$	$414 \leq Q_{y12} \leq 484$ $389 \leq Q_{a12} \leq 450$	$415 \leq Q_{y12} \leq 455$ $391 \leq Q_{a12} \leq 423$
3. Патрулювання:	$Q_{y131}=4202$ $Q_{a131}=3965$	$4227 \leq Q_{y131} \leq 4896$ $3973 \leq Q_{a131} \leq 4553$	$4217 \leq Q_{y131} \leq 4847$ $3969 \leq Q_{a131} \leq 4534$
3.1 економічний хід	$Q_{y132}=5008$ $Q_{a132}=4792$	$4991 \leq Q_{y131} \leq 5019$ $4691 \leq Q_{a131} \leq 4809$	$4984 \leq Q_{y131} \leq 5006$ $4684 \leq Q_{a131} \leq 4799$
3.2 максимальний хід	$Q_{um}=214,2$ $Q_{n6}=23,7$	$Q_{um}=214,2$ $Q_{n6}=23,7$	$Q_{um}=214,2$ $Q_{n6}=23,7$
3.3 дрейф			

– якості ТАС, який дорівнює відношенню утилізованої теплоти ТАС від джерел енергетичних установок корабля або судна до сумарної кількості теплових викидів енергетичної установки:

$$\eta_{ТАС} = \frac{Q_{уТАС}}{Q_{викеу}};$$

– теплової ефективності ТАС, який характеризує загальну економію палива енергетичної установки для ТАС в залежності від джерел акумульованої теплоти:

$$E_T = \eta_{ЕТАС} \cdot \eta_{ЕУ}.$$

Результати дослідження для одного з проектів корвету наведені у таблицях 4 та 5.

Ефективність використання ТАС у складі енергетичних установок. Визначення залежності ефективності використання ТАС в складі енергетичних установок розглянуто для:

– для катерів: дизельна установка (ДУ), газотурбінна установка та комбінована дизель-газотурбінна установка – CODAG;

– для корветів: ДУ, комбінована дизель-газотурбінна установка – CODOG, комбінована газо-газотурбінна установка COGAG та CODAG;

– для фрегатів: ДУ, CODOG, COGAG, CODAG та комбінована дизель-дизельна установка – CODAD.

Склад та характеристики енергетичних установок цих класів кораблів наведені у [16], а показники експлуатаційних циклів оцінені згідно [17].

В результаті математичного моделювання на підставі наданих вихідних даних отримано показники ТАС в різних порах року. Як приклад ці показники для фрегату приведені в таблицях 6 та 7.

Рекомендації щодо впровадження ТАС у складі енергетичних установок кораблів та суден

Рекомендації розроблено з урахуванням габаритів теплоаккумулятора, розташування його в системі газовихлопу двигунів та конструктивних обмежень машинного відділення корабля.

При реалізації простих схемних рішень ТАС конструкцію теплоаккумулятора рекомендується виконати за конструктивною схемою глушника MFT компанії MAXIM SILENCERS, INC з доробкою конструкції теплообмінника типу «труба в трубі» на окремі касети з теплоакмулюючим матеріалом зі з'єднаними внутрішніми трубами при протиточному русі теплоносія для споживачів з розмірами, що наведені в таблиці 8.

Обговорення отриманих результатів. Вплив теплофізичних властивостей ТАМ на ефективність використання ТАС залежить від характеристик двигуна, конструкції і розмірів теплоаккумулятора, складу споживачів та експлуатаційного циклу корабля або судна. Теплота фазового переходу, коефіцієнт теплопровідності та густина є узгодженими показниками ТАМ на відміну від температури плавлення. Підвищення значення добутку теплоти фазового переходу на густину відповідає зростанню у часі складовим

Таблиця 4. Таблиця показників ефективності використання ТАС корвету

Теплоакмулюючий матеріал	Головний двигун		Допоміжний двигун	
	Показник ефективності використання ТАС влітку/взимку	Показник теплової ефективності ТАС влітку/взимку	Показник ефективності використання ТАС влітку/взимку	Показник теплової ефективності ТАС влітку/взимку
NaOH	0,692/1,000	0,270/0,390	0,291/0,509	0,113/0,198
LiNO ₃	–/–	–/–	0,276/0,483	0,108/0,188
LiCl(37)–63LiOH	0,771/1,000	0,301/0,390	0,324/0,566	0,126/0,221
NaCl(7.8)–6.4Na ₂ CO ₃ –85.5NaOH	0,861/1,000	0,336/0,390	–/–	–/–

Таблиця 5. Таблиця показників якості утилізації ТАС корвету

Теплоакмулюючий матеріал	Головний двигун		Допоміжний двигун	
	Кількість передпускових підготовок	Показник якості ТАС, $\eta_{ТАС}$	Кількість передпускових підготовок	Показник якості ТАС, $\eta_{ТАС}$
NaOH	4	0,044	3	0,116
LiNO ₃	–	–	3	0,035
LiCl(37)–63LiOH	4	0,025	3	0,033
NaCl(7.8)–6.4Na ₂ CO ₃ –85.5NaOH	4	0,026	–	–

Таблиця 6. Таблиця показників ефективності використання ТАС фрегату

Теплоакмулюючий матеріал	Головний двигун		Допоміжний двигун	
	Показник ефективності використання ТАС влітку/взимку	Показник теплової ефективності ТАС влітку/взимку	Показник ефективності використання ТАС влітку/взимку	Показник теплової ефективності ТАС влітку/взимку
NaOH	0,556/0,974	0,211/0,370	0,484/0,657	0,186/0,253
LiNO ₃	0,529/0,925	0,201/0,352	–/–	–/–
LiCl(37)–63LiOH	0,620/1,000	0,235/0,412	0,530/0,719	0,204/0,277

циклічного процесу накопичення-використання і загальному часу безперервного руху корабля або судна з різними швидкостями, а також інтенсивності теплопередачі і площі теплопередавальної поверхні. Тому відношення цього добутку до температури плавлення ТАМ, що теж збільшує час процесу накопичення теплоти, може бути використано, як критерій вибору теплоакumuлюючого матеріалу, за умови його максимуму – $K_{ТАМ} = \frac{r \cdot \rho}{T_{пл}}, \frac{kJ}{m^3 \cdot K}$ (таблиця 8).

Вплив експлуатаційного циклу корабля або судна на ефективність використання ТАС у складі їх енергетичних установок відповідає співвідношенню загальному часу їх безперервного руху з різними

швидкостями до загального часу дрейфу при патрулюванні. Мінімальне значення діапазону руху складає значення виходу та початку переходу до місця призначення, тому відношення відповідного критерію ефективності до мінімального значення діапазону руху визначає вплив експлуатаційного циклу корабля або судна на ефективність використання ТАС, як критерій інтенсивної ефективності – $K_{ТАС} = \frac{\eta_i}{\tau_{min}}, \frac{1}{200}$ де η_i – критерій ефективності.

Ефективність використання ТАС простого та гібридного типів у складі енергетичних установок надводних кораблів та суден залежить від теплофізичних властивостей теплоакumuлюючих матеріалів, умов їх експлуатації та складу споживачів.

Таблиця 7. Таблиця показників якості утилізації ТАС фрегату

Теплоакumuлюючий матеріал	Головний двигун		Допоміжний двигун	
	Кількість передпускових підготовок	Показник якості ТАС, $\eta_{ТАС}$	Кількість передпускових підготовок	Показник якості ТАС, $\eta_{ТАС}$
NaOH	4	0,022	6	0,012
LiNO ₃	4	0,016	–	–
LiCl(37)–63LiOH	4	0,014	6	0,020

Таблиця 8. Рекомендовані характеристики ТАС в складі корабельної енергетичної установки

Клас корабля	Пропульсивна установка	Тип ТАС	Джерела скидної теплоти	Розміри теплоаккумулятора, DxL, мм	ТАМ, K _{ТАМ} , кДж/(м ³ ·К)
Патрульний катер	ДУ	Проста	Відпрацьовані гази	0,60x1,12	MgCl ₂ (63)-22,3NaCl-14KCl 1576
				0,40x1,30	LiF(20)-80LiOH 1989
				0,50x1,2	LiF(20)-80LiOH 1989
Ракетний катер	CODAG	Проста	Відпрацьовані гази	1,060x1,115	LiCl(37)-63LiOH 2520
	COGAG		Масило та паливо	-	масило та паливо
Корвет	CODOG	Гібридна	Відпрацьовані гази	1,110x2,440	NaOH, 1405
			Масило та паливо	-	масило та паливо
			Масило та охолоджуюча рідина	-	масило та охолоджуюча рідина
	CODAG		Відпрацьовані гази	1,080x2,500	NaOH, 1405
			Масило та паливо	-	масило та паливо
			Масило та охолоджуюча рідина	-	масило та охолоджуюча рідина
	CODOG		Відпрацьовані гази	1,050x1,200	LiNO ₃ , 1678
			Масило та паливо	-	масило та паливо
			Масило та охолоджуюча рідина	-	масило та охолоджуюча рідина
Фрегат	CODOG	Гібридна	Відпрацьовані гази	1,600x2,440	LiNO ₃ , 1678
			Масило та паливо	-	масило та паливо
			Масило та охолоджуюча рідина	-	масило та охолоджуюча рідина
	COGAG		Відпрацьовані гази	-	-
			Масило та паливо	-	масило та паливо
			Масило та охолоджуюча рідина	-	масило та охолоджуюча рідина
«Івер Гюйтфельд»	CODAD	Гібридна	Відпрацьовані гази	1,450x2,500	LiNO ₃ , 1678
			Масило та паливо	-	масило та паливо
			Масило та охолоджуюча рідина	-	масило та охолоджуюча рідина

Розподіл потенціалу теплоти для утилізації при роботі головних та допоміжних двигунів відповідає наступному порядку – відпрацьовані гази, охолоджуюча рідина та мастило. На підставі цього для розглянутих класів кораблів визначені наступні раціональні теплоакumuлюючі матеріали, які наведені у таблиці 8.

Наведені результати для енергетичних установок з ТАС корвету та фрегату враховують не тільки утилізацію теплоти відпрацьованих газів, а також теплоту мастила та палива у витратних цистернах.

ВИСНОВКИ

1. Оцінені інтервали часу, режими роботи головних двигунів корабельної енергетичної установки дозволили більш достовірно визначити температури відпрацьованих газів в дані проміжки часу, витрати, а також кількість утилізованої та акумульованої

теплот при цих умовах для песимістичного, оптимістичного та ймовірного варіантів.

2. Визначено значення потенціалів утилізованої теплоти та відповідна кількість акумульованої теплоти для забезпечення потреб енергетичних установок, їх систем та екіпажу від відпрацьованих газів, мастила та охолоджуючої рідини.

3. Отримано базу вихідних даних для розробки схемних рішень утилізації скидної теплоти теплоакumuлюючими системами з фазовим переходом та її використання на надводних кораблях.

4. Дослідження теплофізичних процесів утилізації скидної теплоти енергетичних установок надводних кораблів класів патрульний та ракетний катери, корвет та фрегат виконано з урахуванням структури їх енергетичних установок та експлуатаційних циклів.

REFERENCES

- [1] Varshamov, A.V., Holenshyn, V.V., Kharytonov, M.Y. (2016). Vybir perspektyvnykh skhem teploakumuluyuchykh system peredpuskovoho prohrivu dvyhunyv vnutrishnoho zghoriannia [Selection of promising schemes of heat storage systems for pre-heating of internal combustion engine]. *Scientific Works. Series: Technogenic Safety*, 280(268), 21-27 [in Ukrainian].
- [2] Holenshyn, V.V., Shalukhin, V.I., Varshamov, A.V. (2011). Eksperymentalni doslidzhennia temperaturnoho stanu obladnannia ta korpusnykh konstrukttsii u mashynnomu viddilenni malotonnazhnoho sudna [Experimental studies of the equipment temperature conditions and hull structures in the engine room of a small-tonnage vessel]. *Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine*, 2, 159-162 [in Ukrainian].
- [3] Holenshyn, V.V., Varshamov, A.V., Kharytonov, M.Y. (2017). Parametry kombinovanoho teplovoho akumulatora dlia systemy mashchennia DVZ suden portovoho flotu [Parameters of combined thermal storage accumulator for the lubrication system of diesel engine of port fleet vessels]. *Scientific Works. Series: Technogenic Safety*, 289(277), 101-106 [in Ukrainian].
- [4] Kharytonov, Y.M., Varshamov, A.V., Holenshyn, V.V., Shalukhin, V.I. (2007). Parametry kapsulovanoho teplovoho akumulatora system peredpuskovoho prohrivu DVZ [Parameters of encapsulated thermal storage accumulators for internal combustion engine preheating systems], Contemporary problems in engine manufacturing: status, ideas, solutions. Materials from the second scientific and technical conference. Pervomaik: PPI NUK [in Ukrainian].
- [5] Hrytsuk, I.V., Pogorletsky, D.S., Khudyakov, I.V., Dzygar, A.K., Volkov, V.V. (2020) Teplova pidhotovka dvyhuna enerhetychnoyi ustanovky sudna portovoho flotu (Thermal preparation of the engine of the power plant of a port fleet vessel). Modern approaches to the highly efficient use of means of transport: materials of the XI Int. Scientific-Practical Conf. Izmail [in Ukrainian].
- [6] Hrytsuk, I.V., Pogorletsky, D.S., Verbovsky V.S., Volska, O.M., Verbovsky O.V., Simagin, A.F. (2019) *Zabezpechennya teplovoyi pidhotovky dvyhuna enerhetychnoyi ustanovky za dopomohoyu systemy prohrivu z fazoperekhidnymy teplovymy akumulatoryamy* (Ensuring thermal preparation of the engine of a power plant using a warm-up system with phase-transition thermal accumulators). Materials of the International Scientific-Practical Conference dedicated to the memory of professors Fomin Yu.Ya. and Semenov V.S. Odesa (Ukraine) – Istanbul (Turkey) – Odesa (Ukraine) [in Ukrainian].
- [7] Hrytsuk, I.V., Pohorlets'ky, D.S., Bulhakov, M.P., Khudyakov, I.V. (2020) Teplova pidhotovka dyzel'noho dvyhuna enerhetychnoyi ustanovky sudna portovoho flotu [Thermal Preparation of Diesel Engine of Power Plant of Port Fleet Vessel]. *Materialy II Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi mors'koyi konferentsiyi kafedry SEU i TE navchal'no-naukovoho instytutu mors'koho flotu Odes'koho Natsional'noho Mors'koho Universytetu «MPP&O»*. Materials of the II International Scientific and Practical Maritime Conference of the Department of SPP and TE of the Educational and Scientific Institute of the Marine Fleet of the Odessa National Maritime University «MPP&O». Odessa [in Ukrainian].
- [8] Hrytsuk, I.V., Pohorletsky, D.S., Khudyakov, I.V., Bilay, A.V. (2021) Teplova pidhotovka sudnovoho dvyhuna za dopomohoyu teplovoho akumulatora fazovoho perekhodu [Thermal preparation of a marine engine using a phase transition thermal storage accumulator]. Materials of the 12th International Scientific and Practical Conference Modern Power Plants on Transport, Technologies and Equipment for their Maintenance SEUTTOO-2021. Kherson [in Ukrainian].
- [9] Gritsuk, I.V., Gushchin, A.M., Adrov, D.S., Verbovskyi, V.S., Krasnokutskaya, Z.I. (2014). Osoblyvosti matematychnoho modeliuvannia parametriv roboty kontaktynoho teplovoho akumulatora fazovoho perekhodu systemy rehuliyuvannia temperatury okholodzhuiuchoi ridyny y motornoj olyvy DVZ [Features of mathematical modelling of the operating parameters of a contact heat accumulator of the phase transition system for regulating the temperature of the coolant and engine oil in an internal combustion engine]. *Collection of scientific papers of DonIIZT*, 37, 120-128.
- [10] Lunyaka, K., Kliuiev, O., Rusanov, S., Kliuieva, O. (2020). Doslidzhennia roboty teplovoho akumulatora systemy peredpuskovoho prohrivu dvyhuna vnutrishnoho zghoriannia [The research of the work of the heat accumulator of the pre-starting system of warming up of the internal combustion engine]. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 42(3), 77-83 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2020.9>.
- [11] Nawfal, Z.M., Nagentra, R.T., Vishnu, G. and Silaipillayarputhur, K. (2023). Design of Thermal Energy Storage System. *E3S Web of Conferences*, vol. 455, 02011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345502011>.
- [12] Virtanen, J. (2024). Thermal energy storage for cruise ship's cooling system. System design and operating principles. Master's thesis. Tampere. 109 p. Retrieved from <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202401051112>.
- [13] Thermal storage and heat pumps: a step towards zero-emission cruise ships. Retrieved from: <https://blog.sintef.com/ocean/thermal-storage-and-heat-pumps-a-step-towards-zero-emission-cruise-ships/>.

- [14] Catapano, F., Frazzica, A., Freni, A., Manzan, M., Micheli, D., Palomba, V., Sementa, P., Vaglieco, B.M. (2022). Development and experimental testing of a waste-heat recovery system for naval applications. *Applied Energy*, vol. 311, 118673. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118673>.
- [15] DERZHAVNI SANITARNI PRAVYLA DLYA MORS'KYKH SUDEN UKRAYINY DSP 7.7.4.-057-2000. ZATVERDZHENNO Postanova Holovnoho derzhavnoho sanitarnoho likarya Ukrayiny 20.12.2000 N 57 [STATE SANITARY RULES FOR SEA VESSELS OF UKRAINE DSP 7.7.4.-057-2000. APPROVED Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of Ukraine 12/20/2000 N 57] [in Ukrainian]. Retrieved from <https://ips.ligazakon.net/document/MOZ12673>.
- [16] Borysov, V.E., Kuznetsov, H.V. (2024). Determination of schematic solutions rational structures of surface ship power plants in the disclosure of target uncertainty. *Collection of Scientific Papers of NUK*, No 3 (496), 51-58. [https://doi.org/10.15589/znp2024.3\(496\).7](https://doi.org/10.15589/znp2024.3(496).7).
- [17] Pape, A. (Ed.). (2019). *Jane's Fighting Ships 2019-2020*. Surrey: IHS Global.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Варшамов, А.В., Голеншин, В.В., Харитонов, М.Ю. (2016). Вибір перспективних схем теплоакumuлюючих систем передпускового прогріву двигунів внутрішнього згорання. Наукові праці. Техногенна безпека. Радіобіологія, 280(268), 21-27.
- [2] Голеншин, В.В., Шалухін, В.І., Варшамов, А.В. (2011). Експериментальні дослідження температурного стану обладнання та корпусних конструкцій у машинному відділенні малотоннажного судна. Вісник Інженерної академії України, № 2, 159-162.
- [3] Голеншин, В.В., Варшамов, А.В., Харитонов, М.Ю. (2017). Параметри комбінованого теплового акумулятора для системи мащення ДВЗ суден портового флоту. Наукові праці. Серія: Техногенна безпека. Радіобіологія, 289(277), 101-106.
- [4] Харитонов, Ю.М., Варшамов, А.В., Голеншин, В.В., Шалухін, В.І. (2007). Параметри капсульованого теплового акумулятора систем передпускового прогріву ДВЗ, Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення. Матеріали 2 науково-технічної конференції. Первомайськ: ППІ НУК.
- [5] Грицук, І.В., Погорельський, Д.С., Худяков, І.В., Дзигар, А.К., Волков, В.В. (2020) *Теплова підготовка двигуна енергетичної установки судна портового флоту*. Сучасні підходи до вискоєфективного використання засобів транспорту: матеріали XI Міжн. Наук.-Практ. конф. Ізмаїл.
- [6] Грицук, І.В., Погорельський, Д.С., Вербовський В.С., Вольська, О.М., Вербовський О.В., Сімагін, А.Ф. (2019) *Забезпечення теплової підготовки двигуна енергетичної установки за допомогою системи прогріву з фазоперехідними тепловими акумуляторами*. Матеріали Міжнар. наук.-практ. конференції, присвяченої пам'яті професорів Фомина Ю.Я. і Семенова В.С. Одеса (Україна) – Стамбул (Туреччина) – Одеса (Україна).
- [7] Грицук, І.В., Погорельський, Д.С., Булгаков, М.П., Худяков, І.В. (2020) *Теплова підготовка дизельного двигуна енергетичної установки судна портового флоту*. Матеріали II Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ навчально-наукового інституту морського флоту Одеського Національного Морського Університету «МРР&О». Одеса.
- [8] Грицук, І.В., Погорельський, Д.С., Худяков, І.В., Білай, А.В. (2021). *Теплова підготовка суднового двигуна за допомогою теплового акумулятора фазового переходу*, Матеріали 12-ї Міжнародної науково-практичної конференції Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2021. Херсон.
- [9] Грицук, І.В., Гушин, А.М., Адров, Д.С., Вербовський, В.С., Краснокутська, З. І. (2014). Особливості математичного моделювання параметрів роботи контактної теплової акумулятора фазового переходу системи регулювання температури охолоджуючої рідини й моторної оливи ДВЗ. *Збірник наукових праць ДонІЗТ*, №37, 120-128.
- [10] Луняка, К.В., Ключев, О.І., Русанов, С.А., Ключева, О.О. (2020). Дослідження роботи теплового акумулятора системи передпускового прогріву двигуна внутрішнього згорання. *Теплофізика та теплоенергетика*, 42(3), 77-83. <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2020.9>.
- [11] Nawfal, Z.M., Nagentra, R.T., Vishnu, G. and Silaipillayarputhur, K. (2023). Design of Thermal Energy Storage System. *E3S Web of Conferences*, vol. 455, 02011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345502011>.
- [12] Virtanen, J. (2024). Thermal energy storage for cruise ship's cooling system. System design and operating principles. Master's thesis. Tampere. 109 p. Відновлено з <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202401051112>.
- [13] Thermal storage and heat pumps: a step towards zero-emission cruise ships. Відновлено з: <https://blog.sintef.com/ocean/thermal-storage-and-heat-pumps-a-step-towards-zero-emission-cruise-ships/>.
- [14] Catapano, F., Frazzica, A., Freni, A., Manzan, M., Micheli, D., Palomba, V., Sementa, P., Vaglieco, B.M. (2022). Development and experimental testing of a waste-heat recovery system for naval applications. *Applied Energy*, vol. 311, 118673. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118673>.
- [15] ДЕРЖАВНІ САНІТАРНІ ПРАВИЛА ДЛЯ МОРСЬКИХ СУДЕН УКРАЇНИ ДСП 7.7.4.-057-2000. ЗАТВЕРДЖЕНО Постанова Головного державного санітарного лікаря України 20.12.2000 N 57. Відновлено з <https://ips.ligazakon.net/document/MOZ12673>.
- [16] Борисов, В.С., Кузнецов, Г.В. (2024). Визначення раціональних структур схемних рішень енергетичних установок надводних кораблів при розкритті невизначеності цілі. *Збірник наукових праць НУК*, №3 (496), 51-58. [https://doi.org/10.15589/znp2024.3\(496\).7](https://doi.org/10.15589/znp2024.3(496).7).
- [17] Pape, A. (Ed.). (2019). *Jane's Fighting Ships 2019-2020*. Surrey: IHS Global.

© Кузнецов Г. В.

Дата першого надходження статті до видання: 13.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



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