

МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.4

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2026.2-29.01>

ВИБІР МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧИХ СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК СУДЕН НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЛЬНИХ КРИТЕРІЇВ

Г.В. Кузнецов

аспірант Навчально-наукового центру морської інфраструктури,
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
Миколаїв, Україна
ORCID ID: 0000-0002-1028-4102

Анотація

Метою роботи є підвищення енергетичної та екологічної ефективності суднових енергетичних установок відповідно до правил Міжнародної морської організації шляхом раціонального використання паливних ресурсів із застосуванням матеріалів із сукупністю раціональних теплофізичних та експлуатаційних властивостей у теплоакumuлюючих системах. Обґрунтовано вибір теплоакumuлюючого матеріалу на основі мультиплікативних інтегральних критеріїв, що відповідають ієрархічним рівням: матеріал, теплоакumuлятор і теплоакumuлююча система у складі енергетичної установки судна. Оцінка раціональності вибору матеріалу теплоакumuлюючої системи підтверджена відносною економією палива та індексом енергоефективності проєкту судна. Визначення теплоакumuлюючих матеріалів із фазовим переходом для різних температурних рівнів дає змогу ефективно використовувати в суднових енергетичних установках скидну теплоту низького потенціалу з різною інтенсивністю від відпрацьованих газів, охолоджувальної рідини та мастила, що дає змогу розширити функціональні можливості забезпечення потреб головних двигунів, дизель-генераторів, екіпажу та пасажирів. Використання визначених матеріалів з урахуванням сукупності їх характеристик: теплофізичних – температури плавлення, питомої масової теплоємності, питомої теплоти фазового переходу, густини та коефіцієнта теплопровідності; конструктивних – товщини шару й експлуатаційних – часів стоянки та ходу відповідно до експлуатаційного циклу – дає змогу забезпечити ефективні показники теплоакumuлюючої системи у складі суднової енергетичної установки. За раціональними схемними рішеннями теплоакumuлюючої системи та способами акумуляції теплоти з фазовим переходом від різних джерел теплоти – відпрацьованих газів, мастила й охолоджувальної рідини, а також з урахуванням умов роботи двигунів за експлуатаційними циклами визначено, що



забезпечення споживачів судна акумульованою теплотою дає змогу зменшити витрату палива допоміжних котлів від 5 до 64 % залежно від складу суднової енергетичної установки та призначення судна, а також забезпечити зниження значень індексу енергоефективності проєкту судна в середньому до 2 %.

Ключові слова: утилізація теплоти, енергоефективність, матеріали з фазовим переходом, теплові двигуни, загальносуднові та побутові потреби.

SELECTION OF MATERIALS FOR THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS IN MARINE POWER PLANTS BASED ON INTEGRAL CRITERIA

H.V. Kuznetsov

Phd Student of Educational and Scientific Center of Marine Infrastructure,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-1028-4102

Abstract

The aim of the study is to improve the energy and environmental efficiency of marine power plants in accordance with the regulations of the International Maritime Organization through the rational use of fuel resources by applying materials with a set of rational thermophysical and operational properties in thermal energy storage systems. The selection of a phase change material is substantiated based on multiplicative integral criteria corresponding to the hierarchical levels of material, thermal energy storage unit and thermal energy storage system within the marine power plant. The rationality of selecting the material for the thermal energy storage system is confirmed by the relative fuel savings and the Energy Efficiency Design Index. The determination of phase change materials for different temperature levels makes it possible to efficiently utilize low-potential waste heat of varying intensity from exhaust gases, cooling fluid and lube oil in marine power plants, thereby expanding the functional capabilities for meeting the demands of main engines, diesel generators, crew and passengers. The use of selected materials considering the combination of their characteristics – thermophysical properties, including melting temperature, specific heat capacity, latent heat of phase transition, density and thermal conductivity; design characteristics, including layer thickness and operational characteristics, including berthing and sailing times according to the operational cycle – makes it possible to ensure efficient performance of the thermal energy storage system as part of a marine power plant. Due to rational design solutions of the thermal energy storage system and methods of latent heat accumulation from various heat sources – exhaust gases, lube oil and cooling fluid – as well as considering engine operating conditions under operational cycles, it has been determined that supplying vessel consumers with stored thermal energy makes it possible to reduce the fuel consumption of auxiliary boilers by 5–64%, depending on the composition of the marine power plant and the vessel purpose, as well as to reduce the values of the Energy Efficiency Design Index by an average of up to 2%.

Key words: heat recovery, energy efficiency, phase change materials, heat engines, ship service and domestic demands.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. З огляду на масштаби та енергоємність світового флоту саме судноплавство стає однією з ключових галузей, на яку спрямовані сучасні науково-технічні ініціативи для досягнення вищих показників енергозбереження. Вимоги Міжнародної морської організації (ІМО) стосуються зниження витрати палива, обмеження викидів парникових газів та підвищення енергоефективності судових енергетичних установок (СЕУ).

Одним з актуальних напрямів зниження витрати палива й обмеження викидів парникових газів є утилізація теплоти із застосуванням у складі СЕУ теплоакуюлюючих систем (ТАС) на базі теплоакуюляторів із фазовим переходом, що дають можливість забезпечити передпускову підготовку двигунів СЕУ, загальносудові та побутові потреби для зниження експлуатаційного навантаження на допоміжні двигуни на ходу та під час стоянки в порту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання цієї проблеми, і виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Використанню ТАС з фазовим переходом та інших систем акумулювання теплоти в судових, транспортних і стаціонарних енергетичних установках присвячено значну кількість досліджень. У роботі [1] запропоновано застосування великооб'ємних теплоакуюляторів об'ємом 1000–2500 м³ для утилізації теплоти відпрацьованих газів у складі енергетичної установки торговельного судна. Показано, що залежно від об'єму акумулятора така система може зменшити витрати палива допоміжного котла на 60–90% та забезпечити річний економічний ефект близько 0,25 млн доларів США.

Перспективи використання ТАС на круїзних судах розглянуто у роботах [2–6]. Основну увагу приділено застосуванню теплоакуюлюючих матеріалів (ТАМ) для забезпечення потреб гарячого водопостачання, систем HVAC та використання скидної теплоти під час стоянки судна. У роботі [2] експериментально підтверджено збільшення енергоємності системи з приблизно 20 до понад 35 кВт·год/м³ за використання гібридної ТАС з ТАМ об'ємом 0,1 м³. Результати досліджень підтверджують можливість згладжування пікових теплових навантажень і зменшення споживання палива допоміжними енергетичними засобами.

Питання створення компактних модульних ТАС для судових умов досліджено в роботах [7; 8]. Розглянуто застосування плоско-пластинчастих теплоакуюляторів із ТАМ для утилізації теплоти відпрацьованих газів. Отримані значення питомої енергоємності на рівні 45–46 кВт·год/м³ свідчать про доцільність використання таких конструкцій у СЕУ, де важливими є обмеження за масою, об'ємом і компоновкою машинного відділення.

Інтегровані системи утилізації теплоти із застосуванням теплоакуюляторів у складі комбінованих енергетичних установок досліджено в роботах [9; 10]. У роботі [10] експериментально досліджено систему SE–ORC–TES для круїзних суден, у якій величина акумульованої теплоти становила близько 8,7 кВт·год, що відповідало 7,7 % загального енергоспоживання палива, а сумарна генерація електроенергії установками ORC та Stirling досягала близько 1 % енергії палива. Показано, що поєднання ТАС з іншими засобами утилізації скидної теплоти

може підвищити загальну ефективність енергетичної установки та забезпечити часткове покриття теплових потреб судна без додаткового використання допоміжних котлів.

Суміжні дослідження у сфері транспорту [11] підтверджують доцільність використання теплоаккумуляторів для скорочення тривалості прогріву двигунів після стоянки. Показано, що використання теплоаккумуляторів дає змогу скоротити час досягнення температури 70°C приблизно на 24,4 % після 4-годинного простою двигуна, що сприяє зменшенню витрат палива та теплових викидів.

Для стаціонарних і промислових теплоенергетичних систем у роботах [12, 13] розглянуто оптимізацію режимів зарядки та розрядки теплоаккумуляторів, а також застосування високотемпературних систем акумулювання теплоти. У роботі [12] показано, що адаптивне керування режимами роботи парових аккумуляторів дає змогу зменшити необхідний об'єм теплоаккумулятора на 15–25 %. Отримані результати є важливими для вибору режимів роботи ТАС та оцінювання їх ефективності в умовах змінного теплового навантаження.

Фундаментальні питання вибору ТАМ, формулювання задач фазового переходу, інтенсифікації теплопередачі та практичного застосування ТАС узагальнено в роботах [14–16]. У цих дослідженнях розглянуто органічні й неорганічні ТАМ, особливості процесів плавлення та кристалізації, а також методи покращення теплопередачі завдяки ребренню, пористим структурам, високотеплопровідним матрицям і конструктивній оптимізації теплообмінної поверхні.

Незважаючи на значну кількість досліджень, питання комплексної інтеграції ТАС у складі СЕУ з урахуванням експлуатаційного циклу судна, структури споживачів теплоти, режимів стоянки та руху, а також особливостей використання скидної теплоти залишаються недостатньо опрацьованими. Це обумовлює необхідність подальшого дослідження ефективності застосування ТАС у СЕУ з урахуванням реальних умов експлуатації.

Формулювання мети статті, постановка завдання. Метою дослідження є підвищення енергетичної та екологічної ефективності СЕУ відповідно до правил ІМО шляхом раціонального використання паливних ресурсів із застосуванням у ТАС матеріалів із фазовим переходом, що відповідають сукупності раціональних теплофізичних, конструктивних та експлуатаційних властивостей.

Для досягнення цієї мети визначено такі завдання:

1. Розробити метод вибору теплоакуюлюючих матеріалів із фазовим переходом для різних температурних діапазонів шляхом квантифікації мети та визначення мультиплікативних інтегральних критеріїв вибору матеріалів на основі їх теплофізичних, конструктивних та експлуатаційних властивостей.

2. Обґрунтувати доцільність застосування мультиплікативних інтегральних критеріїв вибору теплоакуюлюючих матеріалів, що відповідають ієрархічним рівням: матеріал, теплоаккумулятор і теплоакуюлююча система для СЕУ.

3. Виконати оцінку раціональності вибору матеріалу теплоакуюлюючої системи в складі СЕУ шляхом обґрунтування відносною економією палива та індексом енергоефективності проекту судна.

Об'єктом дослідження є процеси енергозбереження в ТАС та їх вплив на енергетичну й екологічну ефективність СЕУ.

Предметом дослідження є показники енергозбереження з урахуванням теплофізичних властивостей, конструктивних схем та експлуатаційних характеристик ТАС, що забезпечують економію палива допоміжних елементів СЕУ і зниження індексу енергоефективності проєкту судна.

Методи дослідження – системний аналіз та багатокритеріальна оптимізація з мультиплікативною побудовою інтегральних критеріїв.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Комплексна ефективність СЕУ визначається повнотою задоволення енергетичних потреб судна, його екіпажу та пасажирів за умови обмеження витрат енергоресурсів. При цьому більш ефективна СЕУ за фіксованих енергоресурсів забезпечує потреби в більшому обсязі. Це можливо шляхом забезпечення ширшої сукупності потреб окремих цілей, визначених квантифікацією. Таке послідовне виокремлення підцілей дає змогу отримати багаторівневу ієрархічну структуру елементів СЕУ з відповідними повними наборами вихідних даних для їх задоволення.

Головною особливістю енергетичних ресурсів на судні є їхня автономна обмеженість. Кількісним виразом цієї обмеженості є умова максимальної енергоємності ЕЕ у вигляді

$$EE = \frac{E}{V} \rightarrow \max ,$$

де E – сумарна енергія джерел (паливо, електроенергія, теплота), V – обсяг джерел енергії.

Стосовно i -го елемента акумулювання теплоти в СЕУ значення енергоємності виражається як

$$\frac{Q_i}{V_i} = \frac{q_i \cdot m_i}{V_i} = q_i \cdot \rho_i \rightarrow \max ,$$

де q_i – питома кількість теплоти, m_i – маса, ρ_i – густина матеріалу,

$q_i = c_{ртв} \cdot \Delta T_{тв} + r + c_{рідТМ} \cdot \Delta T_{рід}$ – сума зміни енергії внутрішнього та фазового переходу, c_p – питома ізобарна теплоємність, r – питома теплота фазового переходу, $\Delta T = T_{дж} - T_{пл}$ – температурний перепад, $T_{дж}$ – температура джерела, $T_{пл}$ – температура фазового переходу, індекси: $тв$ – твердий, $рід$ – рідина, $пл$ – плавлення, $дж$ – джерело.

Оскільки інтенсивність теплопередачі в ТАМ визначається величиною $\Delta T \rightarrow \max$, у разі обмеження значення $T_{дж}$ величина $T_{пл} \rightarrow \min$.

Вважаючи умову вибору критеріальної досконалості умовою «чим більше, тим краще», вираз критерію вибору теплоакumuлюючого матеріалу можна записати як

$$K_{ТАМi} = \frac{q_i \cdot \rho_i}{T_{плi}} \rightarrow \max .$$

Результати узагальнення представлені функціональною залежністю інтегрального критерію ТАМ від температурного перепаду на рис. 1. Матеріали з фазовим переходом за температурою плавлення були поділені на три групи – низькотемпературні, середньотемпературні та високотемпературні, що дає змогу використовувати їх для акумулювання теплоти охолоджувальної рідини, мастила та відпрацьованих газів.

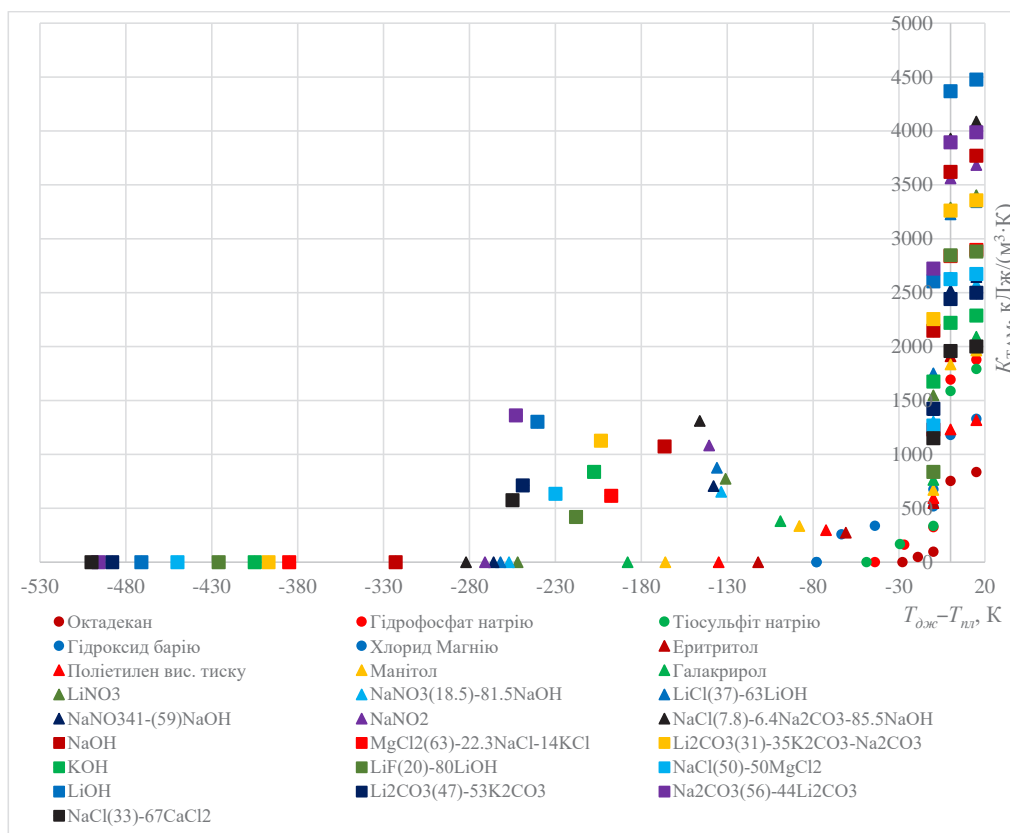


Рис. 1. Залежність інтегрального критерію K_{TAM} від температурного перепаду для теплоакуюючих матеріалів ● – низькотемпературні ($T_{дж} = 273\text{--}380\text{ K}$), ▲ – середньотемпературні ($T_{дж} = 273\text{--}545\text{ K}$), ■ – високотемпературні ($T_{дж} = 273\text{--}763\text{ K}$)

На першому ієрархічному рівні дослідження вибір теплоакуюючого матеріалу за інтегральним критерієм K_{TAM} здійснюється відповідно до таких його теплофізичних характеристик: температури плавлення, питомої масової теплоємності, питомої теплоти фазового переходу та густини.

Для другого ієрархічного рівня теплообмін у теплоакуючому здійснюється через теплопровідність, інтенсивність якої обернено пропорційна тепловому опору. Для процесів теплообміну з фазовим переходом загальний тепловий опір складається з теплових опорів твердої та рідкої фаз

$$R_T = \frac{\delta_{ms}}{\lambda_{ms}} + \frac{\delta_{pid}}{\lambda_{pid}},$$

де δ , λ – відповідно товщина та коефіцієнт теплопровідності ТАМ, $\delta = \delta_{ms} + \delta_{pid}$ та дорівнює конструктивній товщині шару матеріалу в капсулі теплоакуюлятора, що наведена на рис. 2 вид А.

Оскільки значення коефіцієнта теплопровідності твердої фази ТАМ є більшим, ніж аналогічне значення для рідкої фази, а товщина шару змінюється, залежність загального термічного опору від рідкої масової частки ТАМ наведено на рис. 3.

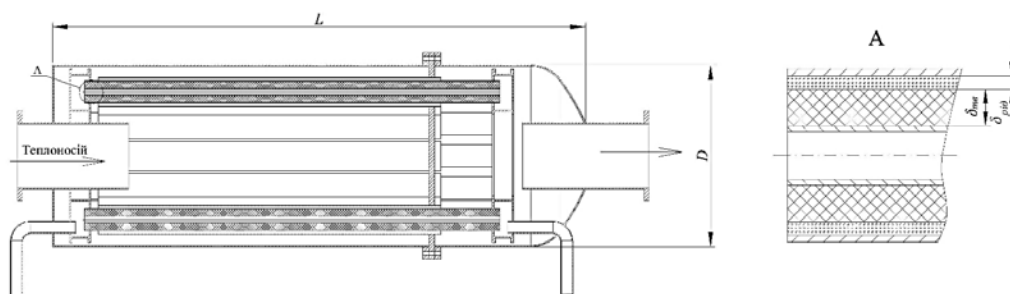


Рис. 2. Схема теплокумулятора з фазовим переходом ТАМ

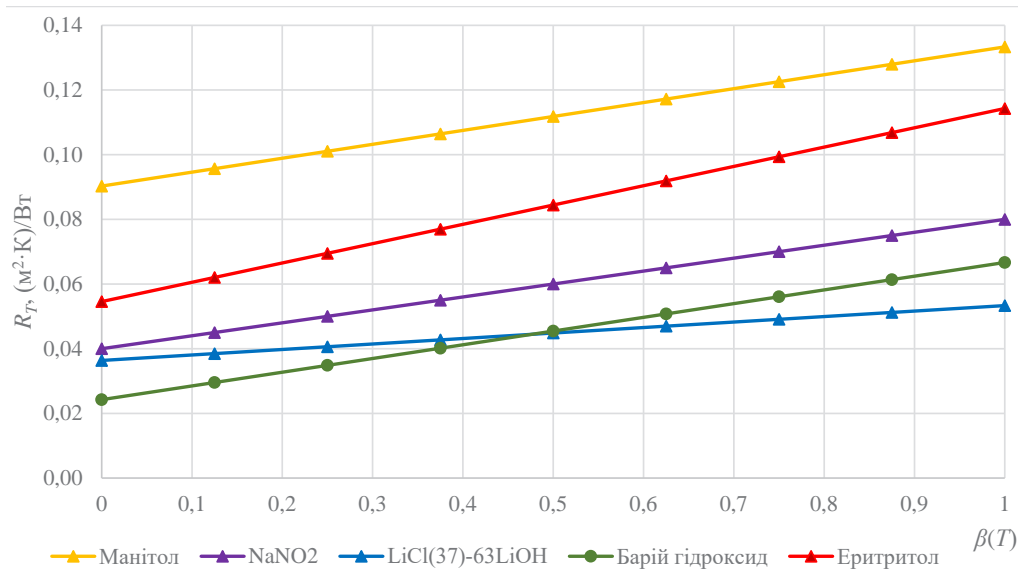


Рис. 3. Залежність R_T від рідкої масової частки

Виходячи з цього, під час оптимізації теплофізичних властивостей ТАМ для визначення масогабаритних показників теплокумуляторів доцільно застосовувати мультиплікативний інтегральний критерій такого вигляду

$$K_{TA} = \frac{K_{TAM}}{R_T},$$

залежність якого від температурного перепаду за початкової товщини ТАМ $\delta = 40$ мм показано на рис. 4.

Умови використання ТАС як підсистеми СЕУ визначаються умовами експлуатації її основних і допоміжних елементів. Тому вид мультиплікативного інтегрального критерію оптимізації на цьому ієрархічному рівні повинен враховувати не лише потужність головних двигунів, дизель-генераторів і допоміжних котлів, які визначають рівень утилізованої теплоти, але й співвідношення інтервалів часу їх експлуатації на ходових режимах і під час стоянки відповідно

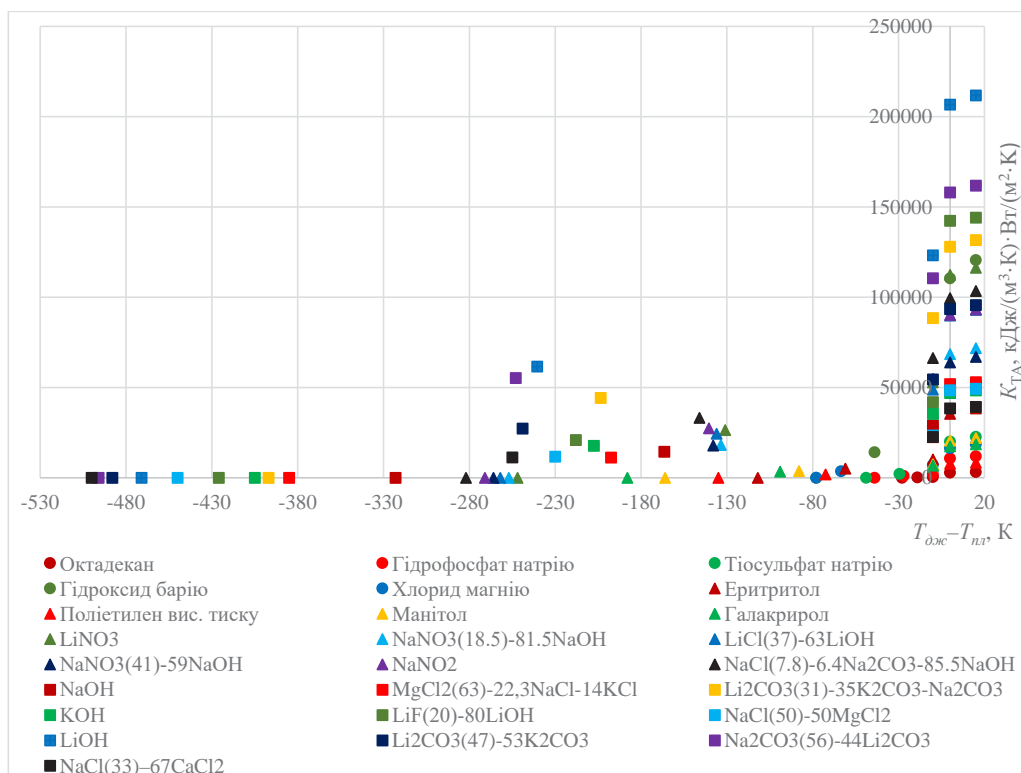


Рис. 4. Залежність інтегрального критерію K_{TA} від температурного перепаду

до експлуатаційного циклу. Цей цикл в узагальненому вигляді можна подати у вигляді виразу

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

де τ_1 – вихід судна з порту; τ_2 – перехід до району плавання; τ_{31} – рух з економічним ходом; τ_{32} – рух із максимальним ходом; τ_{33} – перебування судна в дрейфі; τ_{34} – виконання швартовних операцій; τ_4 – зворотний перехід до кінцевого порту; τ_5 – захід судна в порт.

Врахування співвідношень інтервалів часу робочих режимів і стоянок характеризує співвідношення часу накопичення та віддачі теплоти споживачам ТАС. Вплив співвідношення часу накопичення та віддачі теплоти в інтегральному критерії ТАС враховується виразом

$$K_{TAC} = K_{TA} \cdot \frac{\tau_{cmi}}{\tau_{ходi}},$$

де τ_{cmi} та $\tau_{ходi}$ – відповідно час стоянки та час руху відповідно до i -го етапу експлуатаційного циклу.

Характеристики K_{TAC} за співвідношення $\tau_{cmi}/\tau_{ход} = 0,17$ для експлуатаційного циклу судна наведено на рис. 5.

Сукупність запропонованих трьох інтегральних критеріїв дає змогу на етапі науково-дослідних робіт вибрати наявні ТАМ або скласти технічне завдання на

розробку нових матеріалів із заданими теплофізичними властивостями, а на етапі дослідно-конструкторських робіт вибрати ТАМ для проєктованих або модернізованих енергетичних установок суден.

Отримані результати досліджень дають змогу уточнити масогабаритні та термогазодинамічні характеристики теплоаккумуляторів як окремих елементів ТАС, так і самої системи в складі СЕУ.

Інтегральні показники ТАМ і теплоаккумулятора ТАС для головних судових двигунів у системі газовихлопу наведено в таблиці 1.

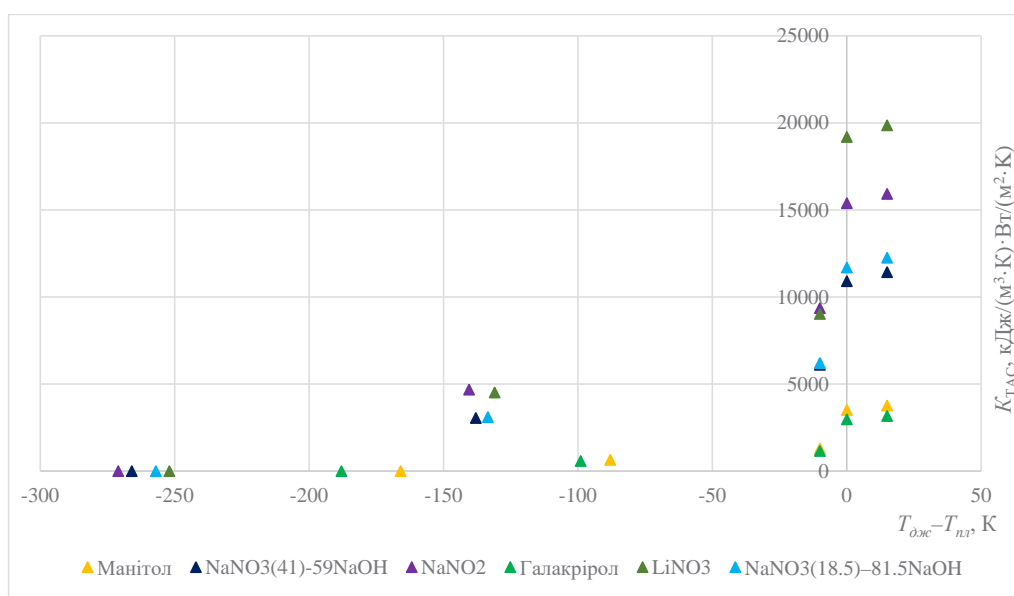


Рис. 5. Залежність інтегрального критерію $K_{ТАС}$ від перепаду температур відпрацьованих газів, що відповідають потужності енергетичної установки, швидкості ходу та плавлення ТАМ на ділянці експлуатаційного циклу, де $\tau_{ст}/\tau_{ход} = 0,17$

На основі їх раціональних значень проводиться оцінка показників відносної економії палива та індексу енергоефективності проєкту судна (EEDI), які наведено в таблиці 2.

За раціональними схемними рішеннями теплоакуюлюючої системи та способами акумуляції теплоти з фазовим переходом від її різних джерел – відпрацьованих газів, мастила й охолоджувальної рідини, а також з урахуванням умов роботи двигунів за експлуатаційними циклами визначено економію палива допоміжних елементів СЕУ з використанням ТАС. З урахуванням забезпечення теплотою ТАС споживачів на судні економія палива допоміжних котлів залежить від складу СЕУ та призначення судна і може становити від 5 до 64 %.

Згідно з концепцією необхідного показника індексу енергоефективності проєкту судна, коефіцієнта зниження, граничних значень та етапів виконання вимог на період 2025–2030 років відповідні значення для типів суден – круїзний лайнер, балкер, танкер – становлять 1,02; 0,37; 0,28 [17]. За результатами розрахунків, що

наведені в таблиці 2, впровадження ТАС на цих суднах може забезпечити зниження індексу енергоефективності проекту судна до 2,2 %, 1,1 % та 1,8 % відповідно завдяки зниженню загального використання палива в СЕУ.

Таблиця 1

Інтегральні показники ТАМ і теплоаккумулятора ТАС

Двигун MAN	Теплоаккумуляційний матеріал	$K_{ТАМ}, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$	$K_{ТА}, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	Потенціал акумульованої теплоти, кДж
32/44 9L	манітол $\text{C}_6\text{H}_8(\text{OH})_6$	1749	17218	$7,86 \cdot 10^6$
	нітрит натрію NaNO_2	3395	75443	$1,09 \cdot 10^7$
	сіль $\text{LiCl}(37)\text{--}63\text{LiOH}$	3088	75480	$1,20 \cdot 10^7$
S60ME-C8.5	манітол $\text{C}_6\text{H}_8(\text{OH})_6$	1771	23069	$7,12 \cdot 10^6$
	еритритол $\text{C}_4\text{H}_6(\text{OH})_4$	1829	39432	$7,27 \cdot 10^6$
	барій гідроксид $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	2496	121106	$9,57 \cdot 10^6$
6G60ME-C9.5	манітол $\text{C}_6\text{H}_8(\text{OH})_6$	1771	23069	$8,35 \cdot 10^6$
	еритритол $\text{C}_4\text{H}_6(\text{OH})_4$	1829	39432	$8,60 \cdot 10^6$
	барій гідроксид $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	2496	121106	$1,11 \cdot 10^7$

Таблиця 2

Показники відносної економії палива та індекс енергоефективності проекту судна для вибраних типів суден

Тип судна	Кількість персоналу на судні під час стоянки, %	$K_{ТАС}$	Паливо, зеконмлене під час рейсу, т	Відносна економія палива допоміжних котлів за рейс, %	Значення EEDI		
					необхідний	досягнутий	виконаний
Круїзний лайнер	50–75	7379	0,530	44,52–29,68	15,87	10,16	10,146–10,145
		32333	0,740	60,70–41,26			10,140–10,139
		32349	0,810	64,77–45,32			10,139–10,138
Балкер	75–100	11079	0,354	9,72–9,69	3,94	3,72	3,7170
		18937	0,362	9,94–6,81			3,7169
		58163	0,472	12,96–8,88			3,7161
Танкер	75–100	9662	0,461	7,41–5,48	3,64	2,81	2,8062
		16516	0,474	7,63–5,64			2,8060
		50725	0,614	9,88–7,31			2,8049

Висновки

1. Запропоновано метод вибору теплоакумуючих матеріалів із фазовим переходом для різних температурних рівнів, який дає змогу раціонально використовувати в суднових енергетичних установках скидку теплоту різних потенціалів від відпрацьованих газів, охолоджувальної рідини та мастила, що дає змогу розширити функціональні можливості забезпечення потреб головних двигунів, дизель-генераторів, загальносуднових систем, екіпажу та пасажирів.

2. Обґрунтовано застосування теплоакумуючих матеріалів для теплоакуючої системи у складі суднової енергетичної установки з урахуванням таких характеристик: теплофізичних – температури плавлення, питомої масової теплоємності, питомої теплоти фазового переходу, густини та коефіцієнта теплопровідності; конструктивних – товщини шару й експлуатаційних – часу стоянки та ходу згідно з експлуатаційним циклом на підставі отриманих оцінок показників відносної економії палива та індексу енергоефективності проекту судна.

3. За раціональними схемними рішеннями теплоакуючої системи та способами акумуляції теплоти з фазовим переходом від різних джерел теплоти – відпрацьованих газів, мастила й охолоджувальної рідини, а також з урахуванням умов роботи двигунів за експлуатаційними циклами визначено, що забезпечення споживачів судна акумульованою теплотою дає змогу зменшити витрату палива допоміжних котлів від 5 до 64 % залежно від складу СЕУ та призначення судна, а також забезпечити зниження значень індексу енергоефективності проекту судна в середньому до 2 %.

ЛІТЕРАТУРА

1. Baldi F., Gabrielli C., Melino F., Bianchi M. A preliminary study on the application of thermal storage to merchant ships. *Energy Procedia*. 2015. Vol. 75. P. 2169–2174. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.364.
2. Frazzica A., Manzan M., Palomba V., Brancato V., Freni A., Pezzi A., Vaglieco B.M. Experimental validation and numerical simulation of a hybrid sensible-latent thermal energy storage for hot water provision on ships. *Energies*. 2022. Vol. 15. 2596. DOI: 10.3390/en15072596.
3. Manzan M., Pezzi A., Zandegiacomo de Zorzi E., Freni A., Frazzica A., Vaglieco B.M., Lucio Z., Claudio D. Potential of thermal storage for hot potable water distribution in cruise ships. *Energy Procedia*. 2018. Vol. 148. P. 1105–1112. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.08.044.
4. Virtanen J. *Thermal energy storage for cruise ship's cooling system: system design and operating principles*: master's thesis. Tampere, 2024. 109 p.
5. Thermal storage and heat pumps: a step towards zero-emission cruise ships. URL: <https://blog.sintef.com/ocean/thermal-storage-and-heat-pumps-a-step-towards-zero-emission-cruise-ships/> (дата звернення: 01.05.2026).
6. Brancato V., Fotia A., Palomba V., La Rosa D., Costa F., Frazzica A. Investigation on a thermal energy storage system to maximize the use of vessels' waste heat in port and during hoteling operations. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2893. 012021. DOI: 10.1088/1742-6596/2893/1/012021.

7. Ciappi L., Niknam P., Fisher R., Sciacovelli A. Application of flat plate latent heat thermal energy storage for waste heat recovery and energy flexibility in maritime sector. *Proceedings of the 36th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. Las Palmas de Gran Canaria, 2023. P. 2342–2353. DOI: 10.52202/069564-0211.
8. Nawfal Z.M., Nagentra R.T., Vishnu G., Silaipillayarputhur K. Design of thermal energy storage system. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 455. 02011.
9. Catapano F., Frazzica A., Freni A., Manzan M., Micheli D., Palomba V., Sementa P., Vaglieco B.M. Development and experimental testing of a waste-heat recovery system for naval applications. *Applied Energy*. 2022. Vol. 311. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.118673.
10. Revisiting thermal energy storage for vessel propulsion. URL: <https://maritime-executive.com/editorials/revisiting-thermal-energy-storage-for-vessel-propulsion> (дата звернення: 01.05.2026).
11. Kosztyła T., Tutaj J. An application of the heat accumulator and improvement of the DC-DC converter for hybrid-electric vehicles. *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2016. Vol. 23, No. 3. P. 263–270. DOI: 10.5604/12314005.1216492.
12. Sun W., Hong Y., Wang Y. Operation optimization of steam accumulators as thermal energy storage and buffer units. *Energies*. 2017. Vol. 10, No. 1. 17. DOI: 10.3390/en10010017.
13. Gil A., Medrano M., Martorell I., Lázaro A., Dolado P., Zalba B., Cabeza L.F. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1: Concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14. P. 31–55.
14. Agyenim F., Hewitt N., Eames P., Smyth M. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14. P. 615–628.
15. Elarem R., Alqahtani T., Mellouli S., Askri F., Edacherian A., Vineet T., Badruddin I. A., Abdelmajid J. A comprehensive review of heat transfer intensification methods for latent heat storage units. *Energy Storage*. 2020. DOI: 10.1002/est2.127.
16. Zalba B., Marín J.M., Cabeza L.F., Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*. 2003. Vol. 23. P. 251–283. DOI: 10.1016/S1359-4311(02)00192-8.
17. IMO Train the Trainer (TTT) Course on Energy Efficient Ship Operation. Module 2 – Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines. London: International Maritime Organization, 2016.

REFERENCES

1. Baldi, F., Gabriellii, C., Melino, F., Bianchi, M. (2015). A preliminary study on the application of thermal storage to merchant ships. *Energy Procedia*, 75, 2169–2174. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.364.
2. Frazzica, A., Manzan, M., Palomba, V., Brancato, V., Freni, A., Pezzi, A., Vaglieco, B.M. (2022). Experimental validation and numerical simulation of a hybrid sensible-latent thermal energy storage for hot water provision on ships. *Energies*, 15, 2596. DOI: 10.3390/en15072596.
3. Manzan, M., Pezzi, A., Zandegiacomo de Zorzi, E., Freni, A., Frazzica, A., Vaglieco, B.M., Lucio, Z., Claudio, D. (2018). Potential of thermal storage for hot potable water distribution in cruise ships. *Energy Procedia*, 148, 1105–1112. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.08.044.
4. Virtanen, J. (2024). *Thermal energy storage for cruise ship's cooling system: System design and operating principles* (Master's thesis). Tampere.
5. 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/>.
6. Brancato, V., Fotia, A., Palomba, V., La Rosa, D., Costa, F., Frazzica, A. (2024). Investigation on a thermal energy storage system to maximize the use of vessels' waste heat in port and during hoteling operations. *Journal of Physics: Conference Series*, 2893, 012021. DOI: 10.1088/1742-6596/2893/1/012021.
7. Ciappi, L., Niknam, P., Fisher, R., Sciacovelli, A. (2023). *Application of flat plate latent heat thermal energy storage for waste heat recovery and energy flexibility in maritime sector*. Proceedings of the 36th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. DOI: 10.52202/069564-0211.
8. Nawfal, Z.M., Nagentra, R.T., Vishnu, G., Silaipillayarputhur, K. (2023). *Design of thermal energy storage system*. E3S Web of Conferences.
9. 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*, 311. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.118673.
10. Revisiting thermal energy storage for vessel propulsion. Retrieved from <https://maritime-executive.com/editorials/revisiting-thermal-energy-storage-for-vessel-propulsion>.
11. Kosztyła, T., Tutaj, J. (2016). An application of the heat accumulator and improvement of the DC-DC converter for hybrid-electric vehicles. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 23(3), 263–270. DOI: 10.5604/12314005.1216492.
12. Sun, W., Hong, Y., Wang, Y. (2017). Operation optimization of steam accumulators as thermal energy storage and buffer units. *Energies*, 10(1), 17. DOI: 10.3390/en10010017.
13. Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lázaro, A., Dolado, P., Zalba, B., Cabeza, L. F. (2010). State of the art on high temperature thermal energy

- storage for power generation. Part 1: Concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 31–55.
14. Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., Smyth, M. (2010). A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 615–628.
 15. Elarem, R., Alqahtani, T., Mellouli, S., Askri, F., Edacherian, A., Vineet, T., Badruddin, I.A., & Abdelmajid, J. (2020). A comprehensive review of heat transfer intensification methods for latent heat storage units. *Energy Storage*. DOI: 10.1002/est2.127.
 16. Zalba, B., Marín, J.M., Cabeza, L.F., Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23, 251–283. DOI: 10.1016/S1359-4311(02)00192-8.
 17. International Maritime Organization. (2016). IMO Train the Trainer (TTT) course on energy efficient ship operation. Module 2 – Ship energy efficiency regulations and related guidelines. London: International Maritime Organization.

Дата першого надходження статті до видання: 24.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 01.07.2026