

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 697.329

Еколого-енергетичне обґрунтування доцільності застосування термоаккумуляторів з матеріалами з фазовим переходом

Я. О. Глек^{1✉}, Б. А. Квасницький², С. А. Крюковська-Тележенко³, О. А. Герасименко⁴^{1,3,4}Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона 4, м. Одеса, 65029, Україна;²Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна 112, м. Одеса, 65039, Україна;✉ e-mail: ¹glek@odaba.edu.uaORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-7508-6350>; ²<https://orcid.org/0009-0003-5556-396X>;³<https://orcid.org/0009-0008-9963-4471>; ⁴<https://orcid.org/0009-0000-8555-4309>

Робота присвячена еколого-енергетичному аналізу з метою обґрунтування доцільності впровадження теплоаккумуляторів з матеріалом з фазовим переходом (МФП), а також з композиційним МФП, як елементів сонячних теплових систем. Порівняння виконувалося для трьох наступних варіантів: традиційний рідинний бак-теплоаккумулятор, теплоаккумулятор з парафіном як МФП та теплоаккумулятор з композиційним МФП парафін/терморозширений графіт (ТРГ) в кількості 4 % мас. В роботі показано, що питома теплоємність у діапазоні температур від 30 до 60 °С для теплоаккумулятора з МФП у 2,06 рази вища для парафіну та у 2,54 рази вища для парафіну/ТРГ, порівняно з теплоємністю рідинного бака-теплоаккумулятора з водним розчином етиленгліколю (під час розрядки теплоаккумулятора). Показано, що термоаккумулятори з МФП є більш перспективними та характеризуються меншими масо-габаритними розмірами, ніж рідинні баки-теплоаккумулятори на одиницю теплоти, що зберігається. При виробництві теплоаккумуляторів з МФП буде створено менше емісії парникових газів на одиницю збереженого тепла, ніж для рідинних баків-теплоаккумуляторів. Питома емісія парникових газів на одиницю теплоти, що зберігається, для теплоаккумулятора з парафіном як МФП на 16,9% нижча, а для теплоаккумулятора з парафіном/ТРГ як МФП на 25,7% нижча, ніж для рідинного бака-теплоаккумулятора з водним розчином етиленгліколю (під час розряду). Отримані результати можуть бути корисними під час проектування систем теплопостачання у випадках, коли є нестабільне надходження теплової енергії від сонячних колекторів.

Ключові слова: Теплоакмулювання; Сонячна система теплопостачання; Матеріал з фазовим переходом; Енергетична ефективність; Парафін; Екологічний аналіз

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v61i3.3277>

© The Author(s) 2025. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

1. Вступ

Термоакмулювання в системах опалення та гарячого водопостачання приватного будинку забезпечує оптимальне використання теплової енергії, зменшуючи пікові навантаження на джерела теплопостачання. Застосування теплоаккумулятора підвищує енергоефективність будівлі, сприяє зниженню витрат первинних енергоносіїв та створює

умови для інтеграції відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних колекторів.

Ефективність теплоаккумуляторів є ключовим моментом для доцільності їх впровадження. Перспективними є теплоакмулювальні матеріали з фазовим переходом (МФП) та добавками речовин для підвищення теплопровідності, які активно вивчаються останніми роками [1, 2].

Основними критеріями, що пред'являються

до композитних матеріалів з фазовим переходом є високі значення ентальпії фазового переходу та теплопровідності. Крім того, МФП повинні відповідати технологічним характеристикам для їх застосування в теплоаккумуляторах: агрегативна стабільність, низька токсичність та хімічна активність, відсутність або мінімальний витік МФП при їх плавленні тощо. Однак, після прийняття Паризької угоди (2015), яка регулює викиди парникових газів, найважливішим етапом впровадження нових матеріалів у промисловість є також екологічне обґрунтування їх доцільності.

На жаль, екологічний аналіз не розглядався в багатьох раніше опублікованих роботах, присвячених доцільності впровадження теплоаккумуляторів, незважаючи на його важливість. У цьому дослідженні екологічний аналіз було застосовано з урахуванням результатів, отриманих експериментально для модельного теплоаккумулятора, та опублікованих у [1].

Під час проектування системи теплопостачання з сонячними колекторами та теплоаккумулятором можна акумулювати тепло, отримане від сонячних колекторів, та одночасно подавати його в контур опалення будівель. Наприклад, доцільно використовувати теплоносії, нагрітий в теплоаккумуляторі, в системі підлогового опалення вночі.

Однак на сьогодні на ринку переважно представлені рідинні баки-теплоаккумулятори. А перспективні теплоаккумулятори з МФП знаходяться переважно на стадії впровадження у практику.

Метою даної роботи був еколого-енергетичний аналіз для обґрунтування доцільності впровадження теплоаккумуляторів з МФП, а також з композиційним МФП, як елементів сонячних теплових систем.

2. Опис системи опалення з теплоаккумулятором та об'єктів дослідження

При конструюванні системи теплопостачання з сонячними колекторами та теплоаккумуляторами існує можливість одночасно акумулювати сонячну енергію та направляти її в контур обігріву [3]. В [4] рекомендується використання схеми з нагріванням зворотного трубопроводу. У системі з нагріванням зворотного трубопроводу опалювальний контур нагрівається у котлі. Сонячна енергія підводиться в опалювальний контур, якщо температура у зворотному трубопроводі опалю-

вального контуру нижча, ніж температура у водонагрівачі (рис. 1).

Для аналізу був прийнятий приватний будинок з наступними характеристиками. Район будівництва – Одеська область, орієнтація головного фасаду – на південь, розрахункова температура зовнішнього повітря для холодного періоду року $t_{ext} = -21^{\circ}\text{C}$ [5], розрахункова температура в житлових приміщеннях 20°C , у приміщеннях з постійним знаходженням людини (хол, котельня, гардеробна) – 18°C , площа жилих приміщень будинку – $109,93\text{ м}^2$.

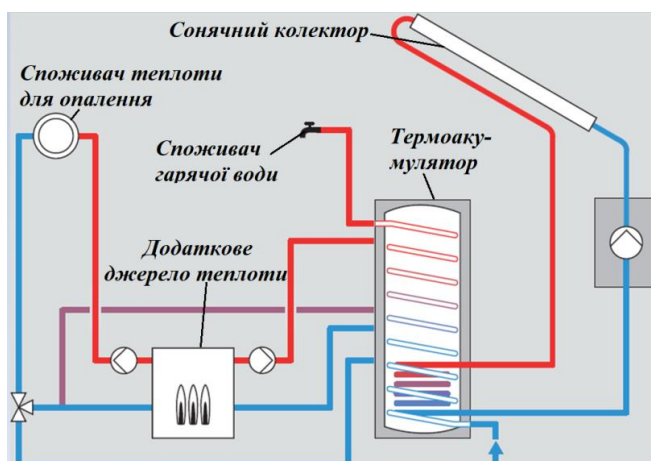


Рисунок 1 – Система з нагріванням зворотного трубопроводу [3]

Стіни виконані з силікатної цегли з зовнішньою штукатуркою товщиною $0,5\text{ м}$. Вікна з подвійним склінням, дерев'яні. Підлога першого поверху розташована на ґрунті з шаром утеплювача товщиною 10 см . Розрахунок теплових втрат будинком проводився відповідно до методики [6]. Теплова потужність системи опалення склала $10,025\text{ кВт}$. Результати розрахунку потужності системи опалення та гарячого водопостачання по місяцях наводяться у таблиці 1.

Для екологічного аналізу було прийнято такі варіанти застосування теплоаккумулятора у системі теплопостачання приватного будинку з сонячними колекторами:

- 1) бак-аккумулятор з теплоносієм (етиленгліколь/вода $40/60\text{ мас.}\%$);
- 2) теплоаккумулятор з парафіном як теплоаккумулятивним МФП; так як на ринку не пропонується стандартних конструкцій теплоаккумуляторів з МФП, то на даному етапі використовувався бак термоаккумулятор (у розрізі наведено на рис. 2)

Таблиця 1 – Навантаження на систему опалення та гарячого водопостачання по місяцях

Місяць	Кількість днів опалювання в місяці	Середньомісячне навантаження на систему опалення, кВт	Витрати теплоти на опалення за місяць, кВт·год	Витрати теплоти на ГВП за місяць, кВт·год	Витрати теплоти на опалення та ГВП за місяць, кВт·год
Січень	31	4.30	3202	681	3883
Лютий	28	4.01	2695	553	3248
Березень	31	3.00	2237	673	2910
Квітень	15	1.71	616	631	1248
Травень	-	-	-	607	607
Червень	-	-	-	569	569
Липень	-	-	-	509	509
Серпень	-	-	-	522	522
Вересень	-	-	-	515	515
Жовтень	15	1.05	379	573	952
Листопад	30	2.52	1813	593	2406
Грудень	31	3.50	2638	666	3304
Сумарні витрати енергії			13579 кВт·год/рік	7095 кВт·год/рік	20674 кВт·год/рік

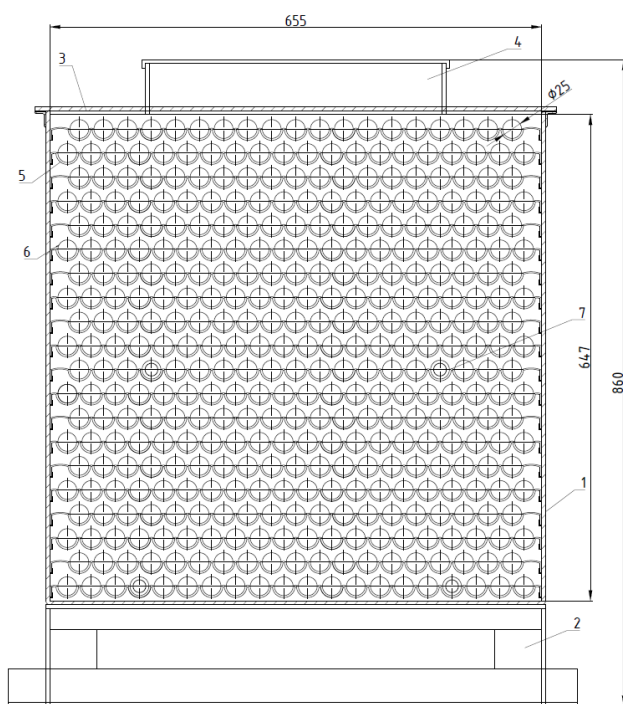


Рисунок 2 – Загальний вигляд теплоакумулятора з фазовим переходом у розрізі: 1 – корпус; 2 – підставка; 3 – кришка; 4 – повітряний демпфер; 5 – утримувачі; 6 – елемент теплового блоку; 7 – змішувик з теплоносієм

Теплоакумуляувальні елементи заповнюються матеріалом з фазовим переходом (парафіном з температурою плавлення 53 °С), а корпус – водою.

3) теплоакумулятор з парафіном з вмістом терморозширеного графіту (ТРГ) 4 % мас. для покращення теплопровідності як теплоакумулятивним КМФП; конструкція теплоакумулятора аналогічна попередньому.

Оцінку доцільності застосування теплоакумулятора з різними МФП було проведено у порівнянні з типовим рідинним баком-теплоакумулятором виробництва Termico (ТА 570) об'ємом 570 л. Інформація про властивості МФП була взята з [7]. Властивості теплоносія (водний розчин етиленгліколя) були розраховані за допомогою бази даних REFPROP [8].

Принцип роботи теплоакумулятора, який аналізується у роботі, був наступним: вдень теплоносії із системи опалення циркулює через сонячні колектори, після яких розділяється на два потоки. Перший потік проходить через міжтрубний простір теплоакумулятора, другий потік подається в систему опалення. Вночі теплоносії циркулює виключно через теплоакумулятор, відбираючи тепло від МФП та використовуючи його в системі теплої підлоги.

Для визначення термоакумулятивної здатності матеріалів потрібно виконати розрахунок потрібної площі сонячних колекторів. Розрахунок системи сонячного гарячого водопостачання виконувався за [9]. Річні витрати енергії на гаряче во-

допостачання склали $Q = 7095$ кВт·год. Річний приток сумарної сонячної радіації на горизонтальну поверхню для Одеси приймався за [9] $H = 1355$ кВт·год/м². Загальна площа поверхні сонячних колекторів (плаский з одинарним скляним покриттям) відповідно до методики [10] складала $F = 20,7$ м².

Для сонячної системи з вакуумних трубчастими колекторами цей діапазон становить від 70 до 90 л на квадратний метр площі абсорбера.

3. Методи дослідження

Як базова модель для аналізу використовувалася методика розрахунку повної еквівалентної емісії парникових газів (ПЕЕПГ) [11].

Методика розрахунку ПЕЕПГ пропонує розглядати весь технологічний ланцюжок виробництва продукту (наприклад, виробництва холоду). При цьому автори враховують викиди парникових газів при створенні та утилізації виробничого обладнання, споруд тощо, викиди при виробництві продукції на цьому обладнанні, еквівалентні викиди праці робітників.

Загальна залежність для розрахунку ПЕЕПГ може бути записана у вигляді суми різних вкладів в еквівалентну емісію парникових газів за життєвий цикл обладнання, яке виробляє певну продукцію:

$$\begin{aligned} \text{ПЕЕПГ} = & \beta \cdot \sum \left[e_{\text{ВВП}} \cdot \left(c_i^{\text{обл}} + c_i^{\text{обл.утил}} \right) + e^{\text{лп}} \cdot n_i^{\text{лп}} \right] + \\ & + e_{\text{ВВП}} \cdot \beta \cdot \sum c_i^{\text{обл}} (k_{\text{амр}} + k_{\text{рем}}) + \\ & + e_{\text{ВВП}} \cdot \beta \cdot \tau \sum (c_j \cdot G_j \cdot n) + \\ & + \sum \left[m_k^{\text{обл}} \cdot \text{GWP}_k \cdot (1 - \alpha) \right] + \\ & \beta \cdot e^{\text{лп}} \cdot T^{\text{лп}} + e_{\text{GDP}} \cdot \beta \cdot c^{\text{пр.утил}} \cdot n \cdot \tau, \end{aligned} \quad (1)$$

де β – середній коефіцієнт непрямих викидів парникових газів для певного регіону (країни), кгСО₂екв/кВт·год; $e_{\text{ВВП}}$ – енергоємність ВВП, кВт·год /US\$; $c_i^{\text{обл}}$ – вартість i -го елемента (обладнання) розглянутої системи, US\$; $k_{\text{амр}}$ та $k_{\text{рем}}$ – коефіцієнти, що враховують річні витрати (від інвестицій), необхідні для амортизації та ремонту елементів системи, рік⁻¹; τ – термін експлуатації обладнання розглянутої системи, років; $c_i^{\text{обл.утил}}$ – вартість утилізації i -го елемента (обладнання) розглянутої системи, US\$; $e^{\text{лп}}$ – енергетичний еквівалент людської праці, кВт·год/люд.год; $T^{\text{лп}}$ –

витрати праці на виготовлення i -го елемента (обладнання), люд.год; c_j – витрати на виробництво сировини, напівфабрикату, енергетичних ресурсів j -го типу, необхідних для виготовлення продукту в системі, що розглядається, US\$ на одиницю сировини; G_j – витрата сировини, матеріалів, напівфабрикатів, енергетичних ресурсів j -го типу під час виготовлення одиниці виробу; n – річна потужність заводу, кількість продукції за рік; m_k – маса парникових газів k -типу, які викидаються під час виробництва одиниці продукту, кг на одиницю продукту; GWP_k – це GWP k -типу парникового газу, кгСО₂екв на кг ПГ; $m_k^{\text{обл}}$ – маса парникового газу k -типу в обладнанні на момент його утилізації, кг; α – кількість утилізованого холодоагенту; $T^{\text{лп}}$ – трудовитрати, необхідні для виготовлення продукції, люд.годин на рік; $c^{\text{пр.утил}}$ – вартість утилізації продукції, US\$.

У цьому дослідженні розглядалося завдання дослідження еколого-енергетичної доцільності використання різних теплоакумуючих матеріалів у теплоакумуляторах. У цьому випадку достатньо оцінити непрямую емісію парникових газів, пов'язану з виробництвом самого термоаккумулятора та теплоакумуючих матеріалів, використовуючи, як вихідну інформацію, дані про їх вартість [12]

Для еколого-енергетичного порівняння було запропоновано новий критерій – питомі викиди СО₂ при створенні теплоаккумулятора на одиницю енергії, що в ньому зберігається

$$em_{\text{TES}} = \frac{\sum em_i \cdot m_i}{Q_{\text{TES}}}, \quad (2)$$

де em_i – виробничі викиди СО₂ для i -го матеріалу, витраченого при виробництві теплоаккумуляторної системи, (кг СО₂) (кг матеріалу)⁻¹; m_i – маса i -го матеріалу, витраченого при виробництві теплоаккумуляторної системи, кг; Q_{TES} – кількість енергії, що акумулюється теплоаккумулятором за одну зарядку/розрядку в певному інтервалі температур, МДж.

Пряма пропорційність між ціною матеріалу та втіленою в матеріалі енергією, а також вуглецевим слідом матеріалу та втіленою в матеріалі енергією показана Гутовськи та ін. [13].

$$\sum_i em_i \cdot m_i = em_{\text{GDP}} \cdot c_j, \quad (3)$$

де c – первинна вартість комплектуючих обладнання, \$; em_{GDP} – величина вуглецевості

валового внутрішнього продукту ВВП для країни, для якої виконується аналіз, $(\text{кг CO}_2) \cdot \$^{-1}$. Значення em_{GDP} (викидів CO_2 на 1 долар США ВВП) для деяких країн було таким: Франція – 0,12; Індія – 0,94; Норвегія – 0,09; Китай – 0,76; Україна – 1,88; США – 0,25 відповідно [14].

Розрахунок екологічної доцільності застосування різних теплоакумуючих матеріалів було проведено для України зі значенням $em_{GDP} = 1.88$ $(\text{кг CO}_2)/\$$. Оскільки аналіз екологічної ефективності альтернативних об'єктів є порівняльним, вибір значення не впливає на результати виконано-

го аналізу для інших країн.

4. Результати аналізу та їх обговорення

Інформація про властивості парафіну та парафіну з вмістом ТРГ була взята з [7]. Властивості теплоакумулювального матеріалу (водний розчин етиленгліколя) для бака-теплоаккумулятора були розраховані за допомогою бази даних REFPROP [8]. Ця інформація, а також інші параметри, які використовувалися для еколого-енергетичного аналізу представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Характеристики порівнюваних теплоаккумуляторів при роботі в діапазоні температур від 30 до 60 °C

Параметр	Рідинний бак тепло-аккумулятор	Тепло-аккумулятор з парафін	Тепло-аккумулятор з парафін/ТРГ
Густина теплоакумулювального матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$	1033 при 45 °C	885,5	845,0
Питома різниця ентальпій під час нагрівання, $\text{кДж}/\text{кг}$	89,2	336	187
Питома різниця ентальпій під час охолодження, $\text{кДж}/\text{кг}$	89,2	214	277
Тепло, накопичене під час нагрівання теплоакумуючого матеріалу, кДж^*	52522		
Маса термоакумулюючого матеріалу m_{TE} , кг	589	505	482
Кількість тепла, використаного для зарядки теплоаккумулятора, кДж	52522	169680	90134
Кількість тепла, використаного для розрядки теплоаккумулятора, кДж	52522	108070	133514
Кількість тепла, спожитого під час зарядки одиниці об'єму теплоаккумулятора, $\text{МДж}/\text{м}^3$	92,1	297,7	158,1
Кількість тепла, спожитого під час розрядки одиниці об'єму теплоаккумулятора, $\text{МДж}/\text{м}^3$	92,1	189,6	234,2
Вартість теплоакумулюючого матеріалу, дол. США/кг	1,6	3,2	3,7
Вартість теплоакумулюючого матеріалу для одного теплоаккумулятора, дол. США	934	1601	1763

Примітка: * - за основу прийнято об'єм рідини в бак-аккумуляторі 570 л

Якщо враховувати кількість тепла, яке може накопичуватися на одиницю об'єму матеріалу теплоаккумулятора, то система, яка використовує парафін/ТРГ як МФП є найбільш перспективною, оскільки вона має меншу вагу та габарити, ніж бак-аккумулятор з водним розчином етиленгліколю. Питома акумулювальна здатність у діапазоні температур від 30 до 60 °C для теплоаккумулятора з МФП у 2,06 рази вища для парафіну та у 2,54 рази вища для парафіну/ТРГ, ніж для бака-теплоаккумулятора (під час розряду).

Результати еколого-енергетичного аналізу де-

монструють рисунки 3 та 4, у яких наведено повне значення емісії ПГ $\Sigma(em_i \cdot m_i)$ для теплоаккумулятора та питоме значення em_{TES} емісії ПГ на одиницю теплоти, що зберігається.

Крім того, під час виробництва теплоаккумулятора з парафіном або парафіном/ТРГ як МФП непрямі викиди ПГ на одиницю накопиченого тепла менші, ніж для бака-аккумулятора з водним розчином етиленгліколю, завдяки нижчій вартості конструкційних матеріалів. Питома емісія ПГ на одиницю теплоти, що зберігається, для теплоаккумулятора з парафіном як МФП на 16,9% нижча, а

для теплоаккумулятора з парафіном/ТРГ як МФП на 25,7% нижча, ніж для рідинного бака-теплоаккумулятора з водним розчином етиленгліколю (під час розряду).

Проведений аналіз показує, що теплоаккумулятори з МФП накопичують більше тепла порівняно з однофазними рідинними баками-теплоаккумуляторами. Слід зазначити, що для теплоаккумулятора з парафіном/ТРГ це значення вище, ніж коли використовується чистий парафін.

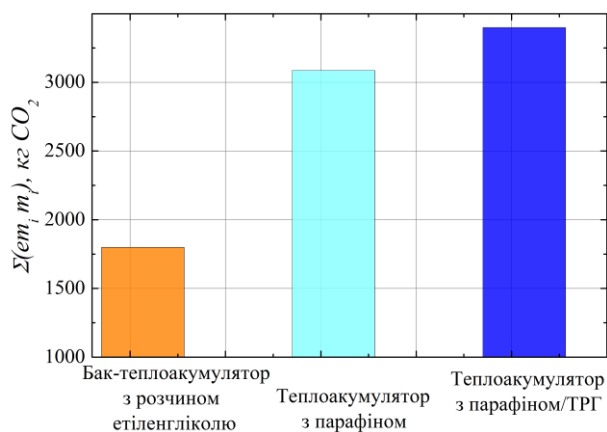


Рисунок 3 – Значення емісії ПГ $\Sigma(em_i \cdot m_i)$ для порівнювальних теплоаккумуляторів

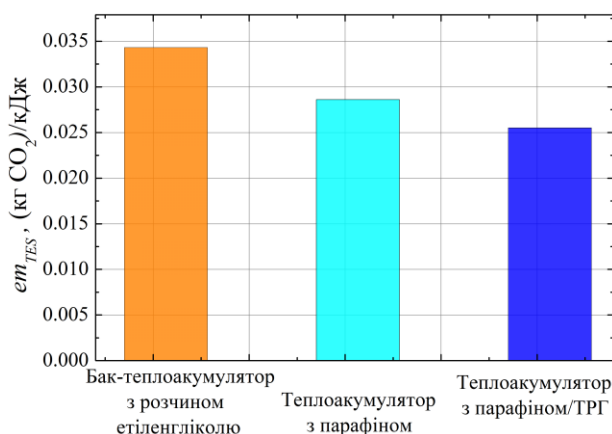


Рисунок 4 – Значення питомої емісії ПГ em_{TES} для порівнювальних теплоаккумуляторів

Однак, не тільки вибір теплоакмулювального матеріалу впливає на ефективність роботи теплоаккумулятора. Тому подальші дослідження авторів будуть спрямовані на розробку раціональної конструкції теплоаккумулятора з чистими та композиційними МФП, оптимізацію форми та розміщення елементів теплоаккумулятора (капсул з МФП) з метою інтенсифікації теплопереносу. Оптимальна конструкція повинна забезпечувати максимальний питомий об'єм теплоакмулювального матеріалу в

теплоаккумуляторі, зберігаючи при цьому високу інтенсивність теплопередачі від МФП до теплоносія.

5. Висновки

В роботі було проведено еколого-енергетичний аналіз з метою обґрунтування доцільності впровадження теплоаккумуляторів з МФП, а також з композиційним МФП, як елементів сонячних теплових систем. Як результат виконання дослідження отримані наступні результати.

Питома теплоємність у діапазоні температур від 30 до 60 °C для теплоаккумулятора з МФП у 2,06 рази вища для парафіну та у 2,54 рази вища для парафіну/ТРГ, порівняно з теплоємністю рідинного бака-теплоаккумулятора з водним розчином етиленгліколю (під час розрядки теплоаккумулятора).

З точки зору кількості енергії, що може зберігатися в одиниці об'єму, термоаккумулятори з МФП є більш перспективними та характеризуються меншими масо-габаритними розмірами, ніж рідинні баки-теплоаккумулятори.

При виробництві теплоаккумуляторів з МФП буде створено менше емісії парникових газів на одиницю збереженого тепла, ніж для рідинних баків-теплоаккумуляторів. Питома емісія парникових газів на одиницю теплоти, що зберігається, для теплоаккумулятора з парафіном як МФП на 16,9% нижча, а для теплоаккумулятора з парафіном/ТРГ як МФП на 25,7% нижча, ніж для рідинного бака-теплоаккумулятора з водним розчином етиленгліколю (під час розряду).

Отримані результати можуть бути корисними під час проектування систем опалення та гарячого водопостачання приватних будинків та невеликих підприємств, у випадках, коли є нестабільне надходження теплової енергії від поновлюваних джерел (переважно сонячних колекторів) з метою підвищення енергоефективності цих систем.

Особистий внесок авторів CRediT

Глек Я.О.: адміністрування, методологія, аналіз даних. **Квасницький Б.А.:** проведення експерименту, інформаційний пошук, аналіз та узагальнення даних. **Крюковська-Тележенко С.А.:** математична обробка результатів, проведення розрахунків, програмне забезпечення. **Герасименко О.А.:** інформаційний пошук, проведення розрахунків

Література

1. V. Zhelezny, O. Khliyeve, K. Shestopalov, V. Khalak, Y. Hlek, D. Ivchenko, B. Kvasnytskyi. Paraffin wax/expanded graphite for thermal energy storage: experiment and environmental analysis // *Applied Thermal Engineering*. – 2025. – Vol. 257. – P.127197.
2. V. Zhelezny, Y. Grosu, Y. Hlek, B. Kvasnytskyi, V. Khalak, D. Ivchenko. Sedimentation Stability and Caloric Properties of Nanohybrid Composite Thermo-Accumulating Material Paraffin/Thermally Expanded Graphite/Copper Oxide Nanoparticles // 2024 IEEE 14th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP). – 2024. doi:10.1109/NAP62956.2024.10739701.
3. Viessmann. Solar thermal systems (Vitosol): Technical guide. – 2016. Viessmann Limited. URL: https://viessmanndirect.co.uk/files/631a1d8b-eac2-4cf8-ae28-a67900a11f12/5822440_Technical%20Guide%202016.pdf (дата звернення 21.06.2025)
4. Vitosol 100-FM – Офіційний сайт Viessmann UA URL: <https://www.viessmann.ua/uk/zhytlovi-budynky/heliosystemy/plaski-kolektory/vitosol-100fm.htm>. (дата звернення 21.06.2025)
5. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 Будівельна кліматологія. – 2010.
6. ДСТУ Б В.2.2-21: ДСТУ Б В.2.2-21:2008. Будинки та споруди. Метод визначення питомих тепловитрат на опалення будинків. – 2008.
7. V. Zhelezny, D. Ivchenko, Ya. Hlek, O. Khliyeve, K. Shestopalov. Experimental study of phase transition heat of composite thermal energy storage materials paraffin wax/expanded graphite // *Journal of Energy Storage*. – 2024. – Vol. 77. – P. 110174. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110174>.
8. E. W. Lemmon, I. H. Bell, M. L. Huber, M. O. McLinden. NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, NIST, Standard Reference Data Program, Gaithersburg. – 2018.
9. Про прийняття національного стандарту ДСТУ-Н Б В.2.5-43:2010 Інженерне обладнання будинків і споруд. Настанова з улаштування систем сонячного теплопостачання в будинках житлового і громадського призначення. Офіційний вебпортал парламенту України.
10. Корінчевська Т. В. Теплофізичні властивості теплоакуючих матеріалів з фазовим переходом на основі органічних сполук: PhD Thesis. – Київ, 2017. – 132 с.
11. O. Khliyeve, K. Shestopalov, V. Ierin, V. Zhelezny, G. Chen, N. Gao. Environmental and energy comparative analysis of expediency of heat-driven and electrically-driven refrigerators for air conditioning application // *Applied Thermal Engineering*. – 2023. – Part B, Vol. 219. – P. 119533. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119533>
12. Chen G., Zhelezny V., Khliyeve O., Shestopalov K. O., Ierin V. Ecological and energy efficiency analysis of ejector and vapor compression air conditioners // *International Journal of Refrigeration*. – 2016. – Vol. 74. – P. 129-137.
13. T. Gutowski, S. Sahni, J. Allwood, M. Ashby, E. Worrell. The energy required to produce materials: Constraints on energy-intensity improvements, parameters of demand // *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*. – 2013. – Vol. 371. – P. 20120003
14. World-statistics. Indicators. URL: <https://world-statistics.org/#indicators> (дата звернення 21.06.2025)

Отримана в редакції 21.06.2025, прийнята до друку 29.08.2025

Ecological and energy justification for the feasibility of using thermal accumulators with phase change materials

Yana Hlek^{1✉}, Bohdan Kvasnytskyi², Svitlana Kriukovska-Telezhenko³, Oleksandr Gerasymenko⁴

^{1,3,4}Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Didrihsona str., 4, Odesa, 65029, Ukraine;

²Odesa National University of Technology, 112 Kanatna str., Odesa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: ¹glek@odaba.edu.ua

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-7508-6350>; ²<https://orcid.org/0009-0003-5556-396X>;

³<https://orcid.org/0009-0008-9963-4471>; ⁴<https://orcid.org/0009-0000-8555-4309>

The work is devoted to an ecological and energy analysis in order to substantiate the feasibility of introducing heat accumulators with phase change material (PCM), as well as with composite PCM, as elements of solar thermal systems. The comparison was performed for the following three options: a tradi-

tional liquid tank-heat accumulator, a heat accumulator with paraffin as PCM and a heat accumulator with a composite PCM paraffin/thermally expanded graphite (TRG) in the amount of 4 wt%. The work shows that the specific heat capacity in the temperature range from 30 to 60 °C for a heat accumulator with PCM is 2.06 times higher for paraffin and 2.54 times higher for paraffin/TRG, compared to the heat capacity of a liquid tank-heat accumulator with an aqueous solution of ethylene glycol (during the discharge of the heat accumulator). It is shown that thermal accumulators with MFM are more promising and are characterized by smaller mass and dimensions than liquid heat accumulator tanks per unit of stored heat. The production of heat accumulators with MFP will create less greenhouse gas emissions per unit of stored heat than for liquid heat accumulator tanks. The specific greenhouse gas emissions per unit of stored heat for a heat accumulator with paraffin as MFP are 16.9% lower, and for a heat accumulator with paraffin/TRG as MFP are 25.7% lower than for a liquid heat accumulator tank with an aqueous solution of ethylene glycol (during discharge). The results obtained can be useful when designing heat supply systems in cases where there is an unstable supply of thermal energy from solar collectors.

Keywords: Thermal storage; Solar heating system; Phase change material; Energy efficiency; Paraffin; Environmental analysis

References

1. Zhelezny, V., Khliyeva, O., Shestopalov, K., Khalak, V., Hlek, Y., Ivchenko, D., Kvasnytskyi, B. (2025) Paraffin wax/expanded graphite for thermal energy storage: experiment and environmental analysis. *Applied Thermal Engineering*, 257, 127197
2. Zhelezny, V., Grosu, Y., Hlek, Y., Kvasnytskyi, B., Khalak, V., Ivchenko, D. (2024) Sedimentation Stability and Caloric Properties of Nanohybrid Composite Thermo-Accumulating Material Paraffin/Thermally Expanded Graphite/Copper Oxide Nanoparticles. *2024 IEEE 14th International Conference Nano-materials: Applications & Properties (NAP)*.
3. (2016) Viessmann. Solar thermal systems (Vitosol): Technical guide. Viessmann Limited. Retrieved 21 June 2025 from https://viessmannndirect.co.uk/files/631a1d8b-eae2-4cf8ae28a67900a11f12/5822440_Technical%20Guide%202016.pdf
4. Vitosol 100-FM – Official website Viessmann UA. Retrieved 21 June 2025 from <https://www.viessmann.ua/uk/zhytlovi-budynky/heliosystemy/plaski-kolektory/vitosol-100fm.htm>.
5. (2010) DSTU-N B V.1.1-27:2010 Building climatology.
6. (2008) DSTU B V.2.2-21: DSTU B V.2.2-21:2008. Buildings and structures. Method for determining specific heat consumption for heating buildings.
7. Zhelezny, V., Ivchenko, D., Hlek, Ya., Khliyeva, O., Shestopalov, K. (2024) Experimental study of phase transition heat of composite thermal energy storage materials paraffin wax/expanded graphite. *Journal of Energy Storage*, 77, 110174.
8. Lemmon, E. W., Bell, I. H., Huber, M. L., McLinden, M. O. (2018) NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0. NIST, Standard Reference Data Program, Gaithersburg.
9. (2010) On the adoption of the national standard DSTU-N B V.2.5-43:2010 Engineering equipment of buildings and structures. Guidelines for the installation of solar heat supply systems in residential and public buildings, Official web portal of the Parliament of Ukraine.
10. Korinchevska, T. (2017) Thermophysical properties of heat-accumulating materials with phase transition based on organic compounds: PhD Thesis. Kyiv, 132.
11. Khliyeva, O., Shestopalov, K., Ierin, V., Zhelezny, V., Chen, G., Gao, N. (2023) Environmental and energy comparative analysis of expediency of heat-driven and electrically-driven refrigerators for air conditioning application. *Applied Thermal Engineering*, 219, 119533.
12. Chen, G., Zhelezny, V., Khliyeva, O., Shestopalov, K., Ierin, V. (2016) Ecological and energy efficiency analysis of ejector and vapor compression air conditioners. *International Journal of Refrigeration*, 74, 129-137.
13. Gutowski, T., Sahni, S., Allwood, J., Ashby, M., Worrell, E. (2013) The energy required to produce materials: Constraints on energy-intensity improvements, parameters of demand. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 371, 20120003
14. World-statistics. Indicators. Retrieved 21 June 2025 from <https://world-statistics.org/#indicators>.

Received 21 June 2025

Approved 29 August 2025

Available in Internet 30 September 2025