

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 536.4

Термоакумулювальні матеріалами з фазовим переходом: проблеми та перспективи застосування

Я. О. Глек^{1✉}, С. А. Крюковська-Тележенко², О. А. Герасименко³, Д. А. Зайко⁴, М. І. Семенов⁵¹⁻⁵Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона 4, м. Одеса, 65029, Україна✉ e-mail: ¹glek@odaba.edu.uaORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-7508-6350>; ²<https://orcid.org/0009-0008-9963-4471>; ³<https://orcid.org/0009-0000-8555-4309>; ⁴<https://orcid.org/0009-0009-9449-9167>; ⁵<https://orcid.org/0009-0003-9200-1958>

У представленій роботі проведено комплексний аналіз сучасного стану та перспектив інтеграції об'єктів ВДЕ, зокрема сонячної енергетики, як базового інструменту для суттєвого підвищення рівня загальної енергоефективності національної економіки та мінімізації негативного антропогенного впливу на навколишнє природне середовище. Одним із головних бар'єрів, що стримує масове впровадження сонячних та вітрових потужностей у загальну мережу, є стохастичний характер їхньої генерації та пряма залежність від погодних умов. Для нівелювання дисбалансу між періодами пікового виробництва енергії та реальним її споживанням обґрунтовано ключову роль інноваційних систем акумулювання. У цьому контексті проведено ґрунтовний порівняльний аналіз термоакумулювальних матеріалів (ТАМ) із фазовим переходом, які здатні акумулювати значну кількість прихованої теплоти під час плавлення та вивільняти її під час кристалізації. Особливу увагу в дослідженні приділено групі органічних термоакумулювальних матеріалів на основі парафінів, які вирізняються серед аналогів хімічною інертністю, стабільністю властивостей, відсутністю ефекту значного переохолодження та низькою корозійною активністю щодо конструкційних матеріалів. Проте суттєвим технологічним недоліком чистих парафінів залишається їхня низька теплопровідність, що критично обмежує швидкість процесів зарядки та розрядки теплових акумуляторів. Як метод інтенсифікації теплообміну в роботі детально розглянуто створення композиційних структур із використанням вуглецевих наноструктур, таких як графен, вуглецеві нанотрубки та нанографіт. Особливий акцент зроблено на важливості розробки та впровадження стандартизованих методик приготування таких композитів, що дозволяє запобігти агломерації наночастинок у матриці матеріалу, забезпечити гомогенність структури та зберегти високі показники ентальпії фазового переходу. Крім теоретичних аспектів, розглянуто широкий спектр практичного застосування матеріалів із фазовим переходом: від впровадження в огорожувальні конструкції будівель для створення систем пасивної терморегуляції та використання в сільському господарстві для обігріву теплиць, до застосування у харчовій промисловості та для термостабілізації високонавантаженого серверного обладнання. У підсумку визначено найбільш перспективні напрямки подальших наукових пошуків, що пов'язані із забезпеченням циклічної стабільності композиційних ТАМ при тривалому термоциклюванні, що є обов'язковою умовою для їх успішної комерціалізації та тривалої експлуатації в реальному секторі енергетики.

Ключові слова: Відновлювана енергетика; Сонячна енергія; Акумулювання тепла; Матеріали з фазовим переходом; Парафін; Теплопровідність.

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v61i4.3336>

© 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

Проблеми підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів і зниження антропогенного впливу енергетики на навколишнє середовище є надзвичайно актуальними. Розв'язання цих проблем досягається як конструктивним удосконаленням енергетичного обладнання, так і впровадженням нових робочих тіл і широким використанням низькопотенційних і поновлюваних джерел енергії. Енергетичні ресурси відіграють важливу роль у виробництві електроенергії, експлуатації систем охолодження та опалення, процесах сушіння, виробництві металів, будівельних матеріалів і багатьох інших секторах промислової діяльності.

В даний час близько 84% від загального споживання енергії на опалення та охолодження, виробляється за рахунок споживання викопного палива і лише 16% за рахунок використання відновлюваних джерел енергії. Широке використання відновлюваних джерел енергії дозволить забезпечити енергетичну незалежність держави, оптимізацію використання фінансових активів та скорочення викидів парникових газів.

До основних видів відновлюваних джерел енергії відносяться енергія біомаси, гідро- та геотермальна енергія, а також енергія вітру та сонця.

Одним із найперспективніших відновлюваних джерел енергії є сонячна енергія, яка може бути перетворена або на теплоту за допомогою сонячних теплових колекторів, або безпосередньо на електрику (за допомогою фотоелементів). Отримана на Землі сонячна енергія протягом години приблизно дорівнює світовому споживанню енергії протягом одного року. Використання сонячної енергії для теплопостачання об'єктів охоплює широкий спектр теплотехнологій, включаючи: теплопостачання, гаряче водопостачання та опалення, холодопостачання, кондиціонування повітря, отримання прісної води, сушіння матеріалів та виробів, використання в сільському господарстві тощо.

В наш час у світовій енергетичній політиці починають превалювати тенденції скорочення використання традиційних джерел енергії та переходу до альтернативних технологій виробництва теплової та електричної енергії. Відповідальний бізнес, в умовах прийнятих міжнародних зобов'язань з регулювання емісії парникових газів розуміючи важливість збереження стану довкілля, намагається мінімізувати негативний вплив своєї дія-

льності на навколишнє середовище.

Тому однією з превалюючих тенденцій при виробництві енергетичних ресурсів є збільшення потужностей виробленої альтернативної енергії. Україна також залучена до глобального процесу трансформації електроенергетичного сектору, щорічно збільшуючи потужності відновлюваних джерел енергії. Найбільший прогрес спостерігається у використанні сонячної енергії

Географічне розташування України сприятливе для реалізації проєктів генерації сонячної енергії. Для нашої країни характерна велика кількість сонячних днів. Це є базовим фактором, що дає змогу говорити про комерційні перспективи проєктів сонячної електрогенерації, що реалізуються в Україні. Незважаючи на те, що в генеруючих електроенергію потужностях в Україні перше місце посідає атомна енергетика, яка має невеликий вуглецевий слід, за обсягами споживання первинної енергії більшу частку становлять невідновлювані джерела енергії.

В Україні близько 40% населення отримують послуги централізованих котелень, особливо в густонаселених районах, тоді як відновлювані джерела енергії становлять лише 8% у загальному обсязі теплопостачання. Згідно з Енергетичною стратегією України до 2035 року планується збільшити частку відновлюваних джерел у теплопостачанні до 40%. Цієї мети можна досягти шляхом збільшення інвестицій у розвиток теплоенергетики, впровадження енергозберігаючих заходів та систем накопичення тепла як для промислових, так і для побутових споживачів.

Розробка систем теплопостачання на основі використання сонячної енергії та можливістю накопичення отриманої теплоти набуває особливої актуальності. Ці системи дозволяють ефективно акумулювати та зберігати енергію в періоди великого навантаження на енергетичну мережу. Враховуючи недосконалість електростанцій та низький коефіцієнт корисної дії, характерний для багатьох традиційних енергетичних систем, використання сонячної енергії та систем накопичення теплоти стає ефективним вирішенням еколого-енергетичних проблем.

2. Ключова роль акумуляторів енергії

Більшість відновлюваних джерел енергії, в тому числі і сонячна доступні протягом обмеженого періоду часу доби, що є проблемою їх вико-

ристання. Тому раціональне споживання відновлюваної енергії та низькопотенційних джерел енергії неможливе без розроблення ефективних технологій її зберігання. Своєю чергою досягнення цієї мети неможливе без розроблення нового покоління високоефективних термоакумулявальних матеріалів

Нерівномірність режиму споживання енергії призводить до того, що потужність енергоустановок найповніше використовується лише в момент максимуму навантаження. Неповне використання потужності енергосистеми може бути спричинене також: недостатньою зарегульованістю ресурсу на гідроелектростанціях; відсутністю маневреності регулювання потужності атомних електростанцій; нерівномірністю потужності, що видається сонячними та вітровими електростанціями, через добові й сезонні коливання інтенсивності сонячної радіації та швидкості вітру; та іншими факторами. Підвищення використання потужності системи та створення резервів енергії є найважливішими проблемами проектування та експлуатації енергосистем [1].

Енергетичні установки на основі відновлюваних джерел енергії повинні забезпечувати безперервне вироблення енергії за умови мінливої інтенсивності її генерації. Це може бути здійснено за рахунок включення в енергосистему акумулявальних установок. Таке включення підвищує надійність і стабільність енергопостачання споживачів, дає можливість регулювання режиму роботи енергетичних установок без жорсткої залежності від режиму споживання енергії. Акумулятори енергії також необхідні для створення систем аварійного, резервного та безперебійного електроживлення споживачів. Ключова роль акумуляторів енергії в енергоустановках, що працюють на відновлюваних джерелах енергії, визначається суттєвою нестабільністю генерації. Включення в систему акумуляторів дає змогу спростити технічні проблеми під'єднання енергоустановок на відновлюваних джерелах енергії до електричних мереж, а також поліпшити їхні техніко-економічні показники під час забезпечення гарантованого енергопостачання автономних споживачів.

3. Види акумуляторів енергії

До найпоширеніших акумулявальних установок належать: акумулятори тепла/холоду (у яких енергія зберігається у вигляді теплоти/холоду) за

рахунок теплоємності, теплоти фазових переходів або ендотермічних (екзотермічних) реакцій), акумулятори електрохімічної енергії, механічні акумулятори та електричні акумулятори.

Термоакумулявальні матеріали (ТАМ) можна класифікувати залежно від класу матеріалу, способу накопичення і віддачі тепла, від циклічності роботи. На сьогодні розроблено досить багато термоакумулявальних матеріалів, які забезпечують температуру акумуляування теплової енергії в широкому інтервалі температур. Залежно від хімічного складу термоакумулявальні матеріали поділяються на: неорганічні, органічні та евтектичні суміші.

В свою чергу, органічні сполуки містять жирні кислоти, складні ефіри, парафіни, спирти, гліколи тощо. Клас неорганічних сполук включає в себе солі металів, гідрати солей і метали. Евтектичні суміші – композиції органічних і неорганічних сполук, склад яких підбирають для досягнення потрібної (найнижчої) температури плавлення.

Під час вибору термоакумулявальних матеріалів потрібно керуватися як тепловими й експлуатаційними параметрами процесу, так і їхніми теплофізичними властивостями.

До переваг органічних ТАМ можна віднести: можливість використання в широкому діапазоні температур; висока питома теплота плавлення; кристалізація відбувається з незначним переохолодженням; конгруентний фазовий перехід; не відбувається розшарування матеріалу та висока швидкість нуклеації (зародження центрів кристалізації); термічна та хімічна стабільність матеріалу за багаторазових циклів плавлення та кристалізації; низький тиск насиченої пари у розплавленому вигляді; висока температура плавлення. Водночас органічні ТАМ мають і недоліки. До них належать: низька теплопровідність; недостатньо висока термоакумулявальна здатність за рахунок невисокої ентальпії фазового переходу; низька густина; легкозаймистість (недолік можна усунути, використовуючи вогнезахисні домішки); не сумісність з пластмасовими контейнерами; відносно дорогі (технічні парафіни дешевші й доступніші, ніж чисті парафіни, а жирні кислоти у кілька разів дорожчі від парафінів); відносно велика зміна об'єму (але в деяких жирних кислот зміна об'єму невелика).

4. Вибір ТАМ

Одним із важливих критерій вибору ТАМ з

фазовим переходом є температура і питома теплота плавлення.

За невеликих робочих температур (до 120 °C), крім перерахованих класів ТАМ, рекомендується застосування кристалогідратів неорганічних солей. Для підвищення ефективності сонячних енергетичних установок найчастіше в якості ТАМ використовують органічні речовини. Температури фазових переходів органічних матеріалів перебувають у межах від 0 до 200 °C.

Завдяки наявності ковалентних зв'язків у цих матеріалах більшість із них нестабільні за більш високих температур.

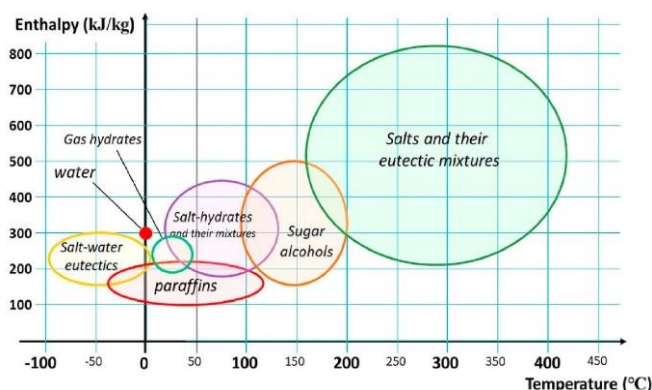


Рисунок 1 – Класи термоакумулювальних матеріалів з фазовим переходом

Використання органічних речовин повністю знімає питання корозійного руйнування внутрішніх деталей термоаккумуляторів, забезпечує досить високу щільність акумульованої енергії та високі техніко-економічні характеристики. У результаті багаторазових циклів плавлення-кристалізації не спостерігається погіршення теплофізичних властивостей ТАМ. Органічні ТАМ термічно і хімічно стабільні та кристалізуються з невеликим переохолодженням, проте в багатьох випадках густина органічних ТАМ менша за 1000 кг/м³, що нижче, ніж у більшості неорганічних матеріалів, унаслідок чого більшість органічних сполук зазвичай мають меншу об'ємну теплоту фазового переходу, порівнюючи з неорганічними.

Матеріали з фазовим переходом (МФП) або матеріали для накопичення прихованого тепла – це матеріали, які технічно можуть використовуватися під час їх фазового переходу за допомогою накопичення їх тепла. Зберігання енергії під час фазового переходу демонструє вищі енергетичні показники, ніж питома теплоємність під час «нормального» нагрівання даного матеріалу. З цієї при-

чини існує перевага щодо щільності зберігання енергії, особливо для невеликих температурних різниць

Завдяки застосуванню МФП, наприклад, в теплових акумуляторах, тепло або холод можна вилучати з навколишнього середовища та зберігати. Вивільнена теплова енергія може бути потім отримана з певною затримкою при певній температурі.

5. Застосування МФП

Вибір МФП залежить від конкретного застосування. Найважливішими факторами є: діапазон температур застосування, температура плавлення, тип (органічний або неорганічний), залежно від різних властивостей, клас продукту (чистий, інкапсульований або зв'язаний), залежно від включення МФП.

Використання прихованої теплової енергії матеріалів з фазовим переходом (ТАМ) в даний час є одним з найбільш ефективних і поширених методів термоакумулювання [2]. Також добре відомо, що ТАМ з фазовим переходом є чудовими матеріалами для систем ТЕС завдяки такій перевазі як високе значення різниці ентальпій фазового переходу на одиницю маси матеріалу при майже постійній температурі фазового переходу (плавлення-твердіння). Цією якістю володіють високомолекулярні алкани, багатоатомні спирти і жирні кислоти. Зазначені матеріали широко використовуються для ТЕС у геліоенергетичних системах, зокрема тих, що реалізують органічний цикл Ренкіна [4], низькотемпературних системах рекуперації тепла [5] та в інших теплоенергетичних системах, що забезпечують баланс виробництва і споживання електроенергії [6].

Основною перевагою термоакумулювання теплоти є можливість використання низько- і середньотемпературних джерел енергії, тобто тієї енергії, яка в даний час дуже часто розглядається як неминучі теплові втрати. Тож, акумулювання цієї енергії дає змогу не тільки більш раціонально використовувати відновлювані та невідновлювані джерела енергії, а й суттєво зменшити еквівалентну емісію парникових газів під час роботи енергетичного обладнання.

Системи з використання матеріалу з фазовим переходом накопичують/виділяють значну кількість тепла фазового переходу в певних температурних діапазонах, що є їхньою перевагою. Отже,

системи ТЕС з використанням матеріалів з фазовим переходом сприяють усуненню невідповідності між виробництвом енергії (наприклад, сонячної енергії) та її споживанням протягом доби.

Термоакумулятори, що використовують термоакумулявальні матеріали з фазовим переходом, в наш час знайшли широке застосування.

У будівництві ТАМ з фазовим переходом використовують у стінових панелях як огорожувальні конструкції будівель. Вони поглинають зайве тепло в денний час і віддають його вночі за відсутності сонячного випромінювання. Ефективність їх використання пов'язана з тим, що в них поєднуються властивості теплового захисту, термостабілізації та акумуляування теплоти. При цьому конструкція такої системи дуже проста. Перший варіант – це звичайне змішування рідкого або порошкоподібного ТАМ (найчастіше парафіну) з будівельними матеріалами (гіпс, бетон)[3, 15]. Другий – занурення чистого будівельного матеріалу (гіпсокартон, цегла, бетонні блоки) в розплавлений ТАМ, де він поглинається. Однак при застосуванні термоакумулявального матеріалу можуть виникати проблеми, пов'язані з їх витіканням з будівельних матеріалів у процесі роботи або несумісності матеріалів[16].

Тому найбільш оптимальним є третій варіант використання ТАМ – невеликі частинки матеріалу піддаються процедурі мікрокапсулювання. Наприклад, було розроблено декілька технологій включення дрібних крапельок парафіну в полімерні сфери, діаметр яких становив лише кілька мкм [15]. Отримані мікрокапсули можна без проблем вводити до складу різних будівельних матеріалів: шпаклівки, штукатурки, деревостружкових і деревоволокнистих плит тощо.

Матеріали з фазовим переходом відіграють важливу роль у харчовій галузі, як для транспортування необроблених продуктів, так і для готових до вживання продуктів.

Також використовуються для створення теплових компресів для фізичних або терапевтичних процедур. Завдяки великій теплоємності вони дозволяють підтримувати на шкірі точну і бажану температуру, незалежно від того, холодна вона чи тепла. Охолодження без гіпотермії можна гарантувати за допомогою оптимального вибору температури плавлення МФП. Після нещасних випадків або операцій можна застосовувати пакети МФП з охолоджувальним ефектом. Також використовуються в створенні охолоджувальних подушок для

лікування симптомів лихоманки.

Теоретично, кожен процес, пов'язаний з відпрацьованим теплом, циклічним тепловим навантаженням або процедурами нагрівання та охолодження, може бути оптимізований за допомогою МФП. У порівнянні з резервуарами з чистою водою, тепло може зберігатися в вузькому діапазоні температур. Крім того, МФП займають менше місця.

Підвищення температури в розподільних щитах або серверних стійках часто є недооціненою проблемою, яка спричинена зовнішніми впливами та вбудованими активними компонентами. Температура всередині таких щитів або стійок становить приблизно від 25° до 30° C

У цьому конкретному випадку МФП з температурою плавлення 30 °C може затримати перегрів цього обладнання, а МФП з температурою плавлення, наприклад, 28 °C може стабілізувати температуру на більш високому та нижчому рівнях. Отримане тепло можна використовувати для плавлення МФП без підвищення температури. У разі меншого теплового навантаження і, як наслідок, температури нижчої від 28 °C МФП знову кристалізується і вивільняє раніше накопичену енергію.

Цей приклад повинен підкреслити можливості матеріалів МФП і підкріпити думку про те, що завдяки високій ефективності та більш компактним будівельним блокам їх застосування може бути вигідним.

У сільському господарстві теплові акумулятори застосовують для обігріву теплиць у нічний час, використовуючи накопичену теплоту протягом дня від сонця. У найпоширеніших конструкціях вентилятор здійснює циркуляцію повітря в теплиці через тепловий акумулятор. Надлишками теплоти в денний час заряджають акумулятор, а в нічний час він розряджається і підігріває повітря в теплиці. В якості ТАМ із фазовим переходом найчастіше використовують $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, поліетиленгліколь і парафін. Термоакумулявальні системи можуть бути розміщені в самих теплицях або винесені за її межі. Такі системи можуть використовуватися в поєднанні з сонячними колекторами.

Так як в Україні щорічно вирощується велика кількість фруктів і овочів, важливе значення має їх якісне зберігання. Тому пропонується широко використовувати геліосушарку для сушіння фруктів і овочів із фазоперехідним тепловим акумуляуван-

ням з метою тривалого зберігання та збереження якості;

У системах вентиляції ТАМ із фазовим переходом використовуються для підтримання комфортної температури протягом дня. У денний час відбувається заряджання акумулятора й охолодження повітря, що надходить у приміщення, а вночі його нагрівання і, відповідно, розрядка теплового акумулятора. Такі системи можуть монтуватися в стінах або в стелі кімнати.

6. Проблеми використання ТАМ з фазовим переходом

Недоліком зазначених класів речовин є низька теплопровідність ($0,1 \dots 1,0 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$), що впливає на час плавлення (зарядки) і затвердіння (розрядки) ТАМ у системах ТЕС. Низька теплопровідність ТАМ призводить до великих температурних градієнтів по всьому об'єму системи ТЕС під час її зарядки або розрядки. При цьому виникають труднощі регулювання режимів роботи когенераційних енергетичних систем з установками ТЕС.

Дослідження багатьох учених спрямовані на усунення цього недоліку і концентруються на пошуку шляхів підвищення теплопровідності наявних термоаккумулявальних матеріалів. Для поліпшення процесів теплообміну в системах накопичення теплової енергії з ТАМ пропонується низка рішень, наприклад: використання ребристих труб різної конфігурації [7]; використання металевих [8] і розширених графітових [9] матриць, наповнених ТАМ; введення в термоаккумулявальні матеріали металевої вати [10], [11] та наночасток із високою теплопровідністю [12], [13]; мікро- і макроінкапсулювання ТАМ [13]. Однак усі перераховані технології та методи здорожують і знижують енергоємність систем ТЕС (у розрахунку на одиницю об'єму ТАМ) у робочому діапазоні температур, оскільки у фазовому переході не беруть участі додаткові компоненти й елементи.

Відомо, що збільшення теплопровідності ТАМ сприятиме збільшенню швидкості реакції системи на теплові впливи і тим самим збільшенню загальної ефективності термоаккумулявальних систем.

Ще одна складність реалізації на практиці системи ТАМ з прихованою теплою фазових переходів пов'язана з необхідністю додаткових досліджень процесів теплообміну в елементах системи ТАМ, що містять перспективні матеріали з фазовим переходом.

Одним із перспективних напрямків підвищення теплопровідності ТАМ для ТЕС є застосування нанотехнологій [12], [13]. Однак, проведений аналіз показує, що вплив наночасток на властивості ТАМ вивчено недостатньо добре порівняно наприклад з дослідженням теплопровідності.

Багато нанорідин можуть використовуватися як нанопосилені матеріали з фазовим переходом і навпаки, залежно від фази матеріалу. Прикладом може слугувати вода, поліпшена додаванням наноструктур або парафінова нанорідина.

Однак наразі опубліковано недостатньо результатів досліджень, орієнтованих на збільшення різниці ентальпії фазових переходів під час додавання в ТАМ наночастинок [9].

Працездатність термоаккумулятора не можна характеризувати тільки значеннями ентальпії фазового переходу і теплопровідності ТАМ.

Температурно-часові залежності термоаккумулявальних матеріалів у процесі нагріву та охолодження також є практично важливими характеристиками для оцінки працездатності системи зберігання теплової енергії. Отже, виконаний аналіз показує, що дослідження теплофізичних властивостей ТАМ і швидкості зміни температури під час їхнього нагрівання й охолодження в модельних капсулах зберігання теплової енергії, можуть бути використані у розв'язанні задач комплексного підходу до оцінки ефективності термоаккумулявального матеріалу.

Найпоширенішими органічними матеріалами, які використовуються для акумулювання теплової енергії, є парафіни. Парафіни являють собою хімічні сполуки, утворені метановими твердими вуглеводнями. Плавляться ці речовини за температури від $+45$ до $+65^\circ\text{C}$.

Як правило, технічні парафіни містять домішки ароматичних і нафтонових вуглеводнів, а також ізопарафінові сполуки. Структура твердої фази парафіну також не однорідна. Величина і форма кристалів парафіну залежать від умов його виробництва: з нафти парафін виділяється у вигляді дрібних тонких кристалів, а з нафтових дистилатів і дистилатних рафінатів селективного очищення – у вигляді великих кристалів.

Чисті алкани мають високу вартість, тому для акумулювання теплової енергії зазвичай використовують технічний парафін, який отримують у результаті дистиляції нафти.

Промислові парафіни (PW) визнані прийнятними ТАМ для акумулювання низькопотенційної

сонячної енергії [14], [17]. Включення до складу парафінів компонентів із високою теплопровідністю сприятиме інтенсифікації процесів тепловіддачі під час зарядки/розрядки ТЕС-систем, що підвищить ефективність їх використання. Однак ці матеріали мають низьку теплопровідність (від 0,15 до 0,30 Вт/м·К).

На сьогоднішній день вуглецеві наноматеріали є одним із найперспективніших компонентів для поліпшення теплопровідності теплоакмулювальних матеріалів із фазовим переходом. Однак застосування вуглецевих наноматеріалів, таких як фулерени C60 і вуглецеві нанотрубки, має низку недоліків. Перша проблема – це їхня висока вартість. Другою проблемою є їхня низька стійкість до кластеризації та осадження при циклічних процесах плавлення/затвердіння композиційних матеріалів з фазовим переходом. Водночас зазначені проблеми не характерні при використанні композиційних термоакмулювальних матеріалів з певною концентрацією розширеного графіту. Тому терморозширений графіт (ТРГ) можна розглядати як один із найперспективніших компонентів композиційних термоакмулювальних матеріалів [18]. Основними перевагами застосування ТРГ є його низька вартість і висока теплопровідність.

З метою збільшення теплопровідності технічних парафінів багато дослідників використовують вуглецеві домішки, такі як фулерени, терморозширений графіт (ТРГ), сажа, графіт і графен [10], [20].

ТРГ є дуже легким вуглецевим матеріалом з великою питомою площею поверхні [21]. Ці унікальні властивості, поряд з високою теплопровідністю ТРГ, роблять цей матеріал перспективним компонентом для створення композиційних ТАМ. Тому в останні роки з'явилося досить багато публікацій, присвячених можливостям застосування ТРГ як компонента композиційних ТАМ. Використовуючи ТРГ можна обґрунтовано розраховувати на значне збільшення теплопровідності композиційних ТАМ. Разом з тим, аналіз досліджень [22-23] вказує на істотну розбіжність отриманих ефектів впливу ТРГ на теплопровідність і ефективність теплообміну в композиційних термоакмулювальних матеріалах. Подібні розбіжності, мабуть, пов'язані з різною методикою приготування композиційних матеріалів.

Слід підкреслити, що стандартна методика створення композиційних термоакмулювальних матеріалів, що містять ТРГ, наразі залишається не розробленою, а аналіз низки досліджень [18], по-

казує, що змішання парафіну і ТРГ без будь-якого додаткового опрацювання не дає змоги одержати композиційний термоакмулювальний матеріал із відповідними властивостями в системах ефективного використання теплової енергії.

Однак зі збільшенням вмісту вуглецевих наноструктур у ТАМ їхній внесок у зниження теплоти плавлення стає домінантним, а теплота плавлення зменшувалася і порівняно з чистим ТАМ [9, 19]. Тому збільшення ентальпії фазового переходу композиційних ТАМ порівняно з базовими може бути перспективним напрямком для підвищення ефективності систем ТЕС.

Однак цей напрямок підвищення ефективності застосування композиційних ТАМ все ще перебуває на ранній стадії свого впровадження, а його практична здійсненність потребує свого доведення. Зокрема, однією з основних проблем технологій створення композиційних ТАМ на основі парафіну залишаються питання забезпечення стабільності композиційних ТАМ під час термоцилювання.

Накопичений досвід експлуатації термоакмуляторів показує, що на якість композиційних ТАМ великий вплив мають як технологічні аспекти підготовки компонентів, так і параметри технологічного процесу його створення. Багаторічні дослідження, показали значний вплив розчищеного повітря в базовій речовині. Крім того, наночастки схильні до агломерації.

7. Висновки

Аналіз сучасних тенденцій в енергетиці свідчить, що розв'язання проблем енергоефективності та зниження антропогенного навантаження на довкілля неможливе без широкого впровадження відновлюваних джерел енергії, серед яких сонячна енергія займає провідне місце завдяки своїй доступності та високому потенціалу. Однак суттєва нестабільність генерації альтернативної енергії зумовлює критичну необхідність розробки ефективних технологій її зберігання, де ключову роль відіграють системи теплового акумулювання. Найбільш перспективним методом є використання термоакмулювальних матеріалів (ТАМ) із фазовим переходом, які дозволяють накопичувати значну кількість енергії у вузькому температурному діапазоні з високою щільністю, що значно перевершує можливості традиційних систем. Серед розмаїття ТАМ особливу увагу привертають

органічні сполуки, зокрема технічні парафіни, завдяки їхній термічній стабільності, відсутності корозійного впливу на обладнання та доступній вартості. Водночас головною перешкодою для їх масового впровадження залишається низька теплопровідність, що призводить до нерівномірності процесів зарядки та розрядки акумуляторів. Шлях до вирішення цієї проблеми лежить у створенні композиційних матеріалів із додаванням вуглецевих наноструктур, де одним із найвигідніших компонентів за співвідношенням ціни та ефективності є терморозширений графіт. Застосування таких вдосконалених систем акумулювання у будівництві, сільському господарстві, медицині та ІТ-секторі дозволить не лише оптимізувати енергоспоживання, а й суттєво прискорити реалізацію Енергетичної стратегії України щодо збільшення частки відновлюваних джерел у теплопостачанні, забезпечуючи надійність і стабільність автономних та мережевих систем енергозабезпечення.

Особистий внесок авторів CRediT

Глек Я.О.: адміністрування, концептуалізація ідеї, методологія. **Крюковська-Тележенко С.А.:** інформаційний пошук, аналіз даних. **Герасименко О.А.:** інформаційний пошук, аналіз та узагальнення даних. **Зайко Д.А.:** інформаційний пошук, концептуалізація. **Семенов М.І.:** узагальнення даних, інформаційний пошук.

Література

1. **T. Aboumahboub.** Decarbonization of Australia's energy system: Integrated modeling of the transformation of electricity, transportation, and industrial sectors // *Energies*. – 2020. – Vol. 13(15). – P. 3805.
2. **Md. M. Rahman.** Phase Change Materials (PCM) for Solar Energy Usages and Storage: An Overview // *Energies*. – 2019. – Vol. 12. – P. 3167. doi: 10.3390/en12163167.
3. **B. Zalba, J. Marin, L. F. Cabeza, H. Mehling.** 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.
4. **O. Mahian.** A review of solar-driven organic Rankine cycles: Recent challenges and future outlook // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021 – Vol. 150. – P.111410. doi: 10.1016/j.rser.2021.111410.
5. **Z. Yang, V. Korobko, M. Radchenko, R. Rad-**

chenko. Improving Thermoacoustic Low-Temperature Heat Recovery Systems // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14. – P.12306. doi: 10.3390/su141912306.

6. **F. Wang.** Thermal performance of a phase change material (PCM) microcapsules containing Au nanoparticles in a nanochannel: A molecular dynamics approach // *Journal of Molecular Liquids*. – 2023. – Vol. 373. – P. 121128. doi: 10.1016/j.molliq.2022.121128.
7. **A. Jirawattanapanit.** Numerical Investigation of a Melting Rate Enhancement Inside a Thermal Energy Storage System of Finned Heat Pipe with Nano-Enhanced Phase Change Material // *Nanomaterials*. – 2022. – Vol. 12. doi: 10.3390/nano12152519.
8. **Y. Grosu, Y. Zhao, A. Giacomello, S. Meloni, J. ... & A. Faik.** Hierarchical macro-nanoporous metals for leakage-free high-thermal conductivity shape-stabilized phase change materials // *Applied Energy*. – 2020 – Vol. 269 – P. 115088. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115088>
9. **G. Fang, M. Yu, K. Meng, F. Shang, X. Tan.** High-Performance Phase-Change Materials Based on Paraffin and Expanded Graphite for Solar Thermal Energy Storage // *Energy & Fuels*. – 2020. – Vol. 34(8). doi: 10.1021/acs.energyfuels.0c00955.
10. **V. Zhelezny, D. Ivchenko, Y. Hlek, O. Khliueva, P. Zajdel, K. Shestopalov, ... & Y. Grosu.** Effect of fullerene C60 on phase transition enthalpy of paraffin wax: Calorimetry and structural analysis // *Journal of Energy Storage*. – 2023 – Vol. 72. – P. 108713.
11. **C. Prieto, C. Rubio, L. F. Cabeza.** New phase change material storage concept including metal wool as heat transfer enhancement method for solar heat use in industry // *Journal of Energy Storage*. – 2020. – Vol.33 – P. 101926. doi: 10.1016/j.est.2020.101926.
12. **N. Udayashankar, L. González-Fernández, Y. Grosu, A. Zaki, J. Igartua, A. Faik.** Shape effect of Al2O3 nanoparticles on the thermophysical properties and viscosity of molten salt nanofluids for TES application at CSP plants // *Applied Thermal Engineering*. – 2020 – Vol. 169 – P. 114942. doi: 10.1016/j.applthermaleng.114942.
13. **T. X. Li, J.-H. Lee, R. Wang, Y. T. Kang.** Heat transfer characteristics of phase change nanocomposite materials for thermal energy storage application // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – Vol. 75 – P. 1-11. doi: 10.1016/j.ijheatmass-transfer.2014.03.054.
14. **M. Mofijur.** Phase change materials (PCM) for solar energy usages and storage: An overview // *Energies*. – 2019 – Vol. 12 – P. 3167. doi: 10.3390/en1216

3167.

15. **F. L. Rashid, M. A. Al-Obaidi, A. Dulaimi, D. M. Mahmood, K Sopian.** A review of recent improvements, developments, and effects of using phase-change materials in buildings to store thermal energy // *Designs*. – 2023. – Vol. 7(4) – P. 90.
16. **N. Soares, J. Costa, A. Gaspar, P. Santos.** Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency // *Energy and Buildings*. – 2013. – Vol. 59. – P. 82-103. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.12.042.
17. **A. Gautam R. P. Saini.** A review on technical, applications and economic aspect of packed bed solar thermal energy storage system // *The Journal of Energy Storage*. – 2019. – Vol. 27. doi: 10.1016/j.est.2019.101046.
18. **M. Li, B. Mu.** Effect of different dimensional carbon materials on the properties and application of phase change materials: A review // *Applied Energy*. – 2019. – Vol. 242 – P. 695-715. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.03.085.
19. **K. Pielichowska, K. Pielichowski.** Crystallization behaviour of PEO with carbon-based nanonucleants for thermal energy storage // *Thermochimica Acta*. – 2010. – Vol. 510(1-2). – P. 173-184. doi: 10.1016/j.tca.2010.07.012.
20. **V. Zhelezny, O. Khliyeva, Ya. Hlek, A. Paskal, D. Ivchenko, N. Lapardin.** Experimental investigation of the effect of expanded graphite on the thermophysical properties and heating and cooling rate of paraffin wax in capsule of thermal energy storage system // *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies*. – 2022. – Vol. 20(4). – P. 983-1000. doi: 10.15407/nnn.20.04.983.
21. **Y. Chang, X. Yao, Y. Chen, L. Huang, D. Zou.** Review on ceramic-based composite phase change materials: Preparation, characterization and application // *Composites Part B: Engineering*. – 2023. – Vol. 254. – P. 110584. doi: 10.1016/j.compositesb.2023.110584.
22. **Y. Zhao, L. Jin, B. Zou, G. Qiao, T. Zhang, L. Cong, F. Jiang, C. Li, Y. Huang, Y. Ding.** Expanded graphite – Paraffin composite phase change materials: Effect of particle size on the composite structure and properties // *Applied Thermal Engineering*. – 2020. – Vol. 171. – P. 115015 doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115015.
23. **Y. Liang, Z. Tao, Q. Guo, Z. Liu.** Sponge gourd-bioinspired phase change material with high thermal conductivity and excellent shape-stability // *Journal of Energy Storage*. – 2021. – Vol. 39. – P. 102634. doi: 10.1016/j.est.2021.102634.

Отримана в редакції 10.11.2025, прийнята до друку 28.11.2025

Phase change thermal energy storage materials: application challenges and prospects

Yana Hlek^{1✉}, Svitlana Kriukovska-Telezhenko², Oleksandr Herasymenko³, Zaiko Dmytro⁴, Maksym Semenov⁵

¹⁻⁵Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Didrihsona str.,4, Odesa, 65029, Ukraine

✉ e-mail: ¹glek@odaba.edu.ua

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-7508-6350>; ²<https://orcid.org/0009-0008-9963-4471>; ³<https://orcid.org/0009-0000-8555-4309>; ⁴<https://orcid.org/0009-0009-9449-9167>; ⁵<https://orcid.org/0009-0003-9200-1958>

The presented work provides a comprehensive analysis of the current state and prospects for the integration of renewable energy facilities, in particular solar energy, as a basic tool for significantly increasing the overall energy efficiency of the national economy and minimizing the negative anthropogenic impact on the environment. One of the main barriers hindering the mass introduction of solar and wind power into the general network is the stochastic nature of their generation and direct dependence on weather conditions. To level the imbalance between periods of peak energy production and its actual consumption, the key role of innovative storage systems is substantiated. In this context, a thorough comparative analysis of thermal storage materials (TSM) with a phase transition, which are capable of accumulating a significant amount of latent heat during melting and releasing it during crystallization, has been conducted. Special attention in the study is paid to the group of organic thermal storage materials based on paraffins, which stand out among their analogues in chemical inertness, stability of properties, absence of the effect of significant supercooling and low corrosion activity towards structural materials. However, a significant technological disadvantage of pure paraffins remains their low thermal conductivity, which

critically limits the speed of charging and discharging processes of thermal accumulators. As a method of intensification of heat transfer, the work considers in detail the creation of composite structures using carbon nanostructures, such as graphene, carbon nanotubes and nanographite. The author places special emphasis on the importance of developing and implementing standardized methods for preparing such composites, which allows preventing agglomeration of nanoparticles in the material matrix, ensuring the homogeneity of the structure and maintaining high indicators of the phase transition enthalpy. In addition to theoretical aspects, a wide range of practical applications of phase transition materials is considered: from implementation in building envelopes to create passive thermoregulation systems and use in agriculture for heating greenhouses, to use in the food industry and for thermal stabilization of highly loaded server equipment. As a result, the most promising areas of further scientific research related to ensuring cyclic stability of composite TAMs during prolonged thermal cycling, which is a prerequisite for their successful commercialization and long-term operation in the real energy sector, have been identified.

Keywords: Renewable energy; Solar energy; Thermal energy storage; Phase change materials (PCM); Paraffin; Thermal conductivity.

References

1. **Aboumahboub, T.** (2020) Decarbonization of Australia's energy system: Integrated modeling of the transformation of electricity, transportation, and industrial sectors. *Energies*, 13(15), 3805.
2. **Rahman, M. M.** (2019) Phase Change Materials (PCM) for Solar Energy Usages and Storage: An Overview. *Energies*, 12, 3167.
3. **Zalba, B., Marin, J., 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.
4. **Mahian, O.** (2021) A review of solar-driven organic Rankine cycles: Recent challenges and future outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111410.
5. **Yang, Z., Korobko, V., Radchenko, M., Radchenko, R.** (2022) Improving Thermoacoustic Low-Temperature Heat Recovery Systems. *Sustainability*, 14, 12306.
6. **Wang, F.** (2023) Thermal performance of a phase change material (PCM) microcapsules containing Au nanoparticles in a nanochannel: A molecular dynamics approach. *Journal of Molecular Liquids*, 373, 121128.
7. **Jirawattanapanit, A.** (2022) Numerical Investigation of a Melting Rate Enhancement Inside a Thermal Energy Storage System of Finned Heat Pipe with Nano-Enhanced Phase Change Material. *Nanomaterials*, 12.
8. **Grosu, Y., Zhao, Y., Giacomello, A., Meloni, S. ... & Faik, A.** (2020) Hierarchical macro-nanoporous metals for leakage-free high-thermal conductivity shape-stabilized phase change materials. *Applied Energy*, 269, 115088.
9. **Fang, G., Yu, M., Meng, K., Shang, F., Tan, X.** (2020) High-Performance Phase-Change Materials Based on Paraffin and Expanded Graphite for Solar Thermal Energy Storage. *Energy & Fuels*, 34(8).
10. **Zhelezny, V., Ivchenko, D., Hlek, Y., Khliyeva, O., Zajdel, P., Shestopalov, K. ... & Grosu, Y.** (2023) Effect of fullerene C60 on phase transition enthalpy of paraffin wax: Calorimetry and structural analysis. *Journal of Energy Storage*, 72, 108713.
11. **Prieto, C., Rubio, C., Cabeza, L. F.** (2020) New phase change material storage concept including metal wool as heat transfer enhancement method for solar heat use in industry. *Journal of Energy Storage*, 33, 101926.
12. **Udayashankar, N., González-Fernández, L., Grosu, Y., Zaki, A., Igartua, J., Faik, A.** (2020) Shape effect of Al₂O₃ nanoparticles on the thermophysical properties and viscosity of molten salt nanofluids for TES application at CSP plants. *Applied Thermal Engineering*, 169, 114942.
13. **Li, T. X., Lee, J.-H., Wang, R., Kang, Y. T.** (2014) Heat transfer characteristics of phase change nanocomposite materials for thermal energy storage application. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 75, 1-11.
14. **Mofijur, M.** (2019) Phase change materials (PCM) for solar energy usages and storage: An overview. *Energies*, 12, 3167.
15. **Rashid, F. L., Al-Obaidi, M. A., Dulaimi, A., Mahmood, D. M., Sopian, K.** (2023) A review of recent improvements, developments, and effects of using phase-change materials in buildings to store thermal energy. *Designs*, 7(4), 90.
16. **Soares, N., Costa, J., Gaspar, A., Santos, P.** (2013) Review of passive PCM latent heat thermal

energy storage systems towards buildings' energy efficiency. *Energy and Buildings*, 59, 82-103.

17. **Gautam, A., Saini, R. P.** (2019) A review on technical, applications and economic aspect of packed bed solar thermal energy storage system. *The Journal of Energy Storage*, 27.

18. **Li, M., Mu, B.** (2019) Effect of different dimensional carbon materials on the properties and application of phase change materials: A review. *Applied Energy*, 242, 695-715.

19. **Pielichowska, K., Pielichowski, K.** (2010) Crystallization behaviour of PEO with carbon-based nanonucleants for thermal energy storage. *Thermochimica*, 510(1-2), 173-184.

20. **Zhelezny, V., Khliyeva, O., Hlek, Ya., Paskal, A., Ivchenko, D., Lapardin, N.** (2022) Experimental investigation of the effect of expanded graphite on the thermophysical properties and heating and cooling rate of paraffin wax in capsule of thermal energy

storage system. *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies*, 20(4), 983-1000.

21. **Chang, Y., Yao, X., Chen, Y., Huang, L., Zou, D.** (2023) Review on ceramic-based composite phase change materials: Preparation, characterization and application. *Composites Part B: Engineering*, 254, 110584.

22. **Zhao, Y., Jin, L., Zou, B., Qiao, G., Zhang, T., Cong, L., Jiang, F., Li, C., Huang, Y., Ding, Y.** (2020) Expanded graphite – Paraffin composite phase change materials: Effect of particle size on the composite structure and properties. *Applied Thermal Engineering*, 171, 115015

23. **Liang, Y., Tao, Z., Guo, Q., Liu, Z.** (2021) Sponge gourd-bioinspired phase change material with high thermal conductivity and excellent shape-stability. *Journal of Energy Storage*, 39, 102634.

Received 10 November 2025

Approved 28 November 2025

Available in Internet 30 December 2025