

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ В УКРАЇНІ СИСТЕМ АКУМУЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ФАЗОЗМІННИХ МАТЕРІАЛІВ

¹Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Всебічно проаналізовано доцільність впровадження систем акумулювання теплової енергії на основі фазозмінних матеріалів (ФЗМ) в умовах післявоєнного відновлення енергетичного сектору України. Визначено, що внаслідок масштабних руйнувань централізованої інфраструктури електропостачання виникла об'єктивна потреба у розвитку децентралізованих джерел енергії, зокрема когенераційних установок та відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Для забезпечення ефективного функціонування таких систем критично важливим є впровадження гнучких технологій балансування енергоспоживання та генерації. Особливу увагу приділено зростанню глобального попиту на енергію та відповідному збільшенню обсягів викидів CO₂, які у 2023 році сягнули 37 Гт. Хоча внесок України у глобальні викиди залишається порівняно невеликим, модернізація її енергетичної системи вимагає переходу до сталих і безпечних рішень. Проведено огляд основних методів накопичення теплоти — за рахунок теплоємності, прихованої теплоти фазового переходу та термохімічних реакцій. Акцентовано на перевагах ФЗМ, які забезпечують високу щільність накопичення енергії. Детально розглянуто теплофізичні властивості кристалогідратів, зокрема тригідрату ацетату натрію, з огляду на їхню відповідність умовам побутового теплопостачання. Проаналізовано обмеження їх практичного застосування, зокрема переохолодження, розшарування та циклічну нестабільність. Наведено приклади комерційних реалізацій ФЗМ у Німеччині, Японії, Польщі та Україні. Обґрунтовано, що ФЗМ є ключовим компонентом сталої, енергоефективної та екологічно безпечної децентралізованої енергетики України.

Ключові слова: тепла енергія, акумулятори теплової енергії, фазозмінні матеріали (ФЗМ), кристалогідрати, натрію ацетат тригідрат, накопичення теплоти, екологічна енергоефективність, викиди CO₂.

Вступ

Україна нині протистоїть не лише військовим, а й енергетичним викликам. Масштабні пошкодження об'єктів генерації та ліній передачі енергії під час повномасштабної агресії виявили вразливі місця в структурі централізованої енергосистеми України. За даними Міжнародного енергетичного агентства (ІЕА) майже дві третини спроможності генерації пошкоджено або захоплено, що призвело до дефіциту майже 6 ГВт у зимовий період 2024/2025 та загальних втрат інфраструктури на понад 11 млрд доларів США. У звіті ІЕА “Empowering Ukraine Through a Decentralised Electricity System” зазначено, що масштабні руйнування енергетичної інфраструктури стимулювали не лише її відновлення, а й оновлення шляхом децентралізації виробництва та розвитку розподіленої генерації, зокрема сонячних електростанцій, вітроустановок і малих модульних газових турбін. Для ефективного функціонування таких систем необхідне впровадження надійних технологій акумулювання теплової енергії, що дасть змогу вирівняти баланс між виробництвом і споживанням в умовах нестабільного енергопостачання [1].

Водночас перехід до вищого рівня децентралізації у виробництві електроенергії сприяє досягненню довгострокових екологічних цілей України, визначених у Національному енергетичному та кліматичному плані до 2030 року, а також в Енергетичній стратегії до 2050 року, що передбачають декарбонізацію енергосектору та розвиток сталої енергетики [2], [3].

Згідно з планом відновлення України [4] за напрямком енергетичної незалежності та зеленого курсу передбачено будівництво пікових потужностей обсягом 1,5...2 ГВт та систем накопичення енергії потужністю 0,7...1 ГВт.

Під малими генерувальними потужностями у контексті відновлення енергосистеми України за-

звичай розуміють будівництво когенераційних установок, які досягають високого коефіцієнта корисної дії за рахунок одночасної генерації теплової та електричної енергії. Проте, в умовах пікової нерівномірності споживання цих видів енергії ефективність таких систем може істотно знижуватись за відсутності механізмів їх гнучкого балансування — зокрема, систем акумулювання теплової енергії. За оцінками фахівців інституту енергетики НАН України показник акумулювання енергії може зрости до 2 ГВт у разі обмеження потужностей атомних електростанцій [5].

Актуальність проблеми акумулювання теплової енергії значно посилюється на тлі глобальних тенденцій споживання енергетичних ресурсів. Згідно з аналітичними даними платформи Our World in Data споживання первинної енергії у 2000 році становило приблизно 100 000 ТВт·год. За наступні 23 роки споживання зросло на 64 000 ТВт·год і становить 164 000 ТВт·год, а до 2050 року, за прогнозами, може зрости ще на 25...30 відсотків [6]. Графічно динаміку світового споживання первинної енергії показано на рис. 1.

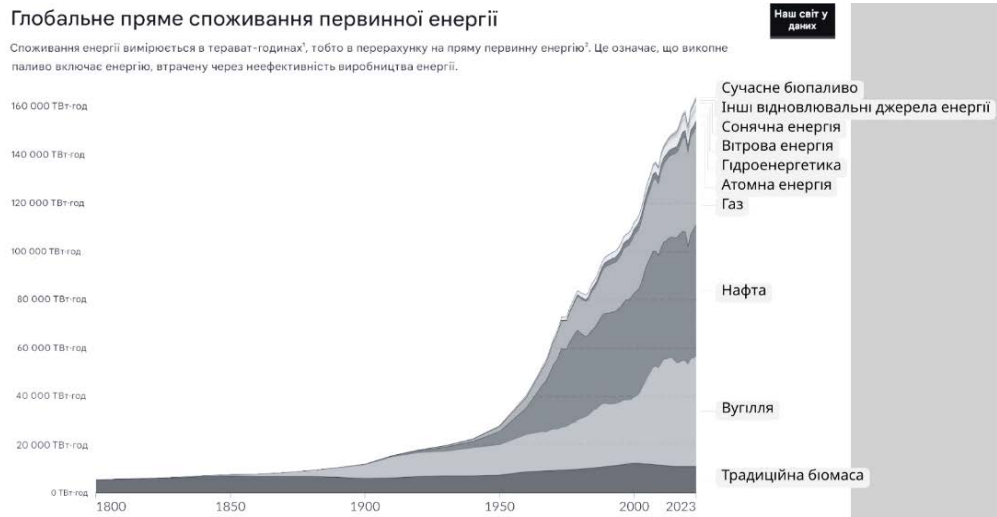


Рис. 1 Динаміка глобального споживання первинної енергії у світі за 1800-2023 роки [6]

Зростання глобального споживання енергоресурсів призводить до збільшення світових викидів діоксиду вуглецю, які у 2023 році досягли 37 Гт. Водночас згідно з даними [7] у європейському регіоні спостерігається позитивна тенденція скорочення викидів з пікового рівня близько 8 Гт у 1970—80-х роках до сучасних значень близько 4...5 Гт на рік. Хоч внесок України у глобальні викиди (менше 0,2 Гт на рік) порівняно незначний, але також демонструє поступове зниження після досягнення максимуму в кінці 1990-х років. Загальна ситуація відображена на рис. 2 [7]. Основна частка викидів припадає на спалювання викопного палива 90 %, решта 10 % — це викиди, пов'язані з промисловими процесами, зокрема виготовлення цементу.

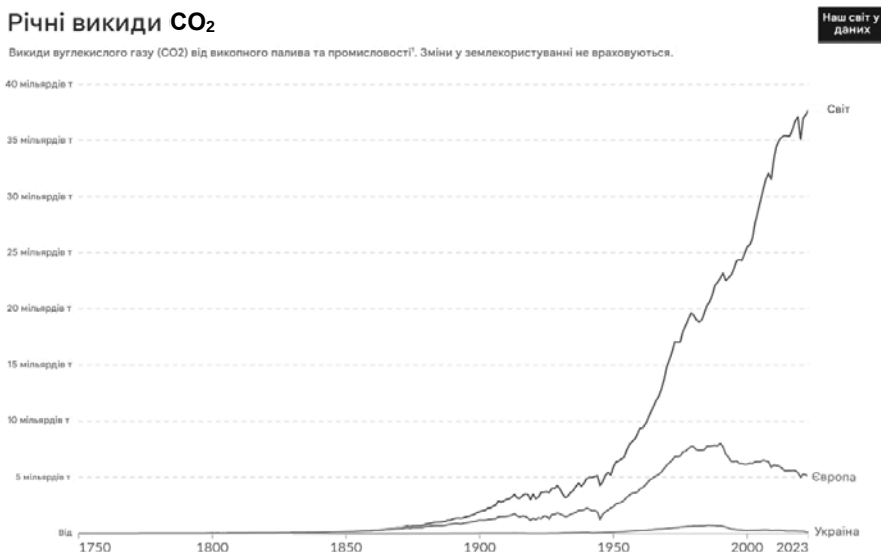


Рис. 2. Викиди CO₂ від викопного палива та промисловості у світі, Європі та Україні

За даними досліджень Міжнародного агентства з відновлювальної енергетики (IRENA) спільно з Міжнародним енергетичним агентством (IEA), широке впровадження систем теплового акумулювання в житловому та промисловому секторах країн Європи може забезпечити щорічне заощадження близько 1,4 млн ГВт·год енергії та уникнення викидів понад 400 млн тон діоксиду вуглецю [8].

Таким чином, зростаючі потреби в децентралізованих джерелах енергії, активне впровадження ВДЕ, необхідність підвищення гнучкості та надійності енергосистеми, а також вимоги до скорочення викидів парникових газів актуалізують пошук ефективних методів акумулювання тепла. Наявні дані [8] демонструють необхідність підвищення ефективності об'єктів споживання та доводять доцільність впровадження технологій теплоакумулювання як одного з ключових інструментів енергетичного переходу до сталої моделі розвитку та зменшення антропогенного впливу на довкілля.

Особливий науковий і практичний інтерес становлять системи на основі фазозмінних матеріалів, зокрема кристалогідратів, які поєднують високу питому теплоємність, компактність і екологічну безпечність [9], [10]. У зв'язку з цим постає необхідність у систематизації та аналізі сучасних технологій акумулювання теплової енергії з фокусом на фазозмінні матеріали, що й визначає мету цієї статті.

Метою дослідження є аналітичний огляд технологій акумулювання теплової енергії з урахуванням їхніх теплофізичних характеристик, екологічних переваг і можливостей практичного застосування в умовах децентралізації енергетичної системи України, а також виявлення основних перепон на шляху широкомасштабного впровадження систем на основі фазозмінних матеріалів.

Постановка завдання

Для реалізації мети передбачено вирішення таких завдань:

- здійснити загальний огляд теплоакумулювальних матеріалів;
- проаналізувати властивості й особливості фазозмінних матеріалів у системах теплового накопичення;
- виділити кристалогідрати як окрему перспективну групу та оцінити їх потенціал з погляду технологічних, екологічних і практичних параметрів.

Аналіз сучасних систем теплоакумулювання

У сучасних умовах енергетичної нестабільності недоцільно покладатися лише на одне джерело теплоти. Все частіше використовуються комбіновані системи, які поєднують газові, електричні, твердопаливні котли, теплові насоси та сонячні колектори. Такі системи об'єднують через теплоакумулятори та інтелектуальні системи керування, які забезпечують гнучке переключення між джерелами генерації залежно від поточної доступності, з пріоритетним використанням відновлювальних джерел енергії. Джерела, що працюють на викопному паливі використовуються лише в моменти пікового навантаження, що дозволяє зменшити вуглецевий слід, підвищити енергонебезпечність та оптимізувати витрати в довгостроковій перспективі [11].

Як зазначено у [12], оптимізація розподілу навантажень у багатокомпонентних системах із залученням теплоакумуляторів значно підвищує ефективність і стабільність роботи системи, дозволяючи гнучко реагувати на зміну споживання. У дослідженні [13] розглянуто математичну модель низьковуглецевого керування гібридною енергосистемою. Система складається з вітрової, сонячної, теплової генерації та об'єднана теплоакумулятором, що доводить ефективність таких систем у контексті декарбонізації.

Таким чином, гібридні системи генерації з теплоакумуляторами та оптимізованим керуванням підтверджують свою доцільність не лише в теорії, а й у практичних моделях та дослідженнях науковців. На нашу думку, в межах подальшого аналізу доцільно зосередитись на вдосконаленні однієї з ключових складових такої гібридної системи — теплоакумулятора.

Для кращого розуміння того, які питання в галузі теплового акумулювання залишаються відкритими, доцільно проаналізувати наявні класифікації теплоакумуляторів, вимоги до теплоакумулювальних матеріалів та здійснити їх порівняльну характеристику. Згідно з [14], на рис. 3 показано основні типи теплоакумуляторів та їхні основні ознаки.

У контексті сучасної України з її потребами в автономних системах теплопостачання для житлових і малих громадських будівель, доцільно проаналізувати класи відповідно до реальних умов експлуатації. Для побутових систем найоптимальнішим є низькотемпературні акумулятори з робочим діапазоном до 100 °С. Саме в цьому діапазоні працює більшість теплогенерувальних установок

таких як теплові насоси, сонячні колектори низькотемпературного типу, твердопаливні та газові котли. Зокрема в межах цих температур 60...95 °С функціонують вже наявні в Україні системи опалення та гарячого водопостачання як передбачено ДБН В.2.5-67:2013 (табл. А.1) [15, с. 153-154].

За тривалістю зберігання тепла у контексті цього дослідження усі три типи є актуальними — короткострокові для добових коливань, середньострокові для акумулювання тепла протягом кількох днів у хмарну погоду та довгострокового акумулювання або сезонні системи у випадку сезонного акумулювання теплової енергії. Сезонні системи активно впроваджуються в рамках проектів STES (Seasonal Thermal Energy Storage — сезонне акумулювання енергії), зокрема в житлових масивах північної Європи [16].



Рис. 3. Класифікація теплоаккумуляторів за температурою роботи, тривалістю зберігання тепла та типом теплоакуючого матеріалу

Основою будь-якого теплоаккумулятора є теплоакуювальний матеріал (ТАМ). До основних вимог, що висуваються до ТАМ, належать: висока щільність зберігання енергії, відповідна температура фазового переходу, хімічна стабільність, інертність, безпечність у використанні, а також економічна доцільність. Всі ці критерії детально узагальнено в оглядових дослідженнях [17]–[20].

Відомо три типи теплового акумулювання за температур від –40 °С до понад 400 °С: за рахунок теплоємності матеріалу, прихована теплота та термохімічне накопичення енергії рис. 4 [21].

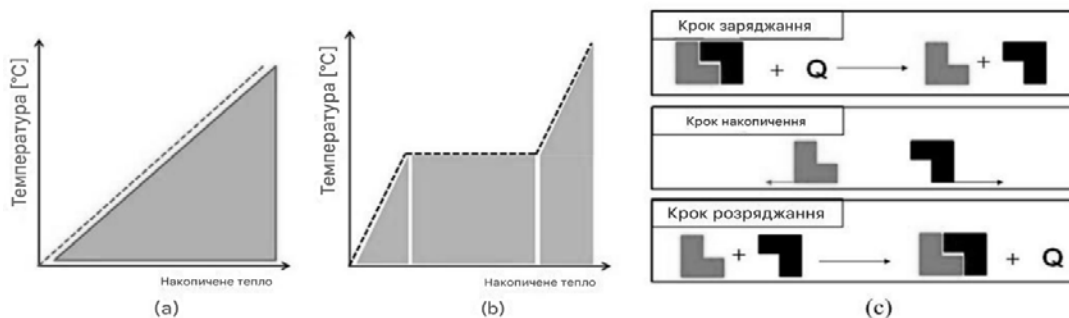


Рис. 4. Методи акумулювання теплової енергії: а — теплоємність матеріалу; б — прихована теплота; в — термохімічні реакції [21]

Теплоакуювальні матеріали, що накопичують енергію за рахунок теплоємності, такі як вода або наприклад, гранітний щебінь чи базальтові породи є доступними, стабільними та економічно вигідними. Вони мають низьку питому теплоємність і тому потребують використання великих об'ємів для накопичення значної кількості теплоти, що ускладнює застосування їх в умовах обмеженого простору. В таких системах акумулювання теплоти відбувається за рахунок підвищення температури матеріалу рис. 4а, що призводить до зростання тепловтрат через більшу різницю тем-

ператур між накопичувачем і навколишнім середовищем. Це, у свою чергу, зумовлює необхідність поліпшення теплоізоляції для мінімізації втрат теплоти.

Фазозмінні матеріали вже використовують приховану теплоту фазового переходу для акумулювання теплоти. Зазвичай це процеси плавлення, під час яких відбувається поглинання енергії, та процес кристалізації з вивільненням раніше поглинутого тепла. Основною перевагою таких матеріалів є здатність зберігати та віддавати значну кількість енергії за майже постійної температури рис. 4b. Через це такі акумулятори є дуже ефективними для зберігання тепла, оскільки вони здатні акумулювати більше енергії за відносно невеликих змін температури, що є важливою перевагою в енергетичних системах [20].

Щільність зберігання енергії у таких матеріалів у 2—5 разів вища порівняно з традиційними теплоємнісними матеріалами [11], [17], [18]. Особливо перспективними вважають процес тверде тіло–рідина, які мають невелике об'ємне розширення (до 10 %) та високу ентальпію плавлення. Згідно з [19] у табл. 1 подано добірку кристалогідратів для побутових систем тепlopостачання, зокрема тих які працюють у діапазоні температур від 30 °C до 60 °C. Цей діапазон температур дасть змогу повністю заряджатись і розряджатись у типових умовах роботи системи.

Таблиця 1

Теплофізичні властивості перспективних кристалогідратів для використання в системах акумулювання теплоти

Найменування речовини	Хімічна формула	Температура плавлення, °C	Ступінь переохолодження, °C	Прихована теплота плавлення, кДж/кг	Теплопровідність, Вт/(м·К)
Нітрат літію триводний	$\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	30	40	296	—
Декагідрат сульфату натрію	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	32	20	254	0,6
Декагідрат карбонату натрію	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	32	—	246,5	0,5
Дигідрат броміду літію	$\text{LiBr} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	34	—	124	—
Гексагідрат броміду кальцію	$\text{CaBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	34	60	115,5	—
Дванадцятиводний гідрофосфат натрію	$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	35	20	280,	0,5
Гексагідрат нітрату цинку	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	36,4	—	147	0,5
Гексагідрат хлориду заліза(III)	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	37	—	223	—
Тетрагідрат нітрату марганцю	$\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	37,1	—	115	—
Гептагідрат сульфату кобальту	$\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	40,7	—	170	—
Дигідрат фториду калію	$\text{KF} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	42	—	162	—
Тетрагідрат нітрату кальцію	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	43	65	138	—
Дев'ятигідрат нітрату заліза(II)	$\text{Fe}(\text{NO}_3)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	47	—	155	—
Триводний гідрофосфат калію	$\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	48	—	99	—
П'ятиводний тіосульфат натрію	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	48	65	209	0,4
Сімводний гідрофосфат натрію	$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	48	—	170	—
Сімводний сульфат магнію	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	48,5	—	202	—
Тригідрат ацетату натрію	$\text{Na}(\text{CH}_3\text{COO}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	58	90	270,3	0,9

Проте наразі ці матеріали не набули широкого застосування, оскільки залишається невирішеною низка проблемних питань. Кристалогідрати схильні до переохолодження, розшарування або циклічної нестабільності, що знижує їхню довгострокову ефективність. Серед розглянутих кристалогідратів особливу увагу привертає тригідрат ацетату натрію $\text{Na}(\text{CH}_3\text{COO}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, який має високу ентальпію дегідратації (270,3 кДж/кг) та температуру фазового переходу 58 °C, що добре узгоджується з робочими параметрами побутових систем опалення. Автори роботи [14] наголошують, що окремі з недоліків триводного ацетату натрію, як-от переохолодження, можуть бути перетворені на перевагу для створення гнучких або сезонних теплоакумуляторів, де контрольований момент кристалізації стає технологічною перевагою.

Органічні фазозмінні матеріали, зокрема парафіни та жирні кислоти, є привабливими завдяки хімічній стабільності, відсутності токсичності, некорозійності та доступності у широкому температурному діапазоні (5...80 °C) [22, с. 2]. Проте істотним обмеженням залишається низька теплопровідність, яка зазвичай не перевищує 0,2 Вт/(м·К), що ускладнює швидку зарядку і розрядку теплового акумулятора. Як зазначають автори [23, с. 6–8], ця проблема вирішується шляхом

додавання наповнювачів з високою теплопровідністю, таких як графіт, графен, метали або капсуляція. Наприклад, введення 10 % графіту може збільшити теплопровідність парафіну в 4—6 разів. Водночас такі модифікації супроводжуються ускладненням структури, підвищенням вартості та можливими проблемами з фазовою стабільністю матеріалу. Таким чином, хоча парафіни демонструють високу ефективність накопичення тепла, їхнє застосування в побутових системах тепlopостачання доцільне лише за умов додаткових конструктивних рішень або використання у режимах з повільним тепловим навантаженням. У табл. 2 подано теплотехнічні характеристики парафінів потенційно придатних для використання як теплоакумлювального матеріалу.

Таблиця 2

Теплофізичні властивості парафінів придатних для будівельного застосування [23, с. 3]

Парафін	Температура плавлення, °C	Густина, кг/м³	Прихована теплота плавлення, кДж/кг	Теплопровідність, Вт/(м·К)
n-Гексадекан (C ₁₆)	18	770	237	0,2
n-Гептадекан (C ₁₇)	22	760	213	0,145
Парафін C ₁₆ –C ₁₈	20...22	—	152	—
Парафін C ₁₃ –C ₂₄	22...24	900	189	0,21
n-Октадекан (C ₁₈)	28	865	245	0,148
n-Нонадекан (C ₁₉)	32	830	222	0,22
RT 35 HC	35	880	240	0,2
n-Ейкозан (C ₂₀)	37	—	246	—
n-Генікозан (C ₂₁)	40	778	200—213	—
Парафін C ₁₆ –C ₂₈	42...44	910	189	—
n-Докозан (C ₂₂)	44,5	880	249	0,2
n-Трикозан (C ₂₃)	47,5	—	232	—
Парафін C ₂₀ –C ₃₃	48...50	912	189	—

За даними [24], для акумулювання 1 ГДж теплоти традиційними теплоємними матеріалами (вода, галька) потрібен об'єм і маса в десятки разів більші ніж для фазозмінних матеріалів. Це ілюструє діаграма рис. 5, на якому показано порівняння маси та об'єму різних ТАМ для накопичення однакової кількості енергії.

Показник

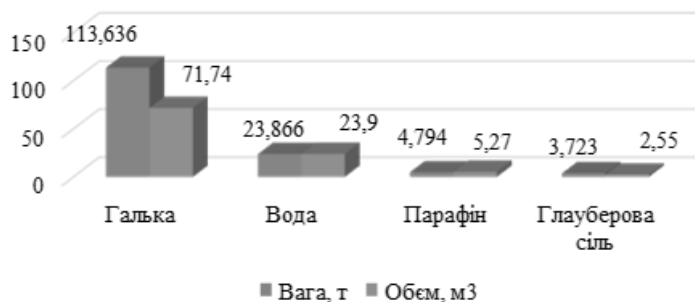


Рис. 5. Діаграма порівняння різних ТАМів за масою та об'ємом для акумулювання 1 ГДж енергії

Термохімічне накопичення ґрунтується на оборотних ендотермічних та екзотермічних реакціях (рис. 4с), що дає змогу зберігати тепло з мінімальними втратами протягом тривалого часу. У процесі заряджання теплової енергії розкладає вихідну сполуку (наприклад $A = B + C$), а під час розряджання відбувається зворотний екзотермічний процес. У науковій літературі [17] описано низку потенційно придатних реакцій, зокрема термічний розклад оксидів металів, до прикладу, PbO_2 гідрооксиду кальцію $Ca(OH)_2$, а також фотохімічні процеси, як-от розклад $NOCl$ під дією світла. Проте їхнє практичне застосування в побутових системах є обмеженим. Наприклад, реакція $Ca(OH)_2 \rightarrow CaO + H_2O$ потребує температур понад 500 °C, PbO_2 є високотоксичним, а $NOCl$ є отруйним газом із задушливим запахом. Зазначимо, що деякі солі, як-от нітрат калію (KNO_3), хоча й мають високу енергоємність, є вибухонебезпечними окисниками і не належать до групи оксидів металів. Це додатково ускладнює їхнє застосування в житлових системах тепlopостачання. [17] Детальнішу інформацію про ці та інші реакції зведено у табл. 3.

Хімічні реакції для термохімічного акумулювання [17, с. 23]

Хімічна реакція	Температура реакції, °C	Енергоємність, кДж/кг
$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	480...1195	6053
$2\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 3\text{H}_2$	400...500	3940
$\text{MgH}_2 \rightarrow \text{Mg} + \text{H}_2$	200...500	3079 (тепло), 9000 (H_2)
$\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	402...572	1415
$\text{SO}_3 \rightarrow \text{SO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$	520...960	1235
$\text{PbO}_2 \rightarrow \text{PbO} + \frac{1}{2}\text{O}_2$	300...400	224

Таким чином, термохімічні системи акумулювання теплоти хоча й демонструють високий потенціал для промислового застосування, проте через токсичність, вибухонебезпечність та вимоги до високотемпературного середовища є непридатними для використання в побутових і малих децентралізованих системах.

Огляд комерційно-доступних систем акумулювання теплової енергії на основі фазозмінних матеріалів

Комерційна реалізація таких систем свідчить про практичну доцільність і потенціал технологій теплоакумулювання на основі фазозмінних матеріалів. Проте варто зазначити, що детальну інформацію про конструкцію теплообмінного обладнання та складу теплоакумулювального матеріалу не розголошують з міркувань комерційної таємниці. Одним із перших прикладів є система [25] LaTherm у Німеччині (2009 рік), де використовувався тригідрат ацетату натрію ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) з теплою плавлення 230 кДж/кг для накопичення 2,5 МВт·год тепла. У тому ж році в Японії реалізовано проєкт Trans-heat container на базі органічного ФЗМ — ерітритолу з теплою плавлення 340 кДж/кг і загальною потужністю 2,3 МВт·год. В Україні у 2020–2023 роках розроблено мобільну систему МТА, що поєднує рідкий термофлюїд і церезин — органічну речовину з фазовим переходом (теплота плавлення близько 360 кДж/кг) для зберігання 1,2 МВт·год тепла [26]–[27]. В Польщі у 2022 році компанія Enetech запустила комерційно доступну установку акумулювання тепла на основі ФЗМ, що дозволяє зберігати до 1,9 МВт·год енергії, хоча точний склад матеріалу не розголошується [28].

Висновок

Проведене дослідження підтверджує високу актуальність і перспективність впровадження систем акумулювання теплової енергії як важливого елемента децентралізації енергетики України. В умовах відбудови енергосистеми та впровадження принципів сталої енергетики ці системи дозволять забезпечити баланс між генерацією та споживанням, зменшити залежність від централізованих джерел енергії та підвищити стійкість локальних енергетичних кластерів.

Особливу увагу заслуговують фазозмінні матеріали, зокрема кристалогідрати, які поєднують високу питому теплоту плавлення, відповідність побутовим температурним режимам, екологічну безпечність, нетоксичність і відсутність шкідливих викидів під час експлуатації. Їх використання дозволяє мінімізувати об'єм теплоакумуляторів, скоротити втрати тепла та зменшити вуглецевий слід, що відповідає цілям декарбонізації та Європейського зеленого курсу.

З-поміж ФЗМ особливо перспективними для застосування в діапазоні 30...60 °C є глауберова сіль ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$) та триводневий ацетат натрію ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), що мають високу ентальпію плавлення та відповідні точки фазового переходу. Проте для кристалогідратів характерні певні проблеми — переохолодження, розшарування, циклічна нестабільність, які можуть бути пом'якшені методами модифікації структури або інкапсуляції.

Органічні ФЗМ, зокрема парафіни, мають низьку теплопровідність, але є хімічно стабільними та екологічно безпечними, через що вони придатні для довготривалих режимів з низькою інтенсивністю теплових навантажень. Натомість термохімічні ТАМи, попри високу енергоємність, залишаються придатними лише до промислових застосувань через токсичність, високу температуру реакцій та вибухонебезпечність.

У підсумку, фазозмінні матеріали — це ключовий напрям для розвитку побутових та децентралізованих систем теплозабезпечення, що забезпечують високу ефективність, компактність, екологічність і адаптивність до ВДЕ. Їх широке впровадження сприятиме зменшенню антропогенного

впливу, підвищенню гнучкості енергосистем і досягненню енергетичної безпеки України в умовах нових викликів. Діаграма на рис. 5 наочно демонструє, що ФЗМ в десятки разів ефективніші за традиційні теплоємнісні матеріали.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Empowering Ukraine Through a Decentralised Electricity System, *International Energy Agency*. Paris: IEA, 2023, 44 с. [Electronic resource]. Available: <https://www.iea.org/reports/empowering-ukraine-through-a-decentralised-electricity-system>. Accessed: 13.06.2025.
- [2] Міністерство економіки України, *Національний план з енергетики та клімату на період до 2030 року*. Київ, 2023, 218 с. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=17f558a7-b4b4-42ca-b662-2811f42d4a33&title=NatsionalniiPlanZEnergetikiTaKlimatuNaPeriodDo2030-Roku>. Дата звернення: 13.06.2025.
- [3] Міністерство енергетики України, *Енергетична стратегія України до 2050 року*. Київ, 2021. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.mev.gov.ua/reforma/enerhetychna-stratehiya-0>. Дата звернення: 13.06.2025.
- [4] *Енергетична незалежність та Зелений Курс*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://recovery.gov.ua/project/program/energy-independence-and-green-deal/>. Дата звернення: 10.06.2025.
- [5] В. О. Ходаківський, і Д. С. Карпенко, «Оцінювання рівня ефективності впровадження когенерації в умовах модернізації та резервування системи теплопостачання», *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 2, с. 12-19, 2025. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2025.327134>.
- [6] Global primary energy consumption, 1800–2022, in *Our World in Data*. [Electronic resource]. Available: <https://ourworldindata.org/grapher/global-primary-energy?time=earliest..2022>. Accessed: 10.06.2025.
- [7] Annual CO₂ emissions per country (Ukraine, Europe, World), in *Our World in Data*. [Electronic resource]. Available: https://ourworldindata.org/grapher/annual-co2-emissions-per-country?country=UKR~OWID_EUR~OWID_WRL. Accessed: 10.06.2025.
- [8] Thermal Energy Storage. Technology Brief E17, in *International Renewable Energy Agency (IRENA), Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP)*. Paris: International Energy Agency, 2013, 20 с. [Electronic resource]. Available: <https://www.irena.org/publications>. Accessed: 13.06.2025.
- [9] І. В. Коц, О. Д. Панкевич, і О. В. Бадяка, «Напрямки покращення основних характеристик теплових акумуляторів та теплоакумуляційних матеріалів», *Енергозбереження в будівництві*, № 2, с. 159-166, 2023. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-2-159-166>.
- [10] К. Попюк, «Атомістичне моделювання теплового транспорту в матеріалах з фазовим переходом.» кваліфікаційна робота бакалавра. Київ. нац. ун-т ім. Т. Шевченка, фіз. ф-т, каф. фізики металів. Київ, 2024, 48 с.
- [11] M. N. I. Maruf, G. Morales-España, J. Sijm, N. Helistö, and J. Kiviluoma, “Classification, potential role, and modeling of power-to-heat and thermal energy storage in energy systems. A review,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 370, no. 133515, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133515>.
- [12] X. Gong, F. Li, B. Sun, and D. Liu, “Collaborative Optimization of Multi-Energy Complementary CCHP Systems Considering Schedulable Loads,” *Energies*. vol. 13, no. 4. pp. 918, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13040918>.
- [13] H. Liu, Y. Su, K. Cai, and Y. Mo, “Low carbon dispatch optimization of wind solar thermal storage multi energy system based on stochastic chance constraints and carbon trading mechanism,” *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 14, no. 2. pp. 233-244, 2025. <https://doi.org/10.61435/ijred.2025.60669>.
- [14] *Акумулятор тепла*, Вікіпедія: вільна енциклопедія. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Акумулятор_тепла. Дата звернення: 11.06.2025.
- [15] Державні будівельні норми України, *ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціювання*, чинний з 01.01.2014. Київ : Мінрегіон України, 2013. 270 с. [Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1018>. Дата звернення: 22.06.2025.
- [16] *Seasonal thermal energy storage*, in Wikipedia: the free encyclopedia. [Electronic resource]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Seasonal_thermal_energy_storage. Accessed: 22.06.2025.
- [17] I. Sarbu, and C. Sebarchievici, “A comprehensive review of thermal energy storage” *Sustainability*. vol. 10, no. 1. pp. 191, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10010191>.
- [18] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, “Review on thermal energy storage with phase change materials and applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13. pp. 318-345, 2009.
- [19] H. Yang, Y. Zou, and H. Cui, “Advancements and challenges in enhancing salt hydrate phase change materials for building energy storage: Optimization methodologies and mechanisms,” *National Science Open*, vol. 3, no. NSO20230056. 2024. [Electronic resource]. Available: <https://www.nso-journal.org/articles/nso/pdf/2024/03/NSO20230056.pdf>. Accessed: 22.06.2025.
- [20] G. Wang, C. Xu, W. Kong, G. Englmair, J. Fan, G. Wei, and S. Furbo, “Review on sodium acetate trihydrate in flexible thermal energy storages: Properties, challenges and applications,” *Journal of Energy Storage*, vol. 40, pp. 102780. 2021 <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102780>.
- [21] A. Alvaro de Gracia, and C. F. Cabeza, “A Phase change materials and thermal energy storage for buildings,” *Energy and Building*, vol. 103, pp. 414-419, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06>.
- [22] Q. Al-Yasiri, and M. Szabó, “Paraffin as a phase change material to improve building performance: an overview of applications and thermal conductivity enhancement techniques,” *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, vol. 6, no. 38, 2021. <https://doi.org/10.1051/rees/2021040>. [Electronic resource]. Available: <https://www.rees-journal.org/articles/rees/abs/2021/01/rees210036/rees210036.html>. Accessed: 30.06.2025.
- [23] G. Yang, Y.-J. Yim, J. W. Lee, Y.-J. Heo, and S.-J. Park, “Carbon-Filled Organic Phase-Change Materials for Thermal Energy Storage. A Review,” *Molecules*. vol. 24, no. 11, Art. 2055, 2019. ISSN 1420-3049. <https://doi.org/10.3390/molecules24112055>. [Electronic resource]. Available: <https://www.mdpi.com/1420-3049/24/11/2055>. Accessed: 30.06.2025.
- [24] С. В. Будлянський, А. Ф. Редько, і Ю. І. Чайка. *Порівняння теплоакумуляючих матеріалів з фазовим переходом*

для систем сонячного теплопостачання. 2014. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/38329/> . Дата звернення: 05.02.2025.

[25] Дописувачі Вікіпедії, «Мобільні теплові акумулятори.» *Вікіпедія: вільна енциклопедія*. Оновлено: 14.07.2024. [Електронний ресурс] Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=Мобільні_теплові_акумулятори&oldid=43048508 . Дата звернення: 01.07.2025.

[26] В. Г. Демченко, В. Ю. Фалько, і С. С. Гронь, «Мобільні акумулятори для дискретних систем теплохолодопостачання. Частина 1,» *Теплофізика і теплоенергетика*, № 40 (2), с. 20-26, 2018.

[27] В. Г. Демченко, А. С. Трубачов, В. Ю. Фалько, і С. С. Гронь, «Мобільні акумулятори для дискретних систем теплохолодопостачання. Частина 2,» *Теплофізика і теплоенергетика*, № 40(3), с. 57-69, 2018.

[28] *Enetech sp. z o.o.*, Official Website of the Company. — Kraków, Польща : Enetech, 2025. [Electronic resource]. Available: <https://enetech.com.pl/> . Accessed: 01.07.2025.

Рекомендовано кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 18.07.2025

Корнієнко Руслан Іванович — аспірант кафедри прикладної екології та природокористування, e-mail: korniienkoasp@gmail.com ;

Кутний Богдан Андрійович — д-р техн. наук, професор кафедри теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики, e-mail: nning.kutnyy@nupp.edu.ua .

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава

R. I. Korniienko¹

B. A. Kutnyi¹

Prospects for the Application of Thermal Energy Storage Systems Based on Phase Change Materials in Ukraine

¹National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, Poltava

The article presents a comprehensive analysis of the feasibility of implementing thermal energy storage (TES) systems based on phase change materials (PCMs) in the context of post-war recovery of Ukraine's energy sector. It is established that large-scale destruction of centralized electricity infrastructure has created an objective need to develop decentralized energy sources, including cogeneration units and renewable energy systems (RES). Ensuring the effective operation of such systems requires the implementation of flexible technologies for balancing energy consumption and generation. Particular attention is paid to the global increase in energy demand and the corresponding growth in CO₂ emissions, which reached 37 Gt in 2023. Although Ukraine's contribution to global emissions remains relatively small, the modernization of its energy system necessitates a transition to more sustainable and safe solutions. The article provides the overview of the main methods of heat accumulation—sensible heat, latent heat of phase transition, and thermochemical reactions. The advantages of PCMs, which offer high energy storage density, are emphasized. The thermal properties of crystalline hydrates, particularly sodium acetate trihydrate, are analyzed due to their suitability for domestic heating systems. Practical limitations such as supercooling, phase separation, and low cycling stability are also examined. Examples of commercial PCM-based systems implemented in Germany, Japan, Poland, and Ukraine are presented. It is substantiated that PCMs represent a key component of a sustainable, energy-efficient, and environmentally safe decentralized energy system for Ukraine.

Keywords: thermal energy, thermal energy storage (TES), phase change materials (PCMs), crystalline hydrates, sodium acetate trihydrate, heat accumulation, environmental energy efficiency, CO₂ emissions.

Korniienko Ruslan I. — Post-Graduate Student of the Chair of Applied Ecology and Environmental Management, e-mail: korniienkoasp@gmail.com ;

Kutnyi Bohdan A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Heat and Gas Supply, Ventilation and Heat Power Engineering, e-mail: nning.kutnyy@nupp.edu.ua