

## ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В БУДІВНИЦТВІ

УДК 697.32+620.9

DOI 10.31649/2311-1429-2023-2-159-166

І. В. Коц  
О. Д. Панкевич  
О. В. Бадяка

## НАПРЯМКИ ПОКРАЩЕННЯ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВИХ АКУМУЛЯТОРІВ ТА ТЕПЛОАКУМУЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Вінницький національний технічний університет

Стаття присвячена дослідженню теплоакуюлюючих технологій як основного заходу з енергозбереження. В роботі проведено патентний пошук та аналіз наукових праць, у яких висвітлено питання та викладений основний матеріал існуючих технологій акумулювання теплової енергії. Наведено класифікацію основних типів теплоакуюлюючих (ТА) та теплоакуюлюючих матеріалів (ТАМ). Теплоакуюлюючі класифіковані: за природою акумулювання; за рівнем робочих температур; за тривалістю періоду заряду-розряду. Проаналізовано відмінності та конструктивні особливості ТА, переваги і недоліки. Визначено основні теплоакуюлюючі матеріали, які фактично використовуються або можуть використовуватись в подальшому. Описано теплофізичні властивості теплоакуюлюючих матеріалів, так як: питома теплоємність, теплота плавлення, густина та щільність.

Визначено методику розрахунку об'єму ємнісного та фазоперехідного теплових акумулюючих за наступними вихідними даними: прийнятий тип теплоакуюлюючого матеріалу, тип та теплові характеристики теплоносія, прийнятий перепад температури теплоакуюлюючого матеріалу. Наведено приклади практичного використання ємнісних акумулюючих, зокрема бак-акумулюючий в системі сонячного опалення, а також гравійного акумулюючого у прибудинковій теплиці типу «сонячний вегетарій». Описано використання кристалогідратів та органічних легкоплавких сполук (жирні кислоти та парафіни) як фазоперехідних теплоакуюлюючих матеріалів. Наведено характеристику термохімічних теплових акумулюючих, їх принцип дії, а також їх переваги над ємнісними та фазоперехідними акумулюючими установками. Описано реакції збагачення традиційного вуглецевого палива, а також наведено приклади реакцій, які можуть бути використані як теплоакуюлюючі процеси. Визначено перспективи подальшого дослідження.

**Ключові слова:** енергозбереження; тепловий акумулюючий (ТА); теплоакуюлюючий матеріал (ТАМ); ємнісний акумулюючий; фазовий перехід; альтернативні джерела енергії; теплоємність; зворотні хімічні реакції; ендотермічні та екзотермічні реакції.

### Вступ

Потреба світової енергосистеми в енергозберігаючих технологіях та використанні альтернативних та відновлювальних джерел теплової та електричної енергії з покращеними характеристиками визначає актуальність досліджень. Україна, через існуючі проблеми з постачанням та видобутком вуглеводневих джерел енергії, має критичну потребу у розвитку та впровадженні альтернативної енергетики. Основними джерелами відновлювальної енергії є вітрова, сонячна, геотермальна енергія та біомасові генератори [1]. Для систем тепlopостачання використовуються системи сонячної енергетики, теплові насоси та біогазогенераторні установки.

Потужність енергоустановок повинна мати достатній резерв для задоволення потреб споживачів, навіть у випадку зниження потужності енергетичних установок через аварійні ситуації або нерівномірний режим споживання. Нерівномірне споживання теплової енергії призводить до того, що потужність енергоустановок використовується лише під час пікового навантаження. Важливим фактором для використання альтернативної енергії також є сезонність, оскільки сила вітру для вітрових генераторів та інтенсивність теплового потоку та хмарність для сонячних батарей та колекторів можуть змінюватись. Тому виникає необхідність використання високоефективних технологій зберігання теплової енергії для рівномірного споживання протягом доби та року в теплоакуюлюючих установках.

Теплоакуюлюючі є одним із ключових аспектів ефективного використання теплової енергії, особливо відновлюваних джерел енергії. Теплові акумулюючі (ТА) є пристроями, які накопичують тепло, що може бути використане пізніше для опалення або виробництва електроенергії. Їх основна функція полягає в збереженні тепла, щоб його можна було використовувати, коли це буде необхідно.

Теплоакуюлюючі матеріали (ТАМ) є основною складовою частиною теплоакуюлюючих технологій. Їх основною властивістю є здатність накопичувати тепло під час періоду надлишкового теплового навантаження і звільняти його при необхідності. Різні типи ТАМ можуть мати різні теплоємності та ефективності.

До переваг теплоакумуляційних технологій, можна віднести зберігання тепла, яке дозволяє використовувати його в будь-який момент, незалежно від часу виробництва. Це забезпечує гнучкість та ефективність використання теплової енергії. Крім того, теплоакумуляційні системи можуть бути поєднані з альтернативними джерелами енергії, такими як сонячна або вітрова енергія, забезпечуючи стабільність та постійність постачання енергії. До недоліків теплоакумуляційних технологій, відноситься висока вартість. Встановлення такої системи може бути перешкодою для її широкого впровадження. Крім того, декілька теплоакумуляційних матеріалів можуть мати обмежену теплоємність або можуть бути шкідливими для навколишнього середовища.

Базові поняття та терміни, основні критерії класифікацій теплоакумуляторів, а також загальний опис всіх типів теплоакумуляторів та їх переваг і недоліків визначено в джерелах [1-4, 6]. Основні характеристики теплоакумуляторів на фазових переходах та найпоширеніші теплоакумуляційні матеріали описані в роботах [5, 7, 8].

*Метою роботи є розробка класифікації та проведення аналізу теплових акумуляторів (ТА), з порівнянням принципів роботи різних типів акумуляційних установок і теплоакумуляційних матеріалів (ТАМ) для визначення перспективи впровадження ТА в системи альтернативної енергетики.*

### Результати досліджень

Для дослідження використані наукові публікації розробників з України, Австралії та Німеччини. Технології, що використовують ємнісні теплоакумулятори, наведено у патентах та розробках математичної моделі теплових процесів, зокрема в роботах [9, 10, 12]. У патенті [9] наведено конструкцію теплиці з гравійним теплоакумулятором. Дослідження вчених з Австралії та Німеччини, як представлено роботами [11, 14], стосуються використання термохімічних теплових акумуляторів у поєднанні з тепловими насосами та сонячними панелями.

Основну методику та алгоритм розрахунку ємнісних та фазоперехідних теплових акумуляторів окреслено в роботі [13].

Згідно з рекомендаціями [3] класифікацію теплоакумуляторів можливо провести за наступними критеріями:

- за природою акумуляції: теплоємнісні (ТЄА), акумулятори з фазовим переходом матеріалу (АФП), термохімічні акумулятори (ТХА);
- за рівнем робочих температур: низькотемпературні (до 100 °С), середньотемпературні (від 100 до 400 °С) та високотемпературні (від 400 °С) теплоакумулятори;
- за тривалістю періоду заряду-розряду: короткострокові (до 3 діб), середньострокові (до 1 місяця) та міжсезонні (до 6 місяців або 1 півріччя).

Теплоємнісні акумулятори (ТА) відрізняються тим, що вони поглинають та віддають теплову енергію, змінюючи температуру без зміни агрегатного стану речовини [3]. Наприклад, вода є найвідомішим прикладом такого акумулятора і застосовується в системах опалення, вентиляції та кондиціонування з використанням буферних ємностей або баків-акумуляторів. В опалювальних системах, що використовують традиційні джерела енергії, бак-акумулятор використовується для вирівнювання графіку теплового навантаження та потужності котельні або іншої теплогенеруючої установки. Бак-теплоакумулятор також застосовується в системах комбінованого теплопостачання, що використовують відновлювані джерела енергії, наприклад, сонячну енергію. У роботі [12] запропоновано систему тепло- та холодопостачання з використанням сонячного колектора, бака-теплоакумулятора та підземного бака-колектора, де вода використовується як теплоносій та теплоємнісний акумулятор.

Крім води, як теплоємнісні акумулятори використовуються інші тверді та рідкі матеріали з питомою теплоємністю понад 1 кДж/(кг·К). Основні характеристики ємнісних теплоакумуляційних матеріалів наведені в табл. 1 [4].

З таблиці 1 видно, що вода є хорошим теплоакумулятором з найбільшою теплоємністю, серед інших речовин, вона вимагає найменше об'єму та маси для поглинання однакової кількості тепла. Проте, вода має найменший робочий температурний діапазон, і для застосування при вищих робочих температурах необхідно використовувати ємності під тиском.

## Теплофізичні характеристики теплоємнісних ТАМ

Матеріал	Робочий діапазон температур, °С	Питома масова теплоємність, кДж/(кг·К)	Питома об'ємна теплоємність, кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	Теплопровідність, Вт/м·К
<i>Тверді:</i> натрій хлорид (кухонна сіль)	до 800	0,92	2,0	9
Чавун	до 1500	0,46	3,6	50
Граніт	до 1700	0,79	2,2	2,7
Цегла, цегляна крихта	до 1500	0,84	1,4	0,6
Сухий ґрунт		0,79	1,0	1,0
<i>Рідкі:</i> Вода	0..100	4,2	4,2	0,6
Масило	-50..+330	2,4	1,9	0,1
Диетиленгліколь	-10..+240	2,8	2,9	

Один з типів систем теплоакумуляції, які використовуються для зберігання та віддачі тепла виступають акумулятори тепла з твердими гранульованими речовинами. Наприклад, гравій чи щебінь можуть використовуватися як теплоакумуляючі матеріали через їхню здатність накопичувати тепло. З основою оксидом кремнію, питома теплоємність може становити 1 кДж/(кг·К) [4]. Робоча температура таких теплоакумуляторів може досягати кількох сот градусів, а як теплоносія для заряду-розряду акумулятора застосовується гаряче повітря. Такі системи теплоакумуляції можуть бути ефективними, але їхній результат може залежати від кількості доступного тепла, виду теплоакумуляючого матеріалу, його об'єму, інженерного розрахунку та інших факторів. Перевагою таких теплоакумуляторів є їх простота та дешевизна, проте для гравію потрібно більше об'єму, ніж для води. Такі матеріали можуть застосовуватися як "сонячні ставки" при покритті великої площі. У роботі [9] описано застосування кам'яного теплоакумулятора в товщі ґрунту або субстрату теплиці. Як теплоакумуляюча речовина використовується пористий бетон та гравій. Недоліком запропонованої конструкції є необхідність підведення додаткового електроживлення для нагнітачів повітря з середовища теплиці в товщу теплоакумуляючої речовини, а також необхідність влаштування додаткового теплоізоляційного шару для зменшення тепловтрат в ґрунт.

Теплоакумуляюча здатність, тобто кількість теплоти, яку може накопичити одиниця об'єму емнісного теплоакумулятора, визначається за формулою [4]:

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} C_P dT ; \quad (1)$$

де  $T_1, T_2$  – робочий інтервал температур акумулятора, °С,

$C_P$  – ізобарна теплоємність ТАМ, кДж/К.

Методика розрахунку необхідної кількості ТАМ описується за наступним алгоритмом [13]:

- визначається кількість теплової енергії, яку доцільно акумулявати, в залежності від певних задач (накопичення надлишку тепла, що згенерувалось теплогенератором, або необхідність навмисного охолодження теплоносія);
- виконується підбір типу ТАМ в залежності від економічних показників, знаходження теплоємності ТАМ, густини або щільності та його часу зарядки;
- знаходження об'єму, що займатиме ТАМ в теплоакумуляторі.

Необхідний об'єм теплоємнісного ТАМ визначається за формулою [13]:

$$V_{TE} = \frac{Q_{TE}}{c \rho \Delta T}, \text{ м}^3 \quad (2)$$

де  $Q_{TE}$  – необхідна кількість теплової енергії для зарядки теплоємнісного акумулятора, кДж:

$$Q_{TE} = c_i L \rho_i (t_K - t_{II}), \quad (3)$$

- $C$  – питома теплоємність ТАМ, кДж/(кг·К);  
 $\rho$  – густина або щільність ТАМ, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\Delta T$  – прийнятий температурний перепад охолодження ТАМ, °С;  
 $c_t$  – питома теплоємність теплоносія, кДж/(кг·К);  
 $L$  – об’єм теплоносія, що подається для зарядки акумулятора, м<sup>3</sup>;  
 $\rho_t$  – густина теплоносія, кг/м<sup>3</sup>;  
 $t_K; t_{II}$  – відповідно кінцева та початкова температури теплоносія, °С.

Накопичення теплової енергії в ТАМ фазового переходу супроводжується послідовно двома явищами:

- незначним підвищенням температури ТАМ;
- після досягнення температури плавлення ТАМ зміна агрегатного стану матеріалу.

Тому зарядка АФП здійснюється теплотою підвищення температури та теплотою плавлення.

Наведені залежності (1) - (3) показано без врахування втрат під час акумуляції та зарядки, оскільки втрати теплоти залежать від особливостей огороження корпусу акумулятора або його теплоізоляційного шару. Незважаючи на широке поширення теплоємнісних теплоакумуляторів (ТА), їх застосування є малоефективним (порівняно з акумуляторами на основі фазового переходу) через те, що зниження значення теплоємності вимагає компенсації збільшенням об’єму [3], а втрати теплоти прямо пропорційні перепаду температури від початкового значення до фактичного [4].

Теплові акумулятори на основі фазового переходу (АФП) засновані на здатності ТАМ змінювати свій агрегатний стан при накопиченні енергії (зазвичай це зворотній процес плавлення-кристалізація). Подібні акумулятори характеризуються вищою густиною тепла при малому об’ємі і відносно сталою температурою розряду 3. При цьому виділяються наступні недоліки: вартість матеріалів для АФП значно вища, ніж для ТАМ, а для кожної заданої температури потрібно підбирати певну речовину, так як температура плавлення у цих речовин стала і не залежить від зміни умов.

Накопичення теплової енергії в ТАМ фазового переходу супроводжується послідовно двома явищами:

- незначним підвищенням температури ТАМ та після досягнення температури плавлення ТАМ;
- зміною агрегатного стану матеріалу. Тому зарядка АФП здійснюється теплотою підвищення температури та теплотою плавлення.

Необхідний об’єм ТАМ фазового переходу розраховується за формулою [13]:

$$V_{ФП} = \frac{Q}{c\rho\Delta T + q_{пл}\rho}, \text{ м}^3 \quad (4)$$

де  $q_{пл}$  – питома теплота плавлення, кДж/кг.

З формули (4) видно, що складова теплоти плавлення  $q_{пл} \cdot \rho$  розраховується без перепаду температури, а її наявність, на відміну від формули (2), означає менший необхідний об’єм ТАМ.

Ефективний ТАМ фазового переходу повинен мати наступні властивості [4]:

- висока ентальпія фазового переходу та густина;
- зручна для експлуатації температура плавлення;
- висока теплоємність у твердому та рідкому агрегатних станах;
- висока теплопровідність у твердому та рідкому станах;
- мала ймовірність розшарування ТАМ;
- незначні температурне розширення та зміни об’єму;
- слабка хімічна та корозійна активність;
- повноцінна або підвищена безпечність експлуатації, низька токсичність.

Деякі ТАМи фазового переходу можуть супроводжуватись не лише плавленням, а і деякими структурними перетвореннями [4], залишаючись при цьому в одному агрегатному стані. Такі перетворення характерні для алотропних речовин (тверда сірка, сульфат літію). Наприклад, структурний перехід сульфату літію  $Li_2SO_4$  при температурі 578 °С змінює структуру до кубічної решітки, а теплота такого переходу становить 214 кДж/кг (для порівняння, теплота плавлення цього ж сульфату літію становить 67 кДж/кг при температурі плавлення 860 °С) [4].

Для акумулявання теплової енергії фазового переходу в діапазоні температур до 100 °С пропонуються використовувати кристалогідрати [3], проте наявність води в структурі цих сполук

робить цей матеріал нестабільним: при розрядці акумулятора не вся вивільнена вода утворює водневі зв'язки з основною речовиною і відщіджується, а робота такого матеріалу обмежується 50-ма циклами заряду-розряду.

У якості ТАМи фазового переходу найбільшу перспективу мають органічні речовини: жирні кислоти та парафіни [3, 4, 7], так як їх отримання та синтез пов'язані з використанням природних джерел, а низька температура плавлення дозволяє їх використовувати при низькотемпературному акумуляванні (таблиця 2).

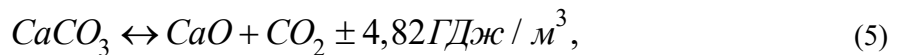
Таблиця 2

**Характеристики органічних ТАМів [3]**

Речовина	Хімічна формула	Температура плавлення, °С	Теплота плавлення, кДж/кг	Густина, кг/м <sup>3</sup>
Міристинова кислота	C <sub>13</sub> H <sub>27</sub> COOH	58	203,6	962,2
Маргаринаова кислота	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>15</sub> COOH	68	216,6	857,8
Стеаринова кислота	C <sub>17</sub> H <sub>35</sub> COOH	70	181,8	847,0
Парафін високоплавкий	C <sub>32</sub> H <sub>66</sub>	73	212,0	781,4
Церезинова кислота	C <sub>36</sub> ...C <sub>55</sub>	75	165,1	870,0
Парафін C <sub>24</sub>	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub>	51,1	141,2	778,6
Парафін C <sub>14</sub>	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	51,6	150,8	770,0

Практичне застосування ТА з фазовим переходом для низькотемпературного акумулявання наведено в роботі [3]: для експерименту фазового переходу дослідили процес заморожування води при 0°С з розміщенням ТА під землею для покращення теплоізоляційних якостей. Використання такого методу вигідне в кліматичних зонах, де навантаження на охолодження в жарку пору рівне навантаженню на опалення в холодну пору року, що в свою чергу передбачає подвійне використання ТА. Як результат, річна економія електроенергії досягнула майже 50% в порівнянні з традиційним електрообігрівом взимку та кондиціонуванням влітку.

Найменш дослідженими та маловивченими є термохімічні акумулятори тепла (ТХА), принцип яких заснований на зворотних хімічних реакціях з попутним теплоперенесенням. Так акумулявання тепла відбувається при протіканні реакції в одну сторону (ендотермічний процес), а розрядка акумулятора – при протіканні в іншу сторону (екзотермічний процес) [4]. Прикладом такого процесу є розклад карбонату кальцію [6]:



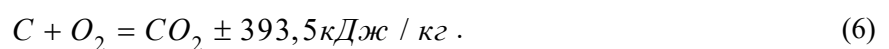
тобто реакція розкладу при температурі 860°С супроводжується акумуляванням в реагентах 4,82 ГДж енергії при розкладі 1 м<sup>3</sup> карбонату кальцію.

Густина енергії в ТХА вища за густину енергії в АФП, а слідом і вища за густину енергії в ТСА [3]. Недоліками при створенні ТХА є незначна кількість дешевих хімічних сполук, що можуть вступати в зворотні реакції, виділення газів як продукти реакцій, що вимагає спеціального устаткування для відбору. В ТХА теплова енергія може запасатись у вигляді внутрішньої енергії молекул, або в продуктах реакції, які згодом можуть реагувати між собою, виділяючи теплову енергію [4], що дозволяє знизити втрати енергії, так як хімічні сполуки продуктів ендотермічної реакції залишаються незмінними, до наступної екзотермічної реакції.

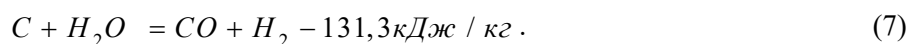
На практиці використовується процес «збагачення» викопного палива [4, 6], яке з певної точки зору можна віднести до термохімічної акумуляції тепла.

Порівняльний процес обробки вугілля парою (газифікація вугілля) наведено в роботі [6].

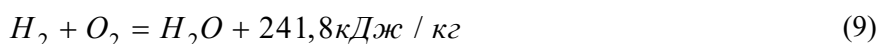
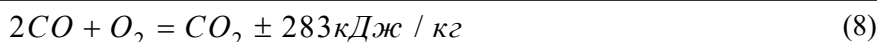
При звичайному спалюванні вугілля вивільняється 393 кДж/кг тепла:



При газифікації вугілля водяною парою під тиском отримується суміш окису вуглецю та водню (так званий синтез-газ):



Спалювання вихідних продуктів реакції супроводжується виділенням тепла:



Сумарний тепловий ефект реакцій у рівняннях (8) і (9) становить 524,8 кДж/кг, що на 131,3 кДж/кг більше (теплота, поглинута вугіллям з водяної пари в реакції згідно рівняння (7)) ніж теплота простого спалювання вугілля. Подібні реакції збагачення вуглецевого та вуглеводневого палива наведено у таблиці 3. Деякі процеси знайшли своє призначення в металургійній промисловості.

Таблиця 3

#### Основні процеси переробки та збагачення органічного палива [4]

Назва процесу	Рівняння реакцій, з зазначенням $\Delta H$ , ккал/моль	Теплота згоряння, ккал/моль		Акумулятована кількість теплоти, кДж/т карбону	Збагачення палива енергією, %
		вихідного палива	продуктів переробки палива		
Вуглекислотна конверсія вугілля	$C + CO_2 = 2CO - 41,2$	94	135,3	14	33
Парова конверсія природного газу (метану)	$CH_4 + H_2O = 3H_2 + CO - 49,3$	191,8	241,0	13	26
Вуглекислотна конверсія газу	$CH_4 + CO_2 = 2CO + 2H_2 - 59,1$	191,8	250,9	15,5	31

Проблема, пов'язана з описаними процесами, полягає в тому, що вони вимагають обробки при високих температурах (300-500°C) та під високим тиском, що обмежує їх проведення на спеціалізованих установках з вузьким спектром застосування.

#### Висновок

Розглянуто класифікацію теплових акумуляторів та охарактеризовано принципи роботи всіх типів акумуляційних установок. Найпоширенішим типом теплових акумуляторів є теплоємнісні (ТСА) акумулятори, в той час як акумулятори з фазовим переходом (АФП) мають меншу популярність. Термохімічні акумулятори тепла (ТХА) використовуються переважно як теоретично описані або лабораторно досліджені процеси, або для збагачення викопного палива з накопиченням високотемпературної теплової енергії. Найбільший енергетичний потенціал мають зворотні термохімічні реакції, оскільки вони ефективно перетворюють теплову енергію на внутрішню енергію речовини на молекулярному рівні, майже без накопичення явної теплоти. Таким чином, впровадження термохімічних акумуляторів з використанням низькопотенційних джерел теплової енергії є перспективним напрямком в галузі енергозбереження та теплоенергетики.

Теплові акумулятори ємнісного та фазоперехідного типів є практично значущими в системах альтернативної теплоенергетики, оскільки вони забезпечують рівномірне постачання енергії та компенсують сезонні коливання теплогенеруючих установок. Застосування акумуляторів з фазовим переходом дозволяє ефективно використовувати енергію, зокрема насичені пари чистих речовин, для забезпечення стабільного і постійного постачання тепла. Термохімічні акумулятори тепла використовують реакції хімічного зв'язування речовини з отриманням або виділенням теплової енергії, переважно використовуються в наукових дослідженнях та експериментальних установках.

Результати дослідження свідчать, що теплові акумулятори різних типів є ефективними і перспективними засобами зберігання теплової енергії. Вони дозволяють стабілізувати постачання тепла, забезпечувати компенсацію сезонних коливань теплогенеруючих установок і зменшувати викиди в атмосферу

#### Перспективи подальшого дослідження

Тенденція досліджень полягає у глибокому вивченні зворотних термохімічних реакцій як способу накопичення теплової енергії та у пошуку зворотних хімічних реакцій зі збереженням і вивільненням тепла. Ці реакції мають потенціал для створення термохімічного акумулятора теплової енергії, який може бути використаний у системах теплопостачання, де використовуються низькопотенційні відновлювальні джерела теплової енергії.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ратушняк Г.С., Дзеджула В.В., Анохіна К.В. Енергозберігаючі відновлювальні джерела теплопостачання [Текст]: навчальний посібник. МОН України, ВНТУ. Вінниця: ВНТУ, 2010. 170 с.
2. Відновлювані джерела енергії: монографія / Барило А. А., Кудря С. О., Шинкаренко Н. Я. [та ін.]; за ред. С. Кудрі. Київ, Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с. ISBN 978-966-999-077-8.
3. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії / Підручник: Київ, НТУУ «КПІ», 2012. 492 с.
4. Остапенко В.В., Остапенко Д.В., Лук'янов О.В. Схеми роботи акумуляторів теплоти фазового переходу в системах теплопостачання з котлами на органічному паливі // Сучасне промислове та цивільне будівництво. 2016. том 12, №2. С. 71-77.
5. Гребенюк А. Н. Способи акумуляції енергії нетрадиційних джерел // Гірнична електромеханіка та автоматика. 2014. Вип. 93. С. 131-136. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/geta\\_2014\\_93\\_28](http://nbuv.gov.ua/UJRN/geta_2014_93_28).
6. Козак Х.Р., Желих В.М. Оцінка та аналіз характеристик теплових акумуляторів для повітряних геліосистем / Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. Вип. 19, 2016. с. 65-70.
7. Thomas Bauer. Thermal energy storage materials and systems / Th. Bauer, W. Steinmann, R. Tamme // Institute of Technical Thermodynamics. – Stuttgart. – 2012. – pp.131-177
8. Патент 21955 Україна : МПК А01G 9/1. Теплиця типу «Сонячний вегетарій» / І. В. Коц, Н. Б. Терновенко, О. П. Сліпенська; заявник та власник патенту Вінницький національний технічний університет. - № а200611434; заявл. 30.10.2006; опубл. 10.04.2007, Бюл. № 4/2007.
9. Коц І. В., Грициун А. В., Берник І. М., Ярмолук Ю. М. Математичне моделювання тепломасообмінних процесів теплиці із застосуванням енергозберігаючих технологій // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. - 2001. - № 8. - С. 54-59.
10. Williams O. A comparison of reversible chemical reactions for solar thermochemical power generation / O. M. Williams // EDP Sciences. – Canberra. – 1980. – pp.453-461
11. Патент 6714 Україна : МПК F24J2/14. Комбінована система сонячного тепло- та холодопостачання / І. А. Пономарчук. - № а20041109040; заявл. 05.11.2004; опубл. 16.05.2005, Бюл. №5, 2005 р.
12. Теплові акумулятори енергії. Методичні вказівки для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / Самойчук К. О., Ковальов О. О. – Мелітополь: ТДАУ, 2018. – 20 с.
13. Henner Kerskes. Chemical energy storage using reversible solid/gas-reactions (CWS) – results of the research project / H. Kerskes, B. Mette, F. Bertsch, S. Asenbeck [etc] // Energy Procedia. – Stuttgart, 2012. – pp 294-304.

## REFERENCE

1. Ratushnyak H.S., Dzhedzhula V.V., Anokhina K.V. Enerhozberihayuchi vidnovlyuval'ni dzhherela teplopostachannya [Tekst]: navchal'nyy posibnyk. MON Ukrayiny, VNTU. Vinnytsya: VNTU, 2010. 170 s.
2. Vidnovlyuvani dzhherela enerhiyi: monografiya / Barylo O. O., Kudrya S. O., Shynkarenko N. YA. [ta in.]; za red. S. Kudri. Kyuyiv, Instytut vidnovlyuvanoyi enerhetyky NANU, 2020. 392 s. ISBN 978-966-999-077-8.
3. Kudrya S. O. Netradytsiyni ta vidnovlyuvani dzhherela enerhiyi / Pidruchnyk: Kyuyiv, NTUU «KPI», 2012. 492 s.
4. Ostapenko V.V., Ostapenko D.V., Luk'yanov O.V. Skhemy roboty akumulyatoriv teploty fazovoho perekhodu v systemakh teplopostachannya z kotlamy na orhanichnomu palyvi // Suchasne promyslove ta tsyvil'ne budivnytstvo. 2016. Tom 12, №2. S. 71-77.
5. Hrebenyuk O.M. Sposoby akumulyatsiyi enerhiyi netradytsiynykh dzhherel // Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka. 2014. Vip. 93. S. 131-136. Rezhym dostupu: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/geta\\_2014\\_93\\_28](http://nbuv.gov.ua/UJRN/geta_2014_93_28).
6. Kozak KH.R., Zhelykh V.M. Otsinka ta analiz kharakterystyk teplovykh akumulyatoriv dlya povitryanykh heliosystem / Ventylyatsiya, osvittlennya ta teplohapostachannya. Vip. 19, 2016. s. 65-70.
7. Thomas Bauer. Termal'na enerhiya zberihannya materialiv i system / Th. Bauer, W. Steinmann, R. Tamme // Institute of Technical Thermodynamics. - Stuttgart. - 2012. - pp.131-177
8. Patent 21955 Ukrayina: MPK A01G 9/1. Teplytsya typu «Sonyachnyy vehetariy»/I. V. Kots, N. B. Ternovenko, O. P. Slipen'ka; zayavnyk ta vlasnyk patentu Vinnyts'kyu natsional'nyy tekhnichnyy universytet. - № A200611434; zayavl. 30.10.2006; opubl. 10.04.2007, Byul. №4/2007.
9. Kots I. St, Hrytsun A. V., Bernik I. M., Yarmolyuk YU. M. Matematychnе modelyuvannya teplomasoobminnykh protsesiv teplytsi iz zastosuvannyam enerhozberihayuchykh tekhnolohiy // Zbirnyk naukovykh prats' Vinnyts'koho natsional'noho ahrarnoho universytetu. – 2001. – № 8. – S. 54-59.
10. Williams O. A comparison of reversible chemical reactions for solar thermochemical power generation / O. M. Williams // EDP Sciences. - Canberra. - 1980. - pp.453-461
11. Patent 6714 Ukrayina: MPK F24J2/14. Kombinovana systema sonyachnoho teplo- ta kholodopostachannya / I. O. Ponomarchuk. - № A20041109040; zayavl. 05.11.2004; opubl. 16.05.2005, Byul. №5, 2005 nar.
12. Teplovi akumulyatory enerhiyi. Metodychni vkazivky dlya studentiv spetsial'nosti 133 «Haluzeve mashynobuduvannya» / Samoychuk K. O., Koval'ov O. O. – Melitopol': TDAU, 2018. – 20 s.
13. Henner Kerskes. Chemical energy storage using reversible solid/gas-reactions (CWS) - results of the search project / H. Kerskes, B. Mette, F. Bertsch, S. Asenbeck [etc] // Energy Procedia. - Stuttgart, 2012. - pp 294-304.

**Коц Іван Васильович** – к. т. н., професор кафедри інженерних систем в будівництві, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [ivvkots@ukr.net](mailto:ivvkots@ukr.net). ORCID: 0000-0003-0870-6385.

**Панкевич Ольга Дмитрівна** – к. т. н., доцент кафедри інженерних систем у будівництві, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [pankevich@vntu.edu.ua](mailto:pankevich@vntu.edu.ua)

**Бадяка Олег Володимирович** – аспірант кафедри інженерних систем у будівництві, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [oleg.badyaka@ukr.net](mailto:oleg.badyaka@ukr.net)

I. Kots  
O. Pankevych  
O. Badiaka

## CURRENT STATE AND TRENDS OF IMPROVEMENT CHARACTERISTICS OF MAIN HEAT ACCUMULATING INSTALLATIONS AND MATERIALS

*The article is devoted to the study of heat storage technologies as the main energy saving measure. The paper conducts a patent search and analyzes scientific papers that cover the issue and present the main material of existing technologies for thermal energy storage. The classification of the main types of heat accumulators (HA) and heat storage materials (HSM) is presented. Heat accumulators are classified: by the nature of accumulation; by the level of operating temperatures; by the duration of the charge-discharge period. The differences and design features of TAMs, advantages and disadvantages are analyzed. The main heat storage materials that are actually used or can be used in the future are identified. The thermophysical properties of heat storage materials, such as specific heat capacity, melting point, density, and density, are described.*

*The methodology for calculating the volume of capacitive and phase-transition heat accumulators is determined based on the following initial data: the type of heat storage material, the type and thermal characteristics of the heat carrier, and the temperature drop of the heat storage material. Examples of the practical use of capacitive batteries are given, in particular, a tank battery in a solar heating system, as well as a gravel battery in a solar vegetable garden. The use of crystalline hydrates and organic low-melting compounds (fatty acids and paraffins) as phase-transition heat storage materials is described. The characteristics of thermochemical thermal accumulators, their principle of operation, and their advantages over capacitive and phase-transition accumulation units are presented. The reactions of enrichment of traditional carbon fuels are described, and examples of reactions that can be used as heat storage processes are given. Prospects for further research are identified.*

**Keywords:** energy saving; thermal accumulator (TA); heat storage material (HSM); capacitive accumulator; phase transition; alternative energy sources; heat capacity; reverse chemical reactions; endothermic and exothermic reactions.

**Ivan Kots** – Ph.D. (Eng.), professor of the Department of engineering systems in construction, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: ivvkots@ukr.net

**Olga Pankevych** – Ph.D. (Eng.), docent of the Department of engineering systems in construction, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: pankevich@vntu.edu.ua

**Oleh Badiaka** – Graduate student of the Department of engineering systems in construction, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: oleg.badyaka@ukr.net