

УДК 697.329

Володимир Дерій*, канд. техн. наук., ст. наук. співр., <https://orcid.org/0000-0002-5689-4897>

Олександр Згуровець, канд. техн. наук., ст. досл., <https://orcid.org/0000-0001-8439-9781>
Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150,
Україна

*Автор-кореспондент: derii.volodymyr@gmail.com

АКУМУЛЯТОРИ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Анотація. У статті зроблено аналітичний огляд накопичувачів теплової енергії. Показано причини, які обумовлюють їх попит. Встановлено, що ринок теплових акумуляторів розвивається досить динамічно. За прогнозом Міжнародного агентства з відновлюваної енергії, глобальний ринок теплових акумуляторів може зрости втричі до 2030 р. – з 234 ГВт·год встановленої ємності у 2019 р. до близько 800 ГВт·год у 2030 р. Очікується, що інвестиції в розвиток теплових акумуляторів сягнуть 13–28 млрд дол. США. Їх ємність для енергетики може становити 491–631 ГВт·год, для теплопостачання – 143–199 ГВт·год, для охолодження – 23–26 ГВт·год. Основними драйверами такого різкого зростання ємності накопичувачів енергії компанія Bloomberg NEF вважає Закон США про зниження інфляції, який передбачає фінансування чистих технологій на суму понад 369 млрд дол. США, а також план Європейського Союзу REPowerEU щодо зменшення залежності від газу з Росії. Очікувані з 2025 року значні додаткові обсяги сховищ у комунальному секторі узгоджуються з амбітними цілями щодо відновлюваної енергетики, викладеними в плані REPowerEU. Метою даного огляду є пошук та аналіз технологій зберігання теплової енергії для їх можливого використання в централізованому теплопостачанні України. Проведений огляд показав, що найбільш досконалою технологією є теплоємнісна акумуляція. Вона найдешевша та найбільш поширена в централізованому теплопостачанні. Для короткострокового зберігання теплової енергії доцільно використовувати баки-акумулятори та магістральні теплові мережі. Для сезонного акумулювання теплової енергії використовуються спеціальні утеплені бетонні підземні сховища як природного, так і штучного походження. Перспективною технологією сезонного зберігання теплової енергії є льодовий акумулятор, розроблений компанією Viessmann, для якого потрібно значно менше простору, ніж для теплоємнісного акумулятора. Термохімічні акумулятори знаходяться на ранніх стадіях розроблення, до 2050 р. можуть бути виготовлені їх демонстраційні зразки.

Ключові слова: акумулятор, тепла енергія, теплоємність, фазовий перехід.

1. Вступ

Необхідність акумуляції теплової енергії обумовлена можливістю накопичення сонячної енергії в теплу пору року та використання її в опалювальний період, а також розбіжністю графіків генерації вітрових електростанцій, сонячних електростанцій та сонячних колекторів (БЕС, СЕС, СК) з її споживанням як протягом доби, так і протягом року. Технології акумуляції теплової енергії дозволяють збалансувати нерівномірність її виробництва та попиту протягом дня, тижня та сезону, що підвищує гнучкість системи генерації-споживання. Теплові акумулятори (Thermal Energy Storage – TES) дозволяють зменшити пікове навантаження, підвищити енергетичну та економічну ефективність енергетичних систем, зменшити викиди парникових газів.

За останнім прогнозом дослідницької компанії Bloomberg NEF, до кінця 2030 р. сукупна ємність накопичувачів енергії (всі технології) в усьому світі досягне 411 ГВт (або 1194 ГВт·год). Це в

15 разів більше порівняно з 2021 р. (27 ГВт/56 ГВт·год) [1]. Основними драйверами такого різкого зростання ємності накопичувачів енергії компанія Bloomberg NEF вважає Закон США про зниження інфляції, який передбачає фінансування чистих технологій на суму понад 369 млрд дол., а також план Європейського Союзу REPowerEU щодо зменшення залежності від газу з Росії. Вторгнення Росії в Україну має явний вплив на зростання накопичувачів TES в Європі. Рекордні ціни на електроенергію змушують споживачів розглядати нові форми постачання енергії, що в найближчій перспективі буде стимулювати ринок побутових накопичувачів. Очікувані з 2025 року значні додаткові обсяги сховищ у комунальному секторі узгоджуються з амбітними цілями щодо відновлюваної енергетики, викладеними в плані REPowerEU [1].

За прогнозом Міжнародного агентства з відновлюваної енергії, глобальний ринок TES може зрости втричі до 2030 р. – з 234 ГВт·год встановленої потужності у 2019 р. до близько 800 ГВт·год у 2030 р. Очікується, що інвестиції в розвиток TES сягнуть 13–28 млрд дол. США. Ємність TES для енергетики може становити 491–631 ГВт·год, для тепlopостачання – 143–199 ГВт·год, для охолодження – 23–26 ГВт·год [2].

Метою даного огляду є пошук та аналіз технологій зберігання теплової енергії для їх можливого використання в централізованому тепlopостачанні.

2. Методи та матеріали

Всі типи TES характеризуються наступними параметрами [2]:

- ємність – кількість енергії, що зберігається в TES;
- потужність – характеризує, як швидко енергія накопичується та віддається;
- ККД – це відношення енергії розрядження до необхідної для цього енергії зарядження TES;
- період зберігання – визначає тривалість зберігання енергії – години, дні, тижні і місяці для сезонного зберігання;
- час заряджання та розряджання – скільки часу необхідно для зарядки / розрядки TES;
- вартість одиниці ємності TES (євро/кВт·год) або потужності (євро/кВт) системи зберігання.

За призначенням TES можна розділити на дві великі групи: короткочасного (оперативного) зберігання енергії (години, доба) та довгострокового використання (сезонні) – STES, LTES (Long-Term (Seasonal) Thermal Energy Storage). І якщо з впровадженням теплових акумуляторів короткочасного зберігання особливих проблем не виникає, то зовсім інша ситуація із впровадженням сезонних акумуляторів. Вони потребують великих резервуарів, які, у свою чергу, потребують великої площі, що в умовах щільної міської забудови реалізувати дуже проблематично. Проте, як зазначається в [3], LTES можуть зіграти значну роль в декарбонізації енергетики. Тому для вирішення цього питання науковці Данії, Німеччини, Австрії, Швейцарії та Північної Ірландії розробляють інноваційний проєкт сезонного TES. Загальна вартість проєкту становить € 6,65 млн, Європейський Союз надав € 4,7 млн [4]. Проєкт передбачає проведення досліджень в трьох напрямках: теплові акумулятори на базі твердих та рідких адсорбційних сполук, а також латентні теплові акумулятори (акумулятори фазового переходу речовин). Цей проєкт дає надію на вирішення проблем із впровадженням сезонних акумуляторів теплової енергії.

За характером фізико-хімічних процесів, що протікають в теплових акумуляторах, всі їх технології можна розподілити на чотири групи [5]:

1. акумулятори ємнісного типу, в яких використовується теплоємність акумулюючого матеріалу (що нагрівається або охолоджується) без зміни його агрегатного стану (природний камінь, галька, пісок, бетон, солі та їх розчини, вода та інше);
2. акумулятори фазового переходу, в яких використовується теплота зміни агрегатного стану речовин (плавлення, затвердіння, конденсації, випаровування);
3. акумулятори, засновані на виділенні і поглинанні теплоти при зворотних хімічних і фотохімічних реакціях;

4. абсорбційні накопичувачі – використовують тепло абсорбції пари матеріалів, таких, наприклад, як цеоліт-вода (адсорбція) або вода-бромід літію (абсорбція).

Теплоємнісні акумулятори. Найбільше застосування на даний час мають TES першої групи (ємнісного типу). Їх питомі ємності становлять 10–80 кВт·год на тонну, ККД від 50% до 98%, залежно від питомої теплоємності робочої речовини та теплової ізоляції самого TES, робоча температура досягає 1000°C. У порівнянні з іншими технологіями TES цієї групи найпростіші та найдешевші. В якості робочої речовини в них найчастіше використовується вода. Ці акумулятори знаходять широке застосування в енергетиці, промисловості, будівлях, а також централізованому опаленні та охолодженні. Головний їх недолік це великі масогабаритні показники та необхідність високого рівня теплової ізоляції [2].

Кількість теплової енергії, яку може накопичити TES, можна визначити за формулою:

$$Q = kV \rho c (t_2 - t_1) * 10^{-6} = kmc(t_2 - t_1) * 10^{-6}, \quad (1)$$

де Q – кількість накопленої теплової енергії в TES (ємність TES), МВт·год; k – коефіцієнт пропорційності 0,2778 МВт·год/ГДж; V – фізичний об'єм акумулятора, м³; ρ – густина робочого тіла акумулятора, кг/м³; c – масова питома теплоємність робочої речовини, кДж/(кг·°C); t_1, t_2 – початкова та кінцева температура в TES, °C; m – маса робочої речовини.

Як видно з формули (1), ємність TES залежить від трьох величин – маси робочої речовини, її питомої теплоємності та різниці температур зарядженого та розрядженого TES, що дає можливість будівництва ємнісних TES для різних потреб.

Так як в багатьох випадках обмежуючим фактором є об'єм TES, то його можна визначити виходячи з виразу (1):

$$V = \frac{Q * 10^6}{\rho c (t_2 - t_1)}, \text{ м}^3. \quad (2)$$

Вибираючи відповідним чином робочу речовину та різницю температур зарядженого та розрядженого TES, можна мінімізувати його об'єм для заданих умов.

В системах теплопостачання найчастіше для оперативної роботи використовуються водяні TES у вигляді поверхневих баків-акумуляторів, для таких цілей можна також використовувати магістральні теплові мережі. Для сезонних акумуляторів, як правило, використовуються підземні TES.

Приклади використання оперативних та сезонних TES в централізованому теплопостачанні наведено нижче.

Данія. В м. Brædstrup для сезонних акумуляторів використовують 48 вертикальних свердловин у землі глибиною 45 м (до рівня ґрунтових вод), в м. Marstal – підземний бетонний резервуар об'ємом 75000 м³, в м. Dronninglund – резервуар об'ємом 60000 м³, в м. Gram резервуар об'ємом 44800 м³ [5]–[6]. У всіх наведених прикладах сезонні TES працюють спільно із сонячними колекторами, тепловими насосами, електрокотлами та котлами на природному газі, для оперативної роботи використовуються баки-акумулятори [5]–[6].

Херлен (Нідерланди). У 2012 році була розроблена абсолютно нова концепція використання колишніх вугільних шахт як накопичувачів енергії для генерації тепла та охолодження. Система повністю автоматизована з «розумними мережами» для доставки води для опалення та охолодження споживачам. Вода в шахтах служить просто резервуаром для зберігання – свого роду акумулятором [4].

Німецька компанія Lumenion розробила високотемпературні накопичувачі тепла, використовуючи сталь як речовину для зберігання теплової енергії. Ця технологія акумулювання призначена для використання джерел енергії нестабільної генерації – ВЕС та СЕС. Сталеві елементи нагріваються до температури близько 650°C за допомогою звичайних нагрівальних елементів. Система теплоізована, втрати становлять близько 0,5% на добу. Накопичену теплоту можна

використовувати у вигляді пари для парових турбін для виробництва електроенергії або через теплообмінники для централізованого опалення. ККД становить близько 95%. Пілотний проект встановлено на Bottroper Weg у Берліні, з підключенням до системи централізованого теплопостачання. Ємність накопичувача становить 2,4 МВт·год, потужність зарядки 360 кВт, потужність теплового розряду 100 кВт. Необхідна для накопичувача площа становить 25 м² (5 x 5 м), а температура генерованої ним теплоти – 90°C [5].

Залежність питомих витрат водяних TES від їх ємності показана на рис. 1 [5].

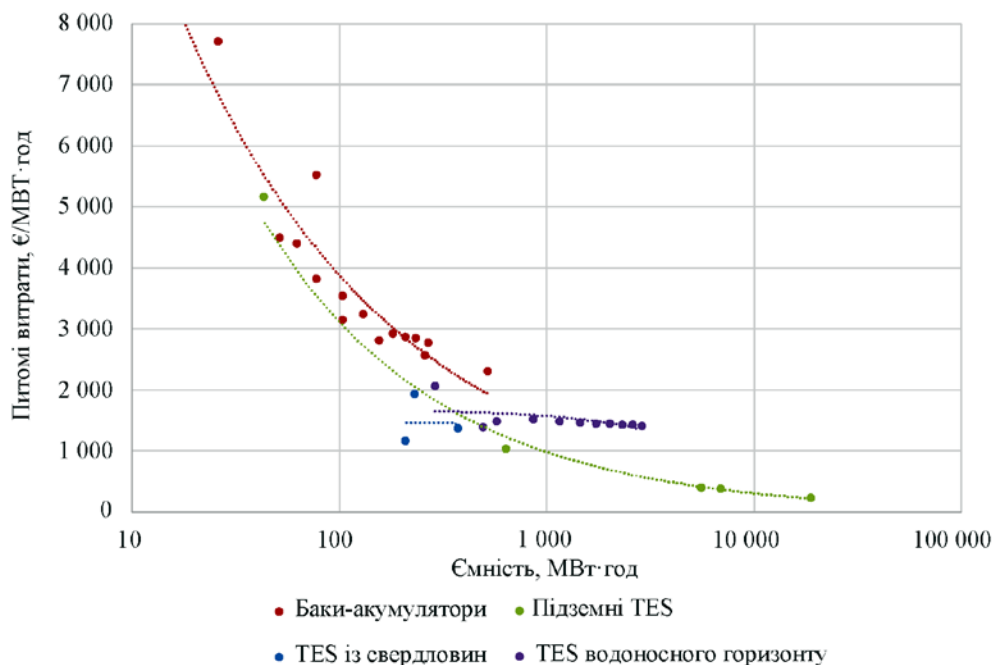


Рис. 1. Питомі витрати водяних TES [5]

В табл. 1 наведені основні показники ємнісних накопичувачів теплової енергії [5].

В ємнісних акумуляторах крім води в якості робочого тіла застосовуються також тверді та сипучі речовини, такі як бетон та пісок. Лабораторія відновлюваної енергії NREL, розташована в США, вказала на можливість використання кварцового піску в якості основного матеріалу в системах теплового накопичення. Незважаючи на те, що пісок має теплоємність у 5 разів нижчу за водяну (0,8 кДж/(кг·°C) проти 4,187 кДж/(кг·°C)), він здатний створювати температурний градієнт, що вдесятеро перевищує такий у води ($\Delta 900^{\circ}\text{C}$ проти $\Delta 90^{\circ}\text{C}$). Описана технологія передбачає використання зайвої електроенергії від сонячних та вітрових станцій для нагріву кварцового піску до 1200°C за допомогою електронагріву. Далі нагрітий пісок падає в теплоізововані бетонні бункери для зберігання. Максимальний об'єм такого акумулятора може досягти 26 000 МВт·год теплової енергії, проте завдяки модульній конструкції цю ємність можна регулювати. Використання недорогого піску та ефективного енергетичного циклу дозволяє забезпечити економічно вигідне зберігання енергії протягом тривалого часу.

Пісочні акумулятори характеризуються надійністю та безпекою, що дозволяє їх впровадження у різних умовах. Зібрана в акумуляторі тепла енергія може використовуватися як для централізованого теплопостачання, так і для виробництва електрики, роблячи пісочні акумулятори конкурентними щодо літій-іонних акумуляторів [7]. Перший комерційний пісочний акумулятор був установлений в м. Канкаанпя, Фінляндія, у 2022 році та вже успішно включений до системи централізованого теплопостачання [8].

Таблиця 1. Основні показники ємнісних водяних накопичувачів теплової енергії [5]

Тип TES	Бак-акумулятор	Підземний накопичувач (утеплений резервуар)	Свердловини	Використання підземного водоносного шару
Робоча речовина	Вода	Вода з гравієм	Вологий ґрунт навколо свердловин	Ґрунтові води
Питома ємність, кВт·год/м ³	60–80	60–80 (30–50 для суміші вода-гравій)	15–30	30–40
Водяний еквівалент	1 м ³ TES = 1 м ³	1 м ³ TES = 1 м ³	3–5 м ³ TES = 1 м ³	2–5 м ³ TES = 1 м ³
Геологічні вимоги	Стабільні ґрунтові умови без ґрунтових вод, глибина 5–15 м	Стабільні ґрунтові умови без ґрунтових вод, глибина 5–15 м	Ґрунт у місці буріння насичений ґрунтовими водами, висока теплоємність, висока теплопровідність, низька гідравлічна провідність, природний потік ґрунтових вод < 1 м/год, глибина 30–100 м	Високопродуктивний водоносний горизонт
Застосування	Короткочасне/добове зберігання, буферне зберігання	Тривале / сезонне зберігання для виробництва понад 20 000 МВт·год. Короткочасне зберігання для великих ТЕЦ (близько 30 000 м ³)	Довготривалий / сезонний для централізованого тепlopостачання з виробництвом понад 20 000 МВт·год/рік	Тривале / сезонне тепло- та холодозберігання
Температура робочої речовини	5–95	5–95	5–90	7–18
Питомі витрати на будівництво, €/м ³	110–200 €/м ³ (для баків понад 2000 м ³)	20–40 €/м ³ при об'ємах понад 50000 м ³	20–40 €/м ³ при об'ємах понад 50000 м ³ водяного еквіваленту, включаючи буферний бак	50–60 €/м ³ при об'ємах понад 10000 м ³ водяного еквіваленту. Інвестиційні витрати сильно залежать від потужності зарядки / розрядки
Переваги	Висока потужність зарядки / розрядки	Висока потужність зарядки / розрядки. Низькі інвестиційні витрати	Багато підземних об'єктів є придатними	Забезпечує зберігання тепла та холоду. Багато геологічно придатних місць
Недоліки	Високі інвестиційні витрати	Потрібні великі площі	Низька потужність зарядки / розрядки	Низькі температури, мала різниця температур

Використання теплових мереж є одним з найбільш економічно вигідних методів короткострокового зберігання теплової енергії в рамках систем централізованого тепlopостачання (СЦТ). Згідно з нормативними документами, для акумуляції тепла можуть бути використані виключно магістральні теплові мережі [9]. Використання теплових мереж для зберігання теплової енергії було досліджено в кількох роботах [10]–[14]. Ці роботи розглядали технічні та інституційні аспекти зберігання теплової енергії в мережах, оцінювали потенціал такого підходу, а також розглядали питання його надійності. У статті [15] проведено оцінювання досяжних обсягів акумуляції теплової енергії в мережах СЦТ України, як показано в таблиці 2.

Таблиця 2. Досяжні обсяги акумуляції теплової енергії в мережах систем централізованого тепlopостачання

Назва	Період сезону	
	Опалювальний	Неопалювальний
Граничні можливості теплових мереж щодо акумуляції теплової енергії, МВт·год	Проектний темп. графік – 65964 Фактичний темп. графік – 40835	30155

Під час опалювального сезону здатність теплових мереж до накопичення енергії визначається кількома ключовими параметрами: температурою навколишнього середовища, допустимим рівнем температури у зворотному трубопроводі, температурним графіком та обсягом наповнення основних теплових мереж [11]. Згідно з проведеними дослідженнями [11] було розроблено графіки, які демонструють зміну потужності, що накопичується в теплових мережах, відповідно до зміни температури навколишнього повітря (на основі даних котельні № 5 СЦТ м. Харків), що представлені на рис. 2.

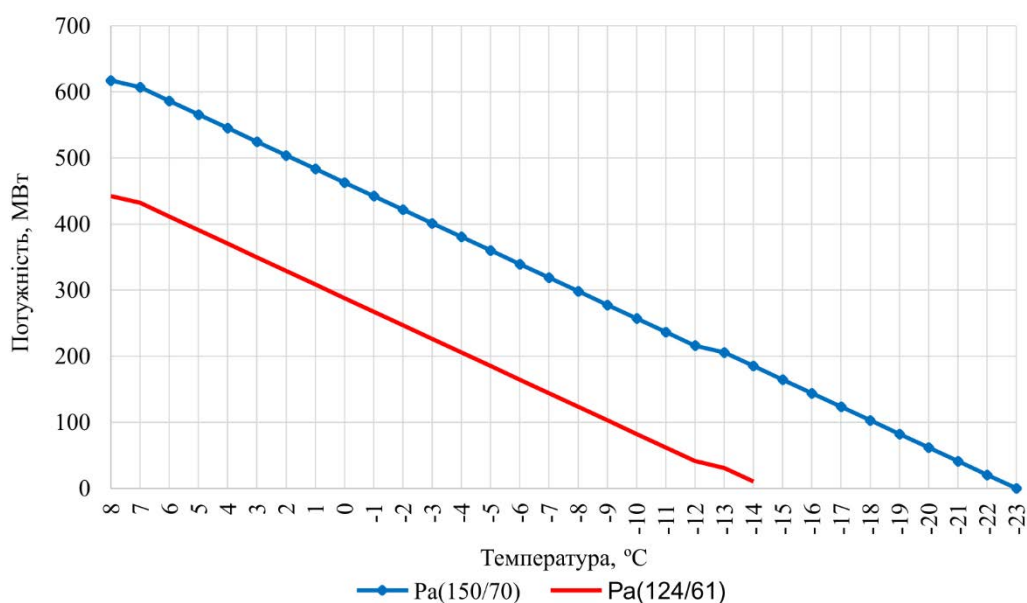


Рис. 2. Потужність акумуляції [11]

З рис. 2 видно, що при проєктованому температурному графіку (150/70°C) накопичення енергії стає недосяжним при температурі повітря мінус 23°C. Якщо температура збільшується, то зростає й потужність накопичення. У зв'язку зі зношуванням теплових мереж зараз використовується альтернативний температурний графік – 124/61°C, де накопичення стає нереалізовним вже при мінус 14°C.

Аналізуючи рис. 2, можна помітити, що під час опалювального сезону обсяг накопиченої теплової енергії змінюється. Ця величина змінюється обернено пропорційно до температури зовнішнього середовища. При нижчих температурах повітря накопичення енергії в теплових мережах стає фактично нездійсненним. Причиною цього є те, що мережі містять максимально можливу кількість теплової енергії і подальше її збільшення може призвести до порушення надійності та виникнення аварійної ситуації. Цей фактор слід враховувати при організації процесу накопичення теплової енергії в мережах централізованого тепlopостачання.

Необхідно звернути увагу на деякі аспекти використання сезонних акумуляторів. В роботі [16] досліджувалась зміна температури робочої речовини (води) експериментального сезонного накопичувача. Результати досліджень показані на рис. 3.

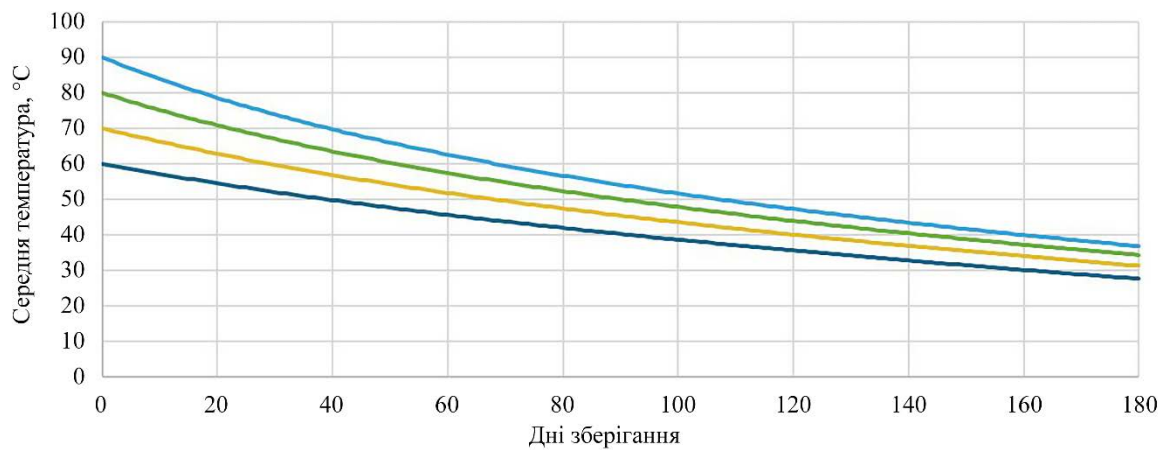


Рис. 3. Зміна температури робочої речовини сезонного акумулятора [16]

З рис. 3 видно, що:

- протягом періоду зберігання втрати теплової енергії значні. Неважко показати, що протягом перших трьох місяців зберігання в залежності від початкової температури втрачається від 33,3% до 38,8% теплоти. Тому сезонні TES потребують значного теплозахисту;
- температура в резервуарі TES постійно знижується і опускається нижче 40°C. Тому безпосереднє використання теплової енергії накопичувача неможливе протягом більшої частини опалювального періоду. Її можна використовувати як низькотемпературне джерело теплоти для теплового насоса [16].

Акумулятори теплоти фазового переходу. Цей тип акумуляторів базується на виділенні / поглинанні теплоти при процесі оборотного фазового переходу з одного стану речовин в інший. В даному випадку в якості робочого тіла використовується матеріал, агрегатний стан якого змінюється. Ефективність даного способу акумуляції теплової енергії обумовлена тим, що для ряду речовин ентальпія фазового переходу набагато більша, ніж їх теплоємність. Конструкції даного виду акумуляторів набагато складніші, ніж теплоємнісних, і тому вони дорожчі. Проте вони мають більшу питому щільність енергії, завдяки чому істотно зменшуються маса і об'єм акумулятора. В залежності від робочої речовини теплові акумулятори з фазовим переходом поділяються на низькотемпературні (до 120°C), середньотемпературні (120–400°C) та високотемпературні (400–1000°C) [17]. В нашому дослідженні будуть розглянуті теплові акумулятори першої температурної групи.

Цікаву розробку льодового теплового акумулятора з фазовим переходом представила компанія Viessmann [18]. Цей технологічний процес було створено як заміну традиційним джерелам теплової енергії для теплових насосів, особливо після того як у Німеччині було заборонено використання горизонтальних ґрунтових колекторів та вертикальних свердловин [19]. Складовими частинами теплового акумулятора є підземний водяний бак та сонячні колектори. Ця конструкція дозволяє використовувати комбінацію трьох природних енергетичних ресурсів: теплоту атмосферного повітря, сонячну енергію та енергію землі.

Система з акумулятором на основі льоду працює за простою схемою: енергія, отримана від сонця, повітря та землі, переноситься до води з низькою температурою, що знаходиться в підземному бетонному баку, так званому «акумуляторі льоду». Ця система використовує воду в якості основного носія тепла, що робить її абсолютно безпечною для навколишнього середовища та повністю екологічною. Отже, вона може бути застосована в будь-якому місці без обмежень.

Льодовий акумулятор використовує енергію, що вивільняється при переході води у твердий стан під час замерзання, що в 80 разів перевищує (330 кДж/кг) енергію, необхідну для зміни температури води на 1°C (4,187 кДж/кг). Робочі температури акумулятора коливаються від –1°C до +1°C [18]. Тепло, що звільняється при кристалізації, перетворюється за допомогою теплового насоса до температури 60–70°C, потрібної для тепlopостачання.

Робота льодового акумулятора здійснюється за таким принципом: після того як резервуар наповнений водою, тепловий насос забезпечує відбір теплової енергії, що призводить до поступового охолодження води. На поверхні труб теплообмінника теплового насоса, розташованих у резервуарі, формується лід внаслідок кристалізації. При цьому відбувається виділення теплової енергії фазового переходу (93 Вт·год/кг). У той же час тепло, отримане від сонячних колекторів та землі, забезпечує повторне розтоплення льоду або нагрівання води в резервуарі. Автоматика регулює цикл, що складається з множини етапів кристалізації та розтоплення льоду [18].

Влітку льодовий акумулятор може служити для забезпечення охолодження. Наприклад, в кінці опалювального сезону тепловий насос може заморожувати воду в резервуарі, перетворюючи її на лід, що служить для охолодження приміщень (при цьому тепловий насос переходить у режим охолодження). Viessmann довела цю технологію до стадії квазімасового виробництва і пропонує її для використання у виробничих цехах, офісних будівлях, торгових просторах, гіпермаркетах, системах складського зберігання харчових продуктів, холодильних камерах торгових закладів, готелях, санаторіях, плавальних басейнах, спортивних спорудах, освітніх установах, соціальних будівлях та інших приміщеннях різного призначення [18].

Ілюстрацією використання цієї технології може слугувати централізована система опалення мікрорайону з 500 квартир поблизу Гамбурга, що функціонує на основі льодового теплового акумулятора з ємністю 1,5 млн літрів води. Це вважається наймасштабнішою системою льодового опалення у світі [19].

Інші технології використання енергії фазового переходу зустрічаються в поодиноких випадках та/або знаходяться на стадії розроблення. Одним із недоліків технології використання енергії фазового переходу є те, що вона набагато дорожча в порівнянні з технологіями використання теплоємності речовин [20].

Технології теплових акумуляторів **третьої** (виділення і поглинання теплоти при зворотних хімічних і фотохімічних реакціях) та **четвертої** груп (абсорбційні накопичувачі) знаходяться на ранніх стадіях розроблення. Прогнозується, що до 2050 року можуть бути виготовлені тільки демонстраційні зразки термохімічних систем накопичення енергії з вартістю від 10 дол. США/кВт·год [21]. Тому ці групи накопичувачів аналізувати на даній стадії недоцільно.

Поточні та прогнозні узагальнені основні характеристики різних технологій накопичення енергії наведені в табл. 3 [21].

Таблиця 3. Узагальнені характеристики технологій накопичення теплової енергії [21]

Показник	Технологія акумуляування теплової енергії								
	Теплоємнісна акумуляція			Теплота фазового переходу			Термохімічна теплота		
	2018	2030	2050	2018	2030	2050	2018	2030	2050
Питома вартість, \$/кВт·год	0,1–35	0,1–25	0,1–55	60–250	45–185	35–140	15–150	Дослідний зразок 15–20	Демонстраційний зразок 10–80
Коефіцієнт перетворення, %	55–90	65–90	75–90	> 90	> 92	> 95	50–65	Дані відсутні через низький рівень готовності технології	
Густина енергії, кВт·год/м³	15–80	В залежності від температури		30–90			120–250		
Довговічність, років	13–30	20–30	> 30	10–20	> 25	> 30	15–20	20–25	> 30
Робоча температура, °С	5–95	5 > 95		0–750			15–150		

3. Висновки

1. Проведений аналітичний огляд технологій акумулювання теплової енергії показав, що найбільш досконалою технологією є теплоємнісна акумуляція. Ця технологія найдешевша та найбільш поширена в централізованому тепlopостачанні.

2. Для короткострокового (оперативного) зберігання теплової енергії доцільно використовувати баки-акумулятори та магістральні теплові мережі.

3. Для сезонного акумулювання теплової енергії використовуються спеціальні утеплені бетонні підземні сховища як природного, так і штучного походження.

4. Перспективною технологією сезонного зберігання теплової енергії є льодовий акумулятор (з використанням фазового переходу), розроблений компанією Viessmann, для якого потрібно значно менше простору, ніж для теплоємнісного акумулятора, що важливо в умовах щільної міської забудови.

5. Термохімічні акумулятори знаходяться на ранніх стадіях розроблення, до 2050 р. можуть бути виготовленні їх демонстраційні зразки.

Посилання

1. Henze V. Global Energy Storage Market to Grow 15-Fold by 2030. *Bloomberg NEF*. October 12, 2022. URL: <https://about.bnef.com/blog/global-energy-storage-market-to-grow-15-fold-by-2030/> (дата звернення: 16.03.2023).
2. The International Renewable Energy Agency. Innovation Outlook Thermal Energy Storage. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Innovation_Outlook_TES_2020.pdf (дата звернення: 16.03.2023).
3. Net-zero heat. Long Duration Energy Storage to accelerate energy system decarbonization. LDES Council in collaboration with McKinsey & Compan., 2022. 69 p. URL: http://www.ldescouncil.com/assets/pdf/221108_NZH_LDES%20brochure.pdf (дата звернення: 17.05.2023).
4. Інновації в сфері акумулювання теплової енергії. *Сайт компанії Сахара*. URL: <https://сахара.ua/kompaniya-statti-novi-teplovii-akumuljatori> (дата звернення: 16.03.2023).
5. Doczekal C. Heat Storages. Smart strategies for the transition in coal intensive regions. Project № 836819. 2019. 9 p. URL: https://tracer-h2020.eu/wp-content/uploads/2019/10/TRACER_D2.1-Heat-Storages.pdf (дата звернення: 16.03.2023).
6. Long term storage and solar district heating. A presentation of the Danish pit and borehole thermal energy storages in Brædstrup, Marstal, Dronninglund and Gram. URL: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Forskning_og_udvikling/sol_til_fjernvarme_brochure_endelig.pdf (дата звернення: 16.03.2023).
7. Using Hot Sand To Store Energy. *Сайт Національної лабораторії відновлюваної енергії*. URL: <https://cleantechnica.com/2021/08/31/using-hot-sand-to-store-energy/> (дата звернення: 27.03.2023).
8. What Is a «Sand Battery»? *Polar night energy company*. URL: <https://polarnightenergy.fi/sand-battery> (дата звернення: 16.03.2023).
9. ДБН В.2.5-39:2008. Теплові мережі. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. К.: Мінрегіонбуд України, 2009.
10. Дерій В.О. Технічні та інституційні фактори впровадження споживачів-регуляторів у системах централізованого тепlopостачання. *Проблеми загальної енергетики*. 2014. Вип. 2(37). С. 52—58.
11. Derii V.O. Potential of thermal energy accumulation in distric heating systems networks. *The Problems of General Energy*. 2014. Iss. 4(39). P. 29—33.
12. Дерій В.О. Технічний потенціал акумуляції теплової енергії в мережах. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. Вип. 1(40). С. 34—38. <https://doi.org/10.15407/pge2015.01.034>
13. Дерій В.О. Аналіз динамічних процесів акумуляції теплової енергії в системах централізованого тепlopостачання. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. Вип. 2(41). С. 57—61. <https://doi.org/10.15407/pge2015.02.057>
14. Білодід В.Д., Дерій В.О. Акумуляційна здатність теплових мереж. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. Вип. 3(42). С. 31—35. <https://doi.org/10.15407/pge2015.03.031>
15. Білодід В.Д., Дерій В.О. Граничні обсяги акумуляції теплової енергії в системах централізованого тепlopостачання. *Проблеми загальної енергетики*. 2019. Вип. 2(57). С. 41—45. <https://doi.org/10.15407/pge2019.02.041>
16. Short- and long-term thermal energy storage in a residential setting, new blog by VITO. URL: <https://horizon2020-story.eu/short-and-long-term-thermal-energy-storage-in-a-residential-setting/> (дата звернення: 13.03.2023).

17. Мазуренко А.С., Климчук А.А., Юрковский С.Ю. Разработка схемы комбинированной системы теплоснабжения с использованием сезонного аккумулирования тепла от гелиосистем. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. № 1(8). С. 15—20. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2015_1%288%29__4 (дата звернення: 15.04.2023).
18. Льодяні накопичувачі тепла: широке застосування. *Сайт компанії Viessmann*. URL: <https://serviceportal.viessmann.ua/articles/lodani-nakopichuvaci-tepla-siroke-zastosuvanna> (дата звернення: 15.04.2023).
19. Дем'яненко Ю.І., Дудник Т.В. Сезонні акумулятори тепла в схемах теплопостачання приватних житлових будинків. *Холодильна техніка та технологія*. 2021. 57(2). С. 81—88. <https://doi.org/10.15673/ret.v57i2.2026>
20. Thermal Energy Storage. *Technology-Policy Brief E17 – January 2013*. IEA-ETSAP and IRENA. URL: https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E17IR%20ThEnergy%20Stor_AH_Jan2013_final_GSOK.pdf (дата звернення: 06.04.2023).
21. Innovation Outlook Thermal Energy Storage. IRENA, 2020. 144 p. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Innovation_Outlook_TES_2020.pdf (дата звернення: 20.03.2023).

HEAT ENERGY STORAGEES

Volodymyr Derii*, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, <https://orcid.org/0000-0002-5689-4897>

Oleksandr Zgurovets, PhD (Engin.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-8439-9781>

General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha St., Kyiv, 03150, Ukraine

*Corresponding author: derii.volodymyr@gmail.com

Abstract. *The article provides an analytical review of thermal energy storage. The reasons determining their demand are shown. It has been established that the market of thermal accumulators is developing quite dynamically. According to the forecast of the International Renewable Energy Agency, the global market for thermal accumulators may triple by 2030 from 234 GWh of installed capacity in 2019 to about 800 GWh in 2030. Investments in the development of thermal accumulators are expected to reach 13–28 billion US dollars. Their capacity for power generation can be 491–631 GWh, for heat supply – 143–199 GWh, for cooling – 23–26 GWh. Bloomberg NEF considers the main drivers of such a sharp increase in energy storage capacity are the US Inflation Reduction Act, which provides for more than \$369 billion in financing for clean technologies, as well as the European Union's RE Power EU plan to reduce dependence on gas from Russia. The significant additional storage capacity expected from 2025 in the utility sector is in line with the very ambitious renewable energy targets set out in the REPowerEU plan. The purpose of this review is the search and analysis of thermal energy storage technologies for their possible use in the centralized heat supply of Ukraine. The conducted review showed that the most advanced technology for the accumulation of thermal energy is heat capacity of the material storage. It is the cheapest and most common in centralized heat supply. For short-term storage of heat energy, it is advisable to use storage tanks and main heat networks. Special insulated concrete underground storages of both natural and artificial origin are used for seasonal accumulation of thermal energy. A promising technology for seasonal thermal energy storage is an ice battery developed by the Viessmann company, which requires much less space than the heat capacity of the material storage technology. Thermochemical batteries are in the early stages of development, their demonstration samples may be manufactured by 2050.*

Keywords: battery, thermal energy, heat capacity, phase transition.

References

1. Henze, V. (2022, October 12). Global Energy Storage Market to Grow 15-Fold by 2030. *Bloomberg NEF*. URL: <https://about.bnef.com/blog/global-energy-storage-market-to-grow-15-fold-by-2030/> (Last accessed: 16.03.2023).
2. The International Renewable Energy Agency. Innovation Outlook Thermal Energy Storage. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Innovation_Outlook_TES_2020.pdf (Last accessed: 16.03.2023).
3. Net-zero heat. (2022). Long Duration Energy Storage to accelerate energy system decarbonization. LDES Council in collaboration with McKinsey & Compan., 69 p. URL: http://www.ldescouncil.com/assets/pdf/221108_NZH_LDES%20brochure.pdf (Last accessed: 17.05.2023).

4. Innovations in the field of thermal energy storage. *Site of Sahara company*. URL: <https://caxapa.ua/kompaniya-statti-novi-teplovi-akumuljatori> (Last accessed: 16.03.2023).
5. Doczekal, C. (2019). Heat Storages. Smart strategies for the transition in coal intensive regions. Project No: 836819. 9 p. URL: https://tracer-h2020.eu/wp-content/uploads/2019/10/TRACER_D2.1-Heat-Storages.pdf (Last accessed: 16.03.2023).
6. Long term storage and solar district heating. A presentation of the Danish pit and borehole thermal energy storages in Brødstrup, Marstal, Dronninglund and Gram. URL: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Forskning_og_udvikling/sol_til_fjernvarme_brochure_endelig.pdf (Last accessed: 16.03.2023).
7. Using Hot Sand To Store Energy. *Website of the National Laboratory of Renewable Energy*. URL: <https://cleantechnica.com/2021/08/31/using-hot-sand-to-store-energy/> (Last accessed: 27.03.2023).
8. What is a «Sand Battery»? *Polar night energy company*. URL: <https://polarnightenergy.fi/sand-battery> (Last accessed: 16.03.2023).
9. DBN V.2.5-39:2008. (2009). Heat Networks. Engineering equipment of buildings and structures. External networks and structures. K.: Ministry of Regional Construction of Ukraine.
10. Derii, V.O. (2014). Technical and institutional factors affecting the introduction of electrothermal consumers-controllers in district heating systems. *The Problems of General Energy*, 2(37), 52–58 [in Ukrainian].
11. Derii, V.O. (2014). Potential of thermal energy accumulation in distric heating systems networks. *The Problems of General Energy*, 4(39), 29–33.
12. Derii, V.O. (2015). Technical potential of thermal energy accumulation in district heating networks. *The Problems of General Energy*, 1(40), 34–38 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2015.01.034>
13. Derii, V.O. (2015). Analysis of dynamic processes of thermal energy accumulation in centralized heat supply systems. *The Problems of General Energy*, 2(41), 57–61 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2015.02.057>
14. Bilodid, V.D., & Derii, V.O. (2015). Heating system accumulative capability. *The Problems of General Energy*, 3(42), 31–35 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2015.03.031>
15. Bilodid, V.D., & Derii, V.O. (2019). Limiting possibilities of the accumulation of thermal energy in centralized heat supply systems. *The Problems of General Energy*, 2(57), 41–45 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2019.02.041>
16. Short- and long-term thermal energy storage in a residential setting, new blog by VITO. URL: <https://horizon2020-story.eu/short-and-long-term-thermal-energy-storage-in-a-residential-setting/> (Last accessed: 13.03.2023).
17. Mazurenko, A.S., Klimchuk, A.A., & Yurkovsky, S.Yu. (2015). Development of a scheme of a combined heat supply system using seasonal accumulation of heat from solar systems. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 1(8), 15–20. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2015_1%288%29__4 (Last accessed: 15.04.2023) [in Russian].
18. Ice heat accumulators: wide application. *Viessmann website*. URL: <https://serviceportal.viessmann.ua/articles/lodani-nakopicuvaci-tepla-siroke-zastosuvanna> (Last accessed: 15.04.2023).
19. Demyanenko, Yu.I., & Dudnyk, T.V. (2021). Seasonal heat accumulators in heat supply schemes of private residential buildings. *Refrigeration Engineering and Technology*, 57(2), 81–88 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15673/ret.v57i2.2026>
20. Thermal Energy Storage. (2013). *Technology-Policy Brief E17 – January 2013*. IEA-ETSAP and IRENA. URL: https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E17IR%20ThEnergy%20Stor_AH_Jan2013_final_GSOK.pdf (Last accessed: 06.04.2023).
21. Innovation Outlook Thermal Energy Storage.(2020). IRENA, 144 p. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Innovation_Outlook_TES_2020.pdf (Last accessed: 20.03.2023).

Надійшла до редколегії: 05.06.2023