

УДК 697.343; 621.311; 614.87

Володимир Демченко¹, канд. техн. наук, ст.наук.співр., <https://orcid.org/0000-0002-4211-356X>
Світлана Ковтун^{2*}, д-р техн. наук, ст. досл., <https://orcid.org/0000-0002-6596-3460>

Олег Назаренко², канд. техн. наук, ст. наук. співр., <https://orcid.org/0000-0003-1873-1971>

Андрій Назаренко², канд.техн. наук, ст. наук. співр., <https://orcid.org/0000-0001-7795-269X>

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна;

²Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

*Автор-кореспондент: kovtunsi@nas.gov.ua

ДОСВІД ЗАСТОСОВУВАННЯ ТЕПЛОВИХ АКУМУЛЯТОРІВ В УМОВАХ БЛЕКАУТУ

Анотація. *Це дослідження є першим і поки що єдиним в Україні з присвячених досвіду використання мобільних теплових акумуляторів в умовах надзвичайних ситуацій, зокрема блекауту. У статті розглянуто питання забезпечення енергетичної безпеки. Приведена класифікація параметрів системи зберігання теплоти. Розглянута модель системи автономного опалення з системою акумуляції теплоти. Показано вплив на систему опалення теплового акумулятора з різними конструкціями теплових генераторів та видів палива. Приведені результати експлуатації комбінованої системи, що складається з автономної системи опалення окремої будівлі, обладнаної електричним котлом, та тепловим акумулятором. Тепловий акумулятор використовується не тільки як буфер між генератором теплоти та системою опалення, а і як джерело теплоти. Інтеграція теплового акумулятора в систему опалення будівлі дає змогу забезпечити стале тепlopостачання будівлі, 100 % покриття пікових динамічних навантажень, зменшення вдвоє одиничної потужності котла та експлуатаційних витрат на 20 %. Доведено, що присутність теплового акумулятора дозволяє розв'язувати проблему забезпечення стійкого тепlopозабезпечення в умовах відключення мережевої електроенергії. Дано докладний опис проведеного дослідження методів та обладнання, використаних при проведенні натурної експлуатації та при опрацюванні даних. Наведено результати натурних випробувань теплового акумулятора в умовах зимової експлуатації. Надано особливості використання контролера для моніторингу роботи системи опалення з акумулятором теплоти. Сформульовані напрями подальших наукових досліджень, розробок, практичних рекомендацій для використання мобільних теплових акумуляторів у народному господарстві та Державній службі з надзвичайних ситуацій України. Розглядаються економічні критерії та критерії ефективності, направлені на зниження експлуатаційних витрат. Отримані результати дослідження можуть бути використані для прогнозування роботи систем опалення та охолодження, обладнаних акумуляторами енергії.*

Ключові слова: система опалення, енергетична безпека, блекаут, тепловий акумулятор, моніторинг.

1. Вступ

У лютому 2014 року Російською Федерацією здійснено, а у лютому 2022 року розширено агресію проти України. Актуальність цього дослідження продиктована військовою стратегією Російської Федерації зі знищення інфраструктурних об'єктів України. Починаючи з жовтня 2022 року російські загарбники ракетними обстрілами проводять планомірне знищення об'єктів генерації теплової та електричної енергії нашої країни. Це призводить до аварійних та планових віялових відключень електроенергії та, як наслідок, відсутності централізованого постачання теплової енергії в опалювальний період. Ця робота зосереджена на розв'язанні проблеми попередньої підготовки та безпосереднього використання об'єктів інженерної інфраструктури до експлуатації в умовах

проведення бойових дій та надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, а також розгляді питання стійкого автономного теплопостачання окремих будівель в умовах блекауту.

Слід зазначити, що на системному рівні забезпечення енергетичної безпеки розглядається як необхідна умова існування та розвитку держави, що докладно викладено у Сендайській програмі зі зменшення ризику стихійних лих на 2015–2030 рр., прийнятої у 2015 році, та в Механізмі цивільного захисту Європейського Союзу (EUCPM), до якого Україна приєдналася 20 квітня 2023 року [1, 2]. Впровадження принципів створення стійкої інфраструктури та ключових заходів щодо їх реалізації сформульовані в посібнику з впровадження принципів стійкої інфраструктури Управління ООН зі зменшення ризику стихійних лих [3].

В Україні приділяється увага створенню та впровадженню планів подолання надзвичайних ситуацій на державному рівні, захисту критичної інфраструктури та розробляються конкретні пропозиції щодо усунення загроз для безперебійного забезпечення теплом цивільних та військових об'єктів [4, 5]. Одним з таких напрямків є розробка планів аварійного теплопостачання, виробництво та використання енергоефективного обладнання, резервування теплової потужності, створення складів запасу пального та ефективної системи накопичення та акумуляції теплової енергії [6, 7].

В цій статті розглянуто децентралізовану систему накопичення та зберігання теплової енергії, яка може бути використана в розподіленій мережі або бути розташована безпосередньо у кінцевих споживачів. Системи накопичення теплової енергії (TES) можуть накопичувати тепло або холод для подальшого використання за всіляких умов, таких як температура, місце чи потужність. Системи TES діляться на чотири основні типи: чутливе тепло (без зміни агрегатного стану), приховане тепло (з фазовим переходом першого роду), термохімічне накопичення енергії (теплота хімічних реакцій) та термомеханічне, в основі якого перетворення між механічною та тепловою енергією. В останні роки було проведено велику кількість досліджень, які передбачають інтеграцію систем зберігання теплової енергії до наявних систем теплопостачання [8, 9].

Системи TES дозволяють розв'язати низьку актуальних питань, а саме: - зменшити одиничну потужність теплогенеруючого обладнання, яке при проектуванні вибирають на максимально можливе навантаження, зменшення теплової потужності призводить до зменшення споживання палива та металоємності обладнання; - забезпечити балансування системи опалення для більшої гнучкості використання енергії; - змінити тактику генерації теплоти шляхом компенсації так званих піків споживання до 30 % та оптимізувати графіки виробництва шляхом накопичення надлишкової теплової енергії. Частка використання надлишкової теплової енергії в річному споживанні може сягати 100 %, а саме: - накопичена тепла енергія може бути використана під час відключення або відсутності енергопостачання; - розширити спектр використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та вторинних енергоресурсів (ВТЕР); - зменшити витрати палива до 10 % при зменшенні шкідливих викидів в атмосферу до 20 %; - забезпечити широке використання місцевих, у тому числі відновлюваних джерел енергії при відсутності традиційних видів палива; - забезпечити високу стабільність роботи енергетичної системи; - створити високий ступінь автоматизації та диспетчеризації процесів контролю та управління параметрів системи, зокрема інтелектуального управління системою [10].

За оцінками експертів, в Європі можна економити близько 1,4 млн ГВт·год енергії за рік і скоротити на 400 млн тон викиди CO₂ шляхом більш широкого використання акумуляторів тепла і холоду. TES класифікують за призначенням та температурою збереження теплової енергії. Зазвичай виділяють «гаряче» (80–90 °C), «тепле» (40–50 °C) та «холодне» (7–15 °C) зберігання на основі різних температурних діапазонів. Типові параметри для систем TES показані в таблиці 1, включаючи продуктивність, температуру використання, потужність, ефективність, період зберігання [11, 12].

Економічні критерії використання теплоакумулявальних матеріалів нами не розглядалися, але слід зазначити, що найбільш доступними та дешевими є вода та тверді речовини. Висока щільність зберігання енергії й висока потужність для зарядки та розрядки є бажаними властивостями будь-якої системи зберігання. Найбільш ефективна акумуляція досягається при використанні теплоти фазових

перетворень чи теплоти хімічних реакцій (утворення та розпаду кристалогідратів солей). Особливо слід виділити перспективні для застосування хімічні реакції гідрування металів, важливою особливістю яких є їх зворотність. Реакції гідрування металів є екзотермічними, а дегідрування завжди протікає з поглинанням тепла. Найменш ефективною є акумуляція при використанні тільки теплоємності речовини, зміни її ентальпії зі зміною температури без фазових перетворень. Акумулятор прихованого тепла має більш вищу щільність енергії, але більшість твердодієвих матеріалів зі зміною фази (phase change materials, далі – PCM) мають низьку теплопровідність. Сучасні дослідження зосереджені на механізмі теплопередачі з домінуванням провідності для підвищення ефективності теплопередачі. Однак конвекція також має важливий вплив на інтенсифікацію процесів плавлення та затвердіння PCM. Низька ємність зберігання зазвичай перешкоджає їх застосуванню у великих масштабах, а найбільш доступною та розповсюдженою речовиною залишається вода. Енергоефективність сучасних TES залежить від правильного вибору теплоаккумуляційного матеріалу і конструкції теплообмінників, які забезпечують ефективність теплопередачі, керованість і моніторинг процесу зарядки, збереження та розрядки теплового акумулятора. Це забезпечує економію енергії в діапазоні від 33 % до 44 % порівняно зі стандартною системою опалення [13, 14].

Таблиця 1. Класифікація параметрів системи TES

TES	Продуктивність системи TES (кВт·год/м ³)	Температура використання (°C)	Потужність (МВт)	Ефективність (%)	Період зберігання
Гаряча вода	70	50–90	0,001–10,0	50–90	Година/Місяць
Твердотільний матеріал	40	100–1400	0,01–100,0	80–95	Доба/Місяць
Фазозмінний матеріал	50–150	20–60	0,001–10,0	75–90	Година/Місяць
Хімічні реакції	120–250	100–180	0,01–10,0	80–100	Доба/Рік
Гідрування металів	200–1500	50–400	0,01–100,0	90–100	Доба/Рік

Останнім часом широке розповсюдження отримала інтеграція системи TES в чинну систему опалення будівлі [15]. Така система зберігання теплоти дозволяє акумулювати надлишок енергії від відновлюваних або інших джерел для подальшого використання. Збережена теплота може використовуватися у періоди пікового споживання або під час відключень електроенергії при завчасному забезпеченні системи пересувним джерелом електричної енергії для забезпечення циркуляції теплоносія в системі опалення. Подібна система опалення окремої будівлі, як правило, складається з бака-акумулятора теплоти, електрогенератора або акумуляторної батареї з інвертором і системою моніторингу. Використання відновлюваних джерел для генерації електроенергії або нічного тарифу дозволяє додатково заощадити матеріальні ресурси та зменшити залежність від зовнішньої електричної мережі, що значно підвищує спроможність функціонування об'єкта в період блекауту. Це пояснюється тим, що електрична потужність циркуляційних насосів, встановлених на стандартній квартальній котельні, дорівнює від 7,5 до 10,5 кВт і більше. За нашими розрахунками, для будівлі опалюваною площею до 700 м² достатньо циркуляційного насоса електричною потужністю до 4,0 кВт·год. Таке налаштування дозволяє використовувати теплотехнічне обладнання без урахування пікового попиту, підвищує ефективність системи опалення та зменшує загальне споживання енергії. В цьому випадку тепловий акумулятор набуває всіх ознак тимчасового автономного джерела енергії. Модель системи автономного опалення з системою TES наведена на рисунку 1.

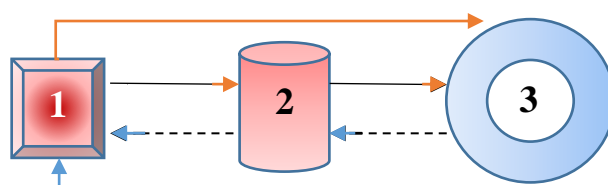


Рисунок 1. Модель системи TES, де: 1 – котел, 2 – теплоаккумулятор, 3 – система опалення

Як можна бачити, існує можливість трьох варіантів роботи системи опалення. Перший – прямий контур циркуляції між котлом та системою опалення (1–3). Другий – подача теплоносія до системи

опалення будівлі через теплоаккумулятор, окремий випадок – робота котла тільки на акумулятор (1–2–3). Третій – подача теплоносія в систему опалення безпосередньо від теплоаккумулятора (2–3). Слід зазначити, що інтеграція системи TES у систему опалення будівлі дозволяє забезпечити більш якісне-кількісне регулювання процесом опалення. Таке регулювання дозволяє перейти до так званого режиму з плавно регульованою температурою теплоносія, що значно збільшує COP (coefficient of performance) – коефіцієнт продуктивності системи, який є співвідношенням кількості виробленої теплової енергії до витраченої електричної, що також значно знижує експлуатаційні витрати [16].

У процесі експлуатації котла на твердому паливі рекомендується використовувати буферну ємність (бак прямого нагріву), яка необхідна для вирівнювання теплового балансу під час роботи твердопаливного котла в перехідний період та захищає котел від перегріву та аварійного відключення при закипанні води, що відбувається, наприклад, при аварійному відключенні електричної енергії. Окрім того, буферна ємність накопичує теплову енергію, а потім віддає її до опалювальної системи, збільшуючи розрив між завантаженнями палива. У середньому, щоб акумулювати 1,0 кВт тепла потрібно 30–50 літрів води. Капіталовкладення окупаються внаслідок економії палива та раціонального використання виробленого тепла [17].

Існує помилкове міркування, що газові, рідиннопаливні та електричні котли не потребують встановлення в систему опалення додаткових баків-акумуляторів і відпуск теплоти може вільно регулюватися шляхом зміни витрати палива. Однак раніше проведений нами аналіз показує, що обсяг споживання газу або дизельного пального дуже залежить від конструкції котла та технології спалювання палива [18]. Зокрема, більш поширені водотрубні котли зазвичай працюють на низьких режимах навантаження, при цьому їх коефіцієнт корисної дії (ККД) знижується, а зростає тільки в міру збільшення теплопродуктивності. Навпаки, ККД низькотемпературних жаротрубних та конденсаційних котлів зменшується при збільшенні теплового навантаження. До того ж на витрати палива суттєво впливає частота включення в роботу протягом часу та межі регулювання пальника.

Електричні котли менш схильні до зниження ККД залежно від навантаження та забезпечують краще регулювання процесу опалення, але наразі залишаються найдорожчим способом отримання теплової енергії. Окрім того, вони повністю залежні від постачання електричної енергії від мережі. Тому інтеграція системи TES у систему опалення з електричним котлом в умовах блекауту є важливим у сучасних умовах завданням.

2. Методи та матеріали

У період з грудня 2019 року по квітень 2022 року були проведені комплексні дослідження дослідного зразка мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт (далі – МТА), створеного в Інституті технічної теплофізики НАН України, як елемента системи TES [19]. Для встановлення ефективності експлуатації системи опалення за регулярного відключення електричної енергії в грудні 2022 року нами було передано мобільний теплоаккумулятор контейнерного типу МТА медичному реабілітаційному центру МВС України «Кремінці» (Івано-Франківська область) для проведення випробувань в натурних умовах (див. рисунок 2).



Рисунок 2. Розміщення МТА біля лікувального корпусу МРЦ МВС України «Кремінці»

Випробування проводилися цілодобово в умовах безперервної експлуатації з грудня 2022 року по квітень 2023 року. МТА знаходився в стаціонарному стані без транспортування. В цій статті

представлено результати стадії випробувань, які проводилися в період з 01.02 по 15.02.2023 року, що охоплює лише випробування системи опалення на етапі періодичної відсутності мережевої електричної енергії, окрім того, на цей період припадають найнижчі денні та нічні температури зовнішнього повітря. Зміни температури зовнішнього повітря в період випробування наведені на рисунку 3.

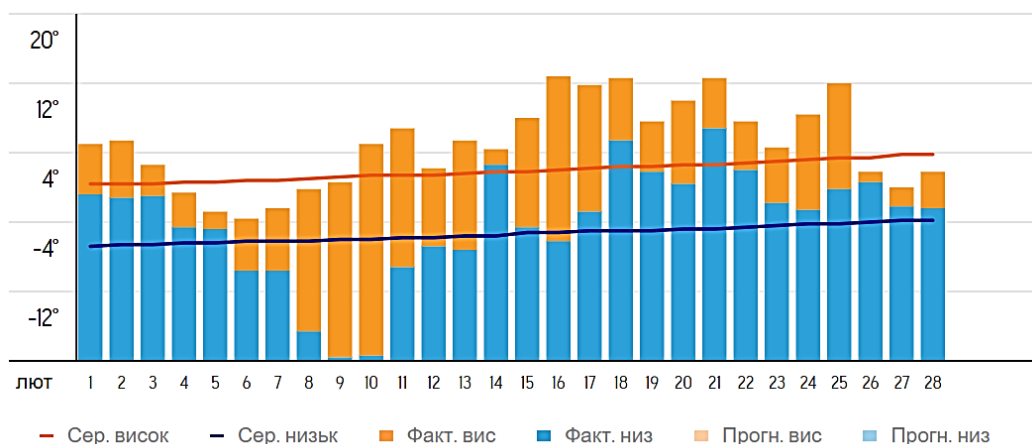


Рисунок 3. Графік зміни температур, лютий 2023 р. Доступно за посиланням: <https://www.accuweather.com/ru/ua/tatariv/1213772/february-weather/1213772>

МТА-0,5МВт було під'єднано до системи опалення лікувального корпусу опалюваною площею 380 м² за схемою, яка показана на рисунку 1. Будівля лікувального корпусу двоповерхова, надійно утеплена, потребує для опалення не більше 0,7 кВт/м². Гаряче водопостачання забезпечується окремо розташованими електричними бойлерами. Окрім того, деякі приміщення мають автономні кондиціонери, якими повітря всередині охолоджується або нагрівається.

Джерелом теплоти для проведених випробувань був 24 кВт електричний котел Protherm Ray (Скат) 24KE/14 (6 + 6 + 6 + 6 кВт) з шиною eBus (0010023676) виробництва фірми Protherm, Україна. Настінний електродкотел Protherm Ray (Скат) 24KE/14 (6+6+6+6 кВт) має вбудований циркуляційний насос. Відмінні риси моделі: плавна модуляція потужності; високий, практично 100-відсотковий, коефіцієнт корисної дії; спеціальна шина eBus для інтеграції у складну систему опалення; підключення до одно- та трифазної мережі; розширювальний 8-літровий бак; захист від блокування клапана та насоса, захист від зниженого тиску, захист від замерзання; для недопущення перегріву теплового носія та підвищеного тиску апарат обладнано системою автоматизації; нагрів теплоносія здійснюється ступінчасто [20].

Контроль за показниками температури прямої та зворотної води в реальному часі здійснюється через GSM-логер з автодозвонювачем, який, крім того, здійснює функцію контролю несанкціонованого доступу й протипожежної безпеки. Окрім того, контроль зчитування й передавання даних теплоспоживання та тепlopостачання МТА здійснюється за допомогою теплового лічильника механічного SKYLAR SNT 8 [21].

Керування насосами здійснюється в ручному режимі (перемиканням швидкості обертання двигуна) та балансувальними клапанами. Передбачено підживлювання системи циркуляції від системи опалення джерела теплоти та споживача або через дренаж індивідуального теплового пункту (ІТП). Режим роботи – періодичний, циклічний в залежності від типу джерела теплоти, умов споживача та відстані між ними.

МТА призначений для зберігання та мобільного транспортування теплової енергії. МТА в цілому передбачає підключення виробу до джерела теплоти з циркуляційним контуром теплоносія, а також з'єднання його з системою центрального опалення. МТА розміщується в стандартному суховантажному контейнері та виготовляється в кліматичному виконанні У, категорія розміщення 1 згідно з вимогами ГОСТ 15150-69. МТА має два розділених перегородкою відсіки – відсік ємностей

теплових акумуляторів та блочного, який розміщується в тому ж суховантажному контейнері на платформі, представлених на рисунку 4.

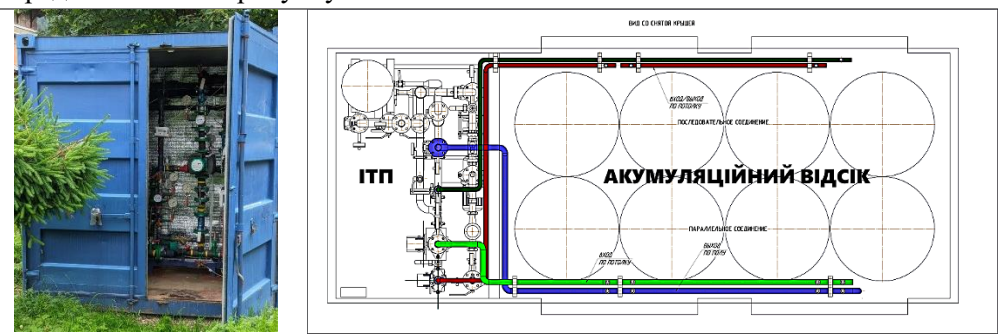


Рисунок 4. Зовнішній вигляд ІТП та принципова схема МТА [19]

В акумуляційному відсіку встановлені 8 баків-акумуляторів ємнісного типу з нагрівальною трубною спіраллю Ду32 в кожному. Чотири баки послідовного зразка МТА з'єднані трубними колекторами, які забезпечують рух теплоносія послідовно, а інші чотири – паралельно. Ємність бака заповнюється рідкою теплоакумулювальною сполукою на основі води, антифризу та водорозчинних полімерів, максимальний тиск в баку не більше 0,7 бар. В якості матеріалу баків і трубної спіралі використана чорна сталь. З'єднання контуру циркуляції між баками здійснюється трубою, виконаною з гнучких шлангів Ду32 та обойм-затискувачів шлангів, на яких встановлені засувки. Вузол приєднання джерела теплоти та системи опалення споживача попередньо обладнується швидкокороз'ємними «камлоками» на прямому та зворотному трубопроводах. Кількісне-якісне регулювання процесом зарядки та розрядки МТА здійснюється за допомогою рамки управління.

Вузол приєднання передбачає електричне живлення насосів, обігрівача, освітлення, сигналізації та іншого обладнання у виконанні Ір65 на 220 В; електричний щит має 2 входи та 8 виходів; на електрощиті передбачена додаткова розетка для підключення аварійного дизель-генератора. Робоче електроживлення обладнання МТА передбачається від стаціонарних джерел теплоти та споживача в процесі його зарядки та розрядки п'ятижильним кабелем, який передбачає занулення електрообладнання й заземлення контейнера від контуру споживача або джерела теплоти.

Все обладнання передбачене для зовнішньої експлуатації в температурному режимі від -10°C до $+50^{\circ}\text{C}$. Температурний режим з боку споживача $50/30^{\circ}\text{C}$, з боку МТА $90/50^{\circ}\text{C}$ з плавним пониженням температури в процесі розрядки теплоти до 40°C .

МТА працює наступним чином. МТА підключається шлангами та електричним кабелем до джерела теплоти. Мережевий насос на ІТП МТА відключається. Теплоносій від джерела теплоти надходить в МТА по зворотному трубопроводу напряму в колектор обв'язки баків-акумуляторів відповідним циркуляційним насосом. Пластинчатий теплообмінник ІТП відключається, теплоносій через байпас, від джерела теплоти, подається при абсолютному тиску 1,0–4,0 бар. Далі теплоносій надходить у трубний простір спірального теплообмінника, проходить по довжині трубної спіралі, забезпечуючи ефективний теплообмін при «зарядці» теплоакумулятора.

При «зарядці» акумулятора теплоносій надходить у верхню частину корпусу з високою температурою і відводиться в нижній частині корпусу вже охолодженим. Зарядка МТА завершується, коли досягається температурна рівновага між температурами прямого та зворотного трубопроводів МТА. Значення температур прямого та зворотного трубопроводів МТА постійно фіксуються зовнішніми провідними датчиками температури DS18B20, які попередньо налаштовуються на максимальну та мінімальну температуру, та за допомогою пристрою «ОКО PRO-X» через GSM-мережу мобільного оператора зв'язку передаються на комп'ютер диспетчера тепломережі. При досягненні стаціонарного в часі режиму нагрівання весь об'єм ТАМ в баки-акумуляторі матиме майже однорідну температуру. Цикл зарядки завершується.

При «розрядці» МТА працює у зворотному порядку – пластинчатий теплообмінник ІТП включається в роботу. Байпас пластинчатого теплообмінника відключається. Теплообмін між

системою опалення споживача та теплоносієм, який надходить від баків-акумуляторів, протікає через пластинчатий теплообмінник ІТП. Мережевий насос ІТП включається в роботу. Теплоносій від МТА надходить по прямому трубопроводу в систему опалення споживача напряму в колектор обв'язки баків-акумуляторів відповідним циркуляційним насосом. Теплоносій від споживача надходить холодним з температурою близько 30 оС, а відводиться до споживача з підвищеною температурою близько 50 оС. Кількість та температура теплоносія, відданого споживачу, фіксується тепловим лічильником механічним SKYLAR SNT 8, встановленим на прямому трубопроводі МТА.

Кількість використаної електричної енергії фіксується лічильником електроенергії 220 В, типу TeleТес, Україна. Таблиця 2 містить зведення основної інформації про випробувану систему накопичення тепла.

Таблиця 2. Технічні параметри МТА-0,5 МВт

№ пп	Технічні параметри, характеристики (показники)	Значення
1	Теплова потужність МТА, МВт	не більше 0,5
2	Розрахункова теплова потужність, кВт·год	1200
3	Розрахунковий середній час використання за один цикл заряджання-розряджання, год	7.5
4	Тиск в ємностях та трубопроводах акумульованого відсіку, Р, МПа	0,07
5	Продуктивність теплоносія контуру нагрів / охолодження м ³ /год	до 2,5
6	Потужність електрична встановлена, кВт	до 4,2
7	Температура теплоносія в контурі ємностей, °С	50–90
8	Температура теплоносія, °С	60–120
9	Об'єм теплоносія в теплоакумуляційній ємності, м ³	до 1,5
10	Загальний обсяг теплоакумуляційного матеріалу, м ³	12,0
11	Теплоізоляція (поліуретан, захищений ззовні алюмінієвим листом), мм	100
12	Габаритні розміри, не більше: Довжина, мм Ширина, мм Висота, мм	6300 3000 3000
13	Споряджена маса, кг	17500
14	Кліматичне виконання і категорія розміщення	УХЛ17
15	Коефіцієнт готовності	0,98
16	Коефіцієнт технічного використання	0,8
17	Рівень стандартизації та уніфікації, %, не нижче	36
18	Коефіцієнт ефективності теплового зберігання, %	85
19	Споживана електрична потужність, кВт	3,0
20	Опір між місцями приєднання контуру заземлення і кожної доступної для дотику людини металевої струмопровідної частини, Ом	0,1
21	Електричний опір ізоляції ланцюгів керування повинен витримувати протягом 1 хвилини під час випробувань напругу, В	1000
22	Опір ізоляції провідників, МОм, не менше	10
23	Опір контуру заземлення, Ом, не більше	4
24	Напруга живлення в ланцюгах керування, В	24
25	Ступінь захисту електротехнічних виробів згідно з ГОСТ 14254-2015 (IEC 60529:2013)	IP54

Збір даних вимірювань проводився шляхом візуальних спостережень з фіксацією даних в робочому журналі та онлайн-моніторингом. Система автоматичного моніторингу передбачає наявність в складі МТА пристрою типу «ОКО PRO-X» з даним типом програмного забезпечення, який застосовується для дистанційного контролю та керування за допомогою мобільного зв'язку, використовуючи GSM-мережу мобільного оператора. Пристрій контролює об'єкт за допомогою дротяних датчиків – всього можна використовувати 16 входів-виходів (можуть використовуватися як входи або як виходи, які налаштовуються у «Конфігураторі») з можливістю розширення до 481 адрес. В даному пристрої реалізований функціональний контролер резервування живлення, який відповідає сучасним вимогам охоронних систем, а саме: заряд / розряд АКБ, вибір струму заряду АКБ (через

«Конфігуратор» менше, ніж 4,4–5 або 4–7 А/год), заборона ввімкнення без наявності АКБ, запуск подачі живлення, індикація заряду АКБ, наявність напруги на виході, наявність напруги на вході [22].

До пристрою також можна під'єднати зовнішні провідні адресні датчики температури DS18B20 в кількості до 8 штук. Технічні характеристики цифрового датчика температури DS18B20: інтерфейс: 1 – провід, точність $\pm 0,5$ °C від -10 °C до + 85 °C, діапазон електроживлення: 3,0 В до 5,5 В, діапазон температур: від -55 °C до + 125 °C, з'єднання: зовнішні компоненти не потрібні, серійний код – унікальний 64-бітний, кожух: труба з нержавіючої сталі, водонепроникна, довжина кабелю – 8 метрів. У постійній пам'яті DS18B20 можна зберегти граничні значення температури, у разі виходу за межі яких сенсор переходить в режим тривоги. На загальній шині з багатьох сенсорів мікроконтролер може за раз дізнатися, які з них перейшли в цей режим. У такий спосіб стає легко визначити проблемну зону в контрольованому середовищі [23].

3. Результати

За результатами, отриманими під час випробувань, для обговорення були обрані питання, пов'язані з процесом транспортування (1), зарядки та розрядки теплового акумулятора в умовах постійних відключень електричної енергії (2), та вплив роботи котла на систему опалення через МТА (3). У рамках аналізу було порівняно результати роботи МТА упродовж 2 тижнів лютого місяця 2023 року. Були перевірені такі параметри роботи МТА:

1. з 0.00 01.02.2023 до 21.00 01.02.2023 року (21 година) – імітація процесу транспортування;
2. з 21.00 01.02.2023 до 11.00 05.02.2023 зарядка МТА від електрокотла в умовах періодичних відключень електромережі;
3. з 11.00 05.02.2023 до 17.00 10.02.2023 року розрядка МТА при роботі від дизель-генератора при відключенні електрокотла через періодичні відключення електромережі;
4. з 17.00 10.02.2023 до 24.00 14.02.2023 року робота TES з нагрівом теплоносія електричним котлом та подачею на споживача через МТА.

Отримані дані онлайн-моніторингу значень температури на прямому трубопроводі на виході з МТА представлені в таблиці 3. Відсутність даних збіглася з часом періодичних відключень електроживлення від мережі у зв'язку з відключенням мобільного зв'язку GSM-мережі мобільного оператора.

3.1. Імітація процесу транспортування теплоакумулятора

В таблиці 3 показана зміна температури на виході з МТА з 0.00 01.02.2023 до 21.00 01.02.2023 року. Максимальна температура на виході теплоносія з МТА (Т-1) сягає 51 °C, мінімальна температура 46 °C, що в часі збігається зі змінами температури зовнішнього повітря. Середня температура Т-1 = 48,5 °C. При цьому температура в баках-акумуляторах всередині TES залишається на 20 % вище і складає приблизно 58 °C, що підтверджується нашими попередніми дослідженнями, які проводились в лабораторних умовах. Аналізуючи різницю температури, можна виявити вплив температури зовнішнього повітря на отримані показники (див. рисунок 3). Таким чином, приходимо до висновку, що зменшення температури на поверхні прямого трубопроводу Т-1 за 21 годину не перевищують 5 % або 0,25 % за годину, що гарантовано дозволяє транспортувати МТА на відстань до 60 кілометрів і більше при швидкості руху вантажного автомобіля 30 км/год.

3.2. Процес зарядки теплового акумулятора від електрокотла

Починаючи з 21.00 01.02.2023 до 11.00 05.02.2023 протягом 86 годин проводилося зарядження МТА тепловою енергією від електричного котла потужністю 24 кВт, цей час припадає на період віялових відключень електромережі.

Зарядження МТА проводилося по циркуляційному контуру через зворотний трубопровід (Т-2) напряму в баки-акумулятори, обминаючи пластинчастий теплообмінник ІТП, а в систему опалення

будівлі розряджається по прямому трубопроводу (Т-1). Фрагмент зарядки / розрядки МТА в процесі завантаження від електрокотла представлено на рисунку 5.

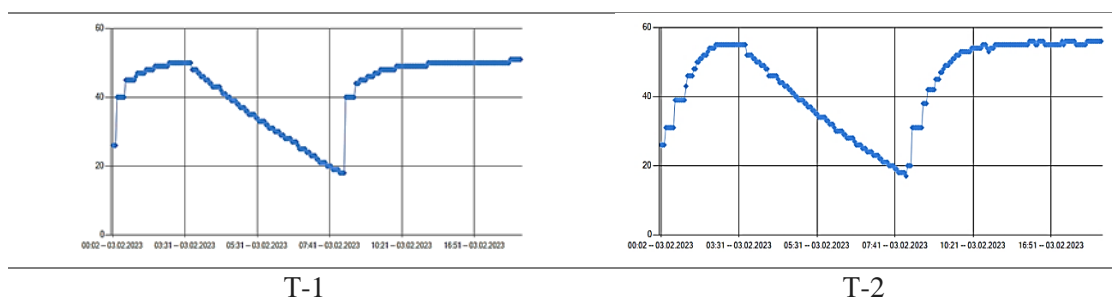


Рисунок 5. Графік температур прямого Т-1 та зворотного Т-2 трубопроводів при завантаженні МТА від електричного котла з 21.00 01.02.2023 по 11.00 05.02.2023

Як можна бачити, потужності котла недостатньо для швидкого заряджання МТА, тому процес зайняв багато часу. Окрім того, постійні відключення електроенергії також вплинули на час зарядки. Однак робота TES з МТА в екстремальних умовах доводить можливість його надійного використання в період блекауту. В реальних умовах на протязі 5 діб температура теплоносія Т-1 піднялася з 46 до 59 °С, в цей же період часу зовнішні від’ємні температури повільно знижувалися.

Таблиця 3. Гістограма температури °С на виходи з МТА в період з 01 по 15.02.2023 року, відсутність даних свідчить про відключення в цей час електроенергії з мережі

час та дата	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	14
0:00	47	48	56	57	57	53				43	44	59	60
1:00	46	50	56	59	59					40	47	59	59
2:00	47	50	54	57	57	53		48	48	39	50	59	59
3:00	46	51		58	58		51				53	59	59
4:00	47	51		59	59	53					54	59	59
5:00	47	48		57	57	50					55	59	59
6:00	46	49		58	58	52		49	49		56	59	59
7:00	47	49				52				39	56	59	59
8:00	51	50								39	57	59	59
9:00	45		52	58	58		50				57	59	59
10:00	46	50	52	59	59			49	49	39	57	59	60
11:00	47	51	52	59	59					39	58	59	59
12:00	47	51	53						47	39	58	59	59
13:00	47	51	52						47		58	59	60
14:00	48	51	52								58	59	60
15:00			52	57	57	50			47	39	58	59	60
16:00		51	52	57	57	49	50		48	39	59	59	59
17:00	48		55			50			48		59	59	59
18:00								48	48	40	59	59	60
19:00	48		57							40	59	59	59
20:00	49		57							41	59	59	59
21:00	46			56	56	49	49	49	43	43	59	59	59
22:00	48	51		52	52	49	49			43	59	59	59
23:00	48		56	53	53	50		49	43	43	59	59	59

3.3. Процес розрядки теплового акумулятора при відсутності мережевої електричної енергії (робота від дизель-генератора)

Була проведена розрядка МТА, при роботі від дизель-генератора, через постійні відключення від електромережі. Як джерело струму використовувався дизельний генератор VACKSON KDE7000E 5,5 кВт, максимальна потужність становить 5,5 кВт, а номінальна 5 кВт, генератор має однофазну напругу 220 В, клас захисту IP 44, час безперервної роботи – 11 годин, витрати палива – 1,25 літра на годину. Дизель-генератор відпрацював загалом 75 зі 116 годин роботи МТА з 11.00 05.02.2023 до 17.00 10.02.2023 року, за цей час було витрачено 84 літри дизельного пального. З економічної точки зору використання дизель-генератора як джерела отримання електроенергії для МТА не є раціональним. Витрати дизельного пального генератора на годину розраховуються на підставі стандартного

показника споживання пального для дизель-генератора – 0,2 л помноженого на показник потужності електростанції. Приблизний розрахунок показує, що за 75 годин роботи було отримано 300 кВт·год електроенергії від дизель-генератора. При цьому було витрачено 84 літри дизельного пального за ціною 30 грн за літр, що склало 2520 грн. Однак, якби опалення будівлі здійснювалося за допомогою водогрійного котла, то для ліквідації аварійної ситуації знадобилася б пересувна електростанція потужністю 25 кВт, витрата палива якої становить 5 літрів на годину. Таким чином, дизельного пального було б витрачено в 5 разів більше, ніж 420 літрів, що у грошовому виразі складає 12600 грн, без урахування операційних витрат на транспортування та зберігання палива. У зв'язку з тим, що нами розглядається випадок ліквідації наслідків аварійної ситуації, проведення порівняльних економічних розрахунків із вартістю мережної електроенергії не проводилося.

У нашому дослідженні електроенергія від дизель-генератора використовувалася виключно для забезпечення роботи циркуляційних насосів та аварійного освітлення МТА. При включенні мережевого електропостачання дизель-генератор переходив до режиму очікування, електричний котел у цей час включався в роботу. Загальний час мережевого електроживлення у цей час склав 40 годин.

Відомо, що кількість теплових втрат будівлі дорівнює кількості підведеної теплової енергії. Отже, використання системи опалення компенсує тепловтрати крізь огорожувальні конструкції будівлі, які змінюються в часі та залежать від температури зовнішнього повітря.

Слід також зазначити, що на цей період припадає різке зниження температури атмосферного повітря з +4 °С до -14 °С, дивись рис. 3. Температура Т-1 знизилася на 10 °С – з 59 °С до 39 °С, при цьому робота МТА забезпечила стійке теплопостачання будівлі. Температура всередині приміщень будівлі підтримувалася на рівні +18 °С ± 1 °С. Таким чином, приходимо до висновку, що МТА виконував функції аварійного джерела теплопостачання та довів перспективи його подальшого використання.

3.4. Процес роботи котла на споживача через теплоаккумулятор

Для перевірки технічних та економічних показників роботи системи TES з нагрівом теплоносія електричним котлом та подачею тепла на споживача через МТА проведено дослідження теплопостачання будівлі протягом 96 годин з 17.00 10.02.2023 до 24.00 14.02.2023 року (рис. 1).

За цей час температура теплоносія Т-1 змінювалася з 39 °С до 59 °С, динаміка змін надана в таблиці 3. Відключень електричної мережі не було. Досліджуваний режим роботи показав високі показники системи TES та забезпечив стійке опалення будівлі. На підставі проведеного експерименту та проведеного порівняльного аналізу варіантів опалення прийнято рішення щодо подальшого його використання на практиці. Цей варіант роботи системи TES показав найкращі результати та забезпечив стійке й економічне опалення будівлі при нормальній експлуатації та в умовах блекауту.

4. Обговорення

В процесі проведення випробувань головна ціль нами була досягнута. Проведене дослідження показало можливість використання МТА як для аварійного теплопостачання будівлі, так і в умовах звичайної експлуатації. Інтеграція системи TES в систему опалення є дуже перспективним методом усунення загроз для теплозабезпечення цивільних та військових об'єктів. Зарядка МТА тепловою енергією може бути здійснена від різних джерел, віддалених від споживача на відстань до 60 кілометрів і більше. Крім того, при повному або частковому відключенні електричної енергії МТА може забезпечити стійке теплопостачання об'єктів з використанням пересувних електричних генераторів. Найперспективнішим рішенням є модель подачі теплоносія від джерела теплоти до системи опалення будівлі через теплоаккумулятор. Цей варіант не тільки забезпечує стійку роботу системи опалення при аварійних ситуаціях, але й має економічну привабливість. Проте проведені натурні випробування показали, що дуже важливо звернути увагу на наступні питання:

- Попри надійне утеплення баків-аккумуляторів в акумуляційному відсіку, слід приділити увагу утепленню ІТП та системи приєднання до споживача. На цих двох ділянках зафіксовано найбільші непродуктивні втрати теплоти.

- Хоча загалом конструкція МТА показала свою надійність та стійкість в роботі, з метою її вдосконалення необхідно переглянути конструкцію баків-акумуляторів та місця розміщення датчиків температури для моніторингу та процесу управління робочими процесами. Температура зовнішнього повітря сильно впливала на отримані показники.
- Необхідно прагнути забезпечення температури заряджання МТА на 30 % вище температури акумуляції. Слід приділити увагу часу заряджання, що безпосередньо впливає на процес плавлення РСМ, яке розміщене в баках-акумуляторах.
- У зв'язку з тим, що вибір теплоакумулювального матеріалу дуже впливає на рентабельність МТА і його технічні можливості, це питання необхідно розглядати виходячи з місцевих джерел теплоти, які можуть використовуватися для заряджання.
- Слід зазначити, що в умовах блекауту GSM-мережа мобільного оператора перестає функціонувати, у зв'язку з чим втрачається можливість її використання для дистанційного контролю та управління роботою МТА.
- При підготовці до експлуатації об'єктів в умовах блекауту необхідно забезпечити наявність пересувних електростанцій відповідної потужності та вольтажу, а також забезпечити гарантоване постачання пального.
- Об'єкти, які плануються опалюватися в умовах блекауту, повинні бути заздалегідь обладнані вузлами приєднання МТА.
- При проектуванні МТА для забезпечення надійної циркуляції теплоносія необхідно застосовувати високонапірні насоси.
- Проведене дослідження підтвердило, що до 30 % акумульованої теплоти в баках-акумуляторах не можуть бути використані. Тому цей факт необхідно враховувати при проектуванні систем TES.
- При експлуатації електрогенераторів за від'ємних температур повітря потрібно звертати увагу на вимоги обмеження експлуатації: температура до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ – для дизельних та до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – для бензинових генераторів.

Вищезазначені питання не зменшують вагомість використання мобільних теплових акумуляторів для ліквідації аварій та надзвичайних ситуацій. Отриманий у ході проведеного дослідження досвід дає змогу усунути зазначені недоліки та виробити стратегію масового впровадження МТА у комунальне господарство та Державну службу з надзвичайних ситуацій України. При розробці конструкторської документації теплових акумуляторів мають бути враховані та апробовані новітні технології, які можуть застосовуватися при подальшій роботі з поставки у виробництво нового обладнання. Проведений аналіз нормативної бази свідчить, що в Україні зараз відсутні норми у сфері застосування мобільних теплових акумуляторів.

5. Висновки

1. Проведена апробація в натурних умовах експлуатації системи зберігання та мобільного транспортування на базі МТА-0,5 МВт дозволила отримати приблизно 1200 кВт·год теплоти.

2. В результаті проведених досліджень, в опалювальному сезоні 2022–2023 рр., було встановлено, що робота МТА-0,5МВт дозволяє підтримувати стабільну температуру $+18 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ в будівлі опалюваною площею 380 м² на протязі до 5 діб при виникненні ситуацій аварійного відключення енергопостачання та забезпечує до 20 % економії палива на опалення при плановій експлуатації будівлі, що свідчить про великий потенціал цього рішення.

3. Система TES працювала належним чином та відповідно до реальних умов експлуатації. Ситуацій, які перешкоджають використанню МТА-0,5МВт, не виявлено.

4. Для подальшого широкого використання необхідно подовжувати роботу в напрямі розширення функцій та сфер застосування МТА, мінімізації непродуктивних теплових втрат, удосконалення конструкції та пошуку нових теплоакумулювальних матеріалів з більшою теплоємністю та дешевих джерел теплоти. Такі дослідження важливі з точки зору можливості

забезпечення теплом віддалених від джерел теплової енергії об'єктів. Було встановлено, що МТА може бути перевезений для використання на дистанцію 100 км і більше.

5. Проведена робота дозволяє визначити напрями подальших наукових досліджень, розробок, практичних рекомендацій та широке впровадження у сферу засобів акумулювання теплоти, створюючи умови, необхідні для отримання реальних результатів в максимально короткі терміни.

6. МТА можуть використовуватись в місцях виникнення надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, при виконанні аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт, заходів з надання першої допомоги постраждалим під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, катастроф і стихійного лиха.

7. Окрім того, використання мобільних теплових акумуляторів ємнісного типу дозволяє розв'язувати проблеми попередньої підготовки об'єктів інженерної інфраструктури до експлуатації в умовах проведення бойових дій та надзвичайних ситуацій, а саме для стабільного опалення та охолодження.

6. Фінансування робіт

Автори визнають, що цей проєкт отримав фінансування від програми Кабінету Міністрів України від 10.07.2019 р. № 530-р «Про затвердження переліку найважливіших науково-технічних (експериментальних) розробок за пріоритетними напрямами розвитку науки і техніки в рамках виконання державного замовлення на найважливіші науково-технічні (експериментальні) розробки та науково-технічну продукцію у 2019–2020 роках» та Міністерства освіти і науки України від 23.07.2019 р. № 1020 «Про фінансування у 2019 році науково-технічних робіт в рамках виконання державного замовлення на науково-технічні (експериментальні) розробки та науково-технічну продукцію» по державному замовленню за договором № ДЗ/80–2019 від 25 вересня 2019 р. «Розроблення системи зберігання та мобільного транспортування теплової енергії».

7. Подяка

Директору медичного реабілітаційного центру МВС України «Кремінці» Домбровану О.М., директору ДНДІ МВС України Вербенському М.Г., заступнику директора ДНДІ МВС України Смерницькому Д.В. та начальнику відділу ДНДІ МВС України Рябому С.М. за допомогу при проведенні натурних випробувань.

Посилання

1. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. *UNDRR*. URL: <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030> (дата звернення: 28.09.2023).
2. The European Union Civil Protection Mechanism. *EEC*. URL: <https://eecentre.org/partners/the-european-union-civil-protection-mechanism/> (дата звернення: 28.09.2023).
3. Principles for resilient infrastructure. *UNDRR*. 2023. 72 p. URL: <https://www.undrr.org/publication/principles-resilient-infrastructure> (дата звернення: 02.10.2023).
4. Про затвердження Плану реагування на надзвичайні ситуації державного рівня: постанова Кабінету Міністрів України від 14 березня 2018 р. № 223. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/223-2018-%D0%BF#Text> (дата звернення: 28.09.2023).
5. Зелена книга з питань захисту критичної інфраструктури в Україні: зб. матер. міжнар. експерт. нарад. Упоряд.: Бірюков Д.С., Кондратов С.І. За заг. ред. О.М. Суходолі. Київ: НІСД, 2016. 176 с.
6. Демченко В.Г. Усунення загроз забезпечення теплом інфраструктурних об'єктів. *Промислова теплотехніка*. 2017. т. 39. № 2. С. 65—69. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2017.10>
7. Демченко В.Г., Коник А.В., Погорелова Н.Д. Пропозиції щодо забезпечення стабільного теплопостачання. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2022. Т. 46. № 3. С. 73—83. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2022.7>
8. Коваленко Ю.Л., Хандогіна О.В. Врахування кліматичних умов в процесі порівняльної еколого-економічної оцінки енергоносіїв. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2023. № 2(26). С. 111—121. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-2\(26\)-111-121](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-2(26)-111-121)

9. Горященко С., Горященко К., Драпак Г., Нездоровін В. Математична модель динаміки теплоакumuлюючої системи опалення. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2022. № 2. С. 52—57. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-70-2-7>
10. EU Strategy on Heating and Cooling. Resilient Energy Union with a climate change policy. 2016. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/heating-and-cooling_en (дата звернення: 02.10.2023).
11. Cabeza L. F., Martorell I., Miró L., Fernández A. I., Barreneche C. Introduction to thermal energy storage systems. *Advances in Thermal Energy Storage Systems*. 2021. P. 1—33. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819885-8.00001-2>
12. Bejarano G., Lemos J. M., Rico-Azagra J., Rubio F. R., Ortega M. G. Energy Management of Refrigeration Systems with Thermal Energy Storage Based on Non-Linear Model Predictive Control. *Mathematics*. 2022. Vol. 10. Iss. 17. 3167. <https://doi.org/10.3390/math10173167>
13. Alva G., Liu L., Huang X., Fang G. Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 68. P. 693—706. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.021>
14. Guney M. S., Tepe Y. Classification and assessment of energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 75. P. 1187—1197. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.102>
15. Del Pero C., Aste N., Paksoy H., Haghghat F., Grillo S., Leonforte F. Energy storage key performance indicators for building application. *Sustainable Cities and Society*. 2018. Vol. 40. P. 54—65. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.052>
16. Kuksu T., Bruel P., Jamil A., El Rafiki T., Zerauli Y. Energy Storage: Applications and Challenges. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2014. Vol. 120. P. 59—80. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.015>
17. Spodyniuk N.A., Shepichak V.B. Analysis of the cost of heat energy and the ways of it's saving for residential buildings. *Scientific Bulletin of UNFU*. June 2020. Vol. 30. No 2. P. 62—65 <https://doi.org/10.36930/40300211>
18. Демченко В.Г. Интенсификация теплообмена в топках водогрейных котлов: монографія. Київ: Інститут технічної теплофізики НАН України, 2012. 136 с. ISBN 078-966-02-6699-5.
19. Demchenko V., Konyk A. Mobile thermal energy storage (M-TES). *Journal of New Technologies in Environmental Science*. 2022. Vol. 6. No 3. P. 91—96. <https://doi.org/10.53412/jntes-2022-3-2>
20. Інструкція з експлуатації електричного котла Protherm Ray (Скат) 24KE/14. URL: [https://teploradost.com.ua/files/1/docs/Protherm_Ray_\(%D0%A1%D0%BA%D0%B0%D1%82\).pdf](https://teploradost.com.ua/files/1/docs/Protherm_Ray_(%D0%A1%D0%BA%D0%B0%D1%82).pdf) (дата звернення: 02.10.2023).
21. Лічильник тепла SCYLAR INT 8 з механічним витратоміром APATOR POWOGAZ для закритих систем. *TPS-Lviv*. URL: http://teplosvitlviv.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=1087 (дата звернення: 02.10.2023).
22. GSM-сигналізація «ОКО-PRO-X». *Торгова марка ОКО*. URL: <https://xn--j1ahb.xn--j1amh/ohrannaya-signalizaciya/gsm-dozvonshchiki/oko-pro-x/> (дата звернення: 28.09.2023).
23. Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer (DS18B20). URL: <https://www.mini-tech.com.ua/download/datasheet/sensors/DS18B20.pdf> (дата звернення: 28.09.2023).

EXPERIENCE IN USING HEAT STORAGEES IN BLACKOUT CONDITIONS

Volodymyr Demchenko¹, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, <https://orcid.org/0000-0002-4211-356X>

Svitlana Kovtun^{2*}, Dr. Sci. (Engin.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6596-3460>

Oleh Nazarenko², PhD (Engin.), Senior Research Scientist, <https://orcid.org/0000-0003-1873-1971>

Andrii Nazarenko², PhD (Engin.), Senior Research Scientist, <https://orcid.org/0000-0001-7795-269X>

¹Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist St., Kyiv, 03057, Ukraine;

²General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha St., Kyiv, 03150, Ukraine

*Corresponding author: kovtunsi@nas.gov.ua

Abstract. *This study is the first and so far the only one in Ukraine dedicated to the experience of using mobile thermal energy storage in emergencies, in particular blackouts. The article considers the issue of ensuring energy security. The classification of heat storage system parameters is given. The considered*

model of an autonomous heating system with a heat storage system. The impact on the thermal energy storage heating system with different designs of heat generators and fuel types is shown. The results of the operation of a combined system consisting of an autonomous heating system of a separate building equipped with an electric boiler and thermal energy storage are presented. Thermal energy storage is used not only as a buffer between the heat generator and the heating system but also as a source of heat. Integrating the thermal energy storage into the building's heating system ensures constant heat supply to the building, 100% coverage of peak dynamic loads, halving the boiler unit capacity and operating costs by 20%. It has been proven that the presence of thermal energy storage allows solving the problem of providing a stable heat supply in the conditions of a power outage. A detailed description of the conducted study of methods and equipment used during field operation and data processing is given. The results of the field tests of the thermal energy storage in winter operation conditions are provided. Features of the use of the controller for monitoring the heating system's operation with thermal energy storage are provided. The results of field tests are given. An analysis of the received data was carried out. Formulated directions for further scientific research, development, and practical recommendations for the use of mobile heat accumulators in the national economy and the state emergency service of Ukraine. Economic criteria and efficiency criteria aimed at reducing operational costs are considered. The obtained research results can be used to predict the operation of heating and cooling systems equipped with thermal energy storage.

Keywords: Heating system, security, blackout, thermal energy storage, monitoring.

References

1. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. *UNDRR*. URL: <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030> (Last accessed: 28.09.2023).
2. The European Union Civil Protection Mechanism. *EEC*. URL: <https://ecentre.org/partners/the-european-union-civil-protection-mechanism/> (Last accessed: 28.09.2023).
3. Principles for resilient infrastructure. (2023). *UNDRR*. 72 p. URL: <https://www.undrr.org/publication/principles-resilient-infrastructure> (Last accessed: 02.10.2023).
4. On the approval of the State Emergency Response Plan: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine. Specification on March 14, 2018, № 223. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/223-2018-%D0%BF#Text> (Last accessed: 28.09.2023).
5. Green book on the protection of critical infrastructure in Ukraine: coll. materials of international expert. meeting. (2016). Arrangement Biryukov D.S., Kondratov S.I. In: Sukhodolia O.M. (eds.). Kyiv: NISS, 176 p.
6. Demchenko, V. (2017). Removal threats of providing heat of infrastructural objects. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 39(2), 65–69 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2017.10>
7. Demchenko, V., Konyk, A., & Pogorelova, N. (2022). Developments to increase the efficiency of heat supply in the thermal power industry. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 46(3), 73–83 [in Ukrainian]. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/tpe.3.2022.7>
8. Khandogina, O., & Kovalenko, Yu. (2023). Consideration of climate conditions in comparative environmental and economic assessment of energy carriers. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*, 2(26), 111–121 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-2\(26\)-111-121](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-2(26)-111-121)
9. Horiashchenko, C., Horiashchenko, K., Drapak, G., & Nezdorovin, V. (2022). Mathematical model of the dynamics of a heat storage system. *Measuring and computing devices in technological processes*, 2, 52–57 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-70-2-7>
10. EU Strategy on Heating and Cooling. (2016). Resilient Energy Union with a climate change policy. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/heating-and-cooling_en (Last accessed: 02.10.2023).
11. Cabeza, L. F., Martorell, I., Miró, L., Fernández, A. I., & Barreneche, C. (2021). Introduction to thermal energy storage systems. *Advances in Thermal Energy Storage Systems*, 1–33. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819885-8.00001-2>
12. Bejarano, G., Lemos, J. M., Rico-Azagra, J., Rubio, F. R., & Ortega, M. G. (2022). Energy Management of Refrigeration Systems with Thermal Energy Storage Based on Non-Linear Model Predictive Control. *Mathematics*, 10(17), 3167. <https://doi.org/10.3390/math10173167>
13. Alva, G., Liu, L., Huang, X., & Fang, G. (2017). Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 693–706. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.021>
14. Guney, M. S., & Tepe, Y. (2017). Classification and assessment of energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1187–1197. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.102>
15. Del Pero, C., Aste, N., Paksoy, H., Haghghat, F., Grillo, S., & Leonforte, F. (2018). Energy storage key performance indicators for building application. *Sustainable Cities and Society*, 40, 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.052>

16. Kuksu, T., Bruel, P., Jamil, A., El Rafiki, T., & Zerauli, Y. (2014). Energy Storage: Applications and Challenges. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 120, 59–80. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.015>
17. Spodyniuk, N.A., & Shepitchak, V.B. (2020). Analysis of the cost of heat energy and the ways of it's saving for residential buildings. *Scientific Bulletin of UNFU*, 30(2), 62–65. <https://doi.org/10.36930/40300211>
18. Demchenko, V.G. (2012). Intensification of heat exchange in furnaces of water heating boilers: Monograph. Kyiv: Institute of Technical Thermophysics of NAS of Ukraine, 136 p. ISBN 078-966-02-6699-5.
19. Demchenko, V., & Konyk, A. (2022). Mobile thermal energy storage (M-TES). *Journal of New Technologies in Environmental Science*, 6(3), 91–96. <https://doi.org/10.53412/jntes-2022-3-2>
20. Electric boiler Protherm Ray 24KE/14 operating instructions. URL: [https://teploradost.com.ua/files/1/docs/Protherm_Ray_\(%D0%A1%D0%BA%D0%B0%D1%82\).pdf](https://teploradost.com.ua/files/1/docs/Protherm_Ray_(%D0%A1%D0%BA%D0%B0%D1%82).pdf) (Last accessed: 02.10.2023).
21. Heat meter SCYLAR INT 8 with mechanical flow meter APATOR POWOGAZ for closed systems. *TPS-Lviv*. URL: http://teplosvitlviv.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=1087 (Last accessed: 02.10.2023).
22. GSM-alarm «OKO-PRO-X». URL: <https://xn--j1ahb.xn--j1amh/ohrannaya-signalizaciya/gsm-dozvonshchiki/oko-pro-x/> (Last accessed: 28.09.2023).
23. Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer (DS18B20). URL: <https://www.mini-tech.com.ua/download/datasheet/sensors/DS18B20.pdf> (Last accessed: 28.09.2023).

Надійшла до редколегії: 05.10.2023