

УДК: 536.24.621.642.2

## КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗРАХУНОК МОБІЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО АКУМУЛЯТОРА

Демченко В.Г., канд. техн. наук, Гроть С.С., Погорєлова Н.Д.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2019.5>

У даній роботі проаналізовано чинники та особливості, які впливають на проведення конструкторських розрахунків теплових акумуляторів. Наведена класифікація теплових акумуляторів і методика їх розрахунку в залежності від обраного теплоакumuлюючого матеріалу. В результаті дослідження сформульовані основні показники тривалості роботи, що дозволяють провести оптимізацію конструкції мобільних теплових акумуляторів.

В даній роботі проаналізовані фактори і особливості, впливаючі на проведення конструкторських розрахунків теплових акумуляторів. Приведена класифікація теплових акумуляторів і методика їх розрахунку в залежності від обраного теплоакumuлюючого матеріалу. В результаті дослідження сформульовані основні показники тривалості роботи, що дозволяють провести оптимізацію конструкції мобільних теплових акумуляторів.

In this paper, factors and features that influence the design calculations of thermal batteries are analyzed. Classification of thermal accumulators and the method of their calculation depending on the selected heat-storage material are given. As a result of the study, the main dynamic indicators of the operating time are formulated, allowing optimisation of the design of mobile thermal storage.

Бібл. 15, рис. 4.

**Ключові слова:** система теплопостачання, мобільний акумулятор, теплота, метод, розрахунок. $\dot{a}$  – теплова дифузія [ $\text{m}^2/\text{c}$ ]; $C_p$  – тепломісткість речовини, [ $\text{kJ}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$ ]; $C_{lp}$  – середня питома тепломісткість між  $T_m$  і  $T_f$  [ $\text{kJ}/\text{kg K}$ ]; $C_{sp}$  – середня питома теплота між  $T_i$  та  $T_m$  [ $\text{kJ}/\text{kg K}$ ]; $G$  – витрата теплоносія, [ $\text{kg}/\text{c}$ ]; $h_1 = f(P, T)$  – ентальпія на вході в тепловий акумулятор; $h_2 = f(P, T)$  – ентальпія на виході з акумулятора; $\Delta h_m$  – теплота плавлення на одиницю маси [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ]; $k_Q$  – коефіцієнт запасу теплової енергії; $m$  – маса акумуляційної речовини [ $\text{kg}$ ]; $m_p$  і  $m_m$  – маси твердої та рідкої фаз відповідно [ $\text{kg}$ ]; $Q$  – кількість теплоти [ $\text{kJ}$ ]; $Q_L$  – нормативне видалення енергії з МТА [ $\text{kJ}$ ]; $Q_u$  – швидкість додавання енергії до МТА [ $\text{kJ}$ ]; $r$  – радіус циліндра [ $\text{m}$ ]; $T_f$  – кінцева температура [ $^\circ\text{C}$ ]; $T_i$  – початкова температура [ $^\circ\text{C}$ ]; $T_m$  – температура плавлення [ $^\circ\text{C}$ ]; $\Delta T$  – різниця температур, [ $^\circ\text{C}$ ]; $t$  – температура, [ $^\circ\text{C}$ ]; $t_a$  – температура навколишнього осередовища [ $^\circ\text{C}$ ]; $t_f$  – кінцева температура [ $^\circ\text{C}$ ]; $t_s$  – температура нагріву ТАМ [ $^\circ\text{C}$ ]; $U_s$  – коефіцієнт втрат теплоти накопичувача, який

залежить від площі поверхні резервуара;

 $V$  – об'єм акумуляційного матеріалу [ $\text{m}^3$ ]; $x, y, z$  – геометричні координати [ $\text{m}$ ]; $\alpha$  – коефіцієнт теплопередачі [ $\text{W}/\text{m K}$ ]; $\rho$  – щільність акумуляційної речовини [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]; $\lambda$  – теплопровідність [ $\text{W}/\text{m K}$ ]; $\tau$  – час, [ $\text{h}$ ]; $\Psi$  – параметр співвідношення мас.**Індекси нижні:** $a$  – навколишня температура; $f$  – кінцева температура; $L$  – рідка фаза; $s$  – середовище з фазовим переходом; $u$  – швидкість; $p$  – рідка фаза; $T$  – тверда фаза; $\phi$  – фактична теплота.**Скорочення:**

ГВП – гаряче водопостачання;

ДСО – дискретна система опалення;

МТА – мобільний акумулятор теплоти;

РСМ – теплоакumuляційна речовина з фазовим переходом;

ТАМ – теплоакumuляційний матеріал.

**Вступ**

Світ в XXI сторіччі чекають радикальні зміни у сфері енергетики, які змінять наше життя. Важливим фактором економії енергії є підвищення ступеня термодинамічної

досконалості всієї технологічної схеми теплозабезпечення. На даний час запроваджується стратегія зниження об'єму енергоспоживання при забезпеченні споживачів якісним і безперебійним теплопостачанням,

що є передумовою розвитку розумних мереж, а саме SmartGrid систем. Реалізація SmartGrid концепції має інноваційний характер і відображає перехід до нового технологічного укладу в енергетиці та в економіці в цілому.

Сучасна теплоенергетика будується на основі трьох компонентів: генерації, передачі та розподіленні теплової енергії. В цій галузі з'являється ще один четвертий елемент, який раніше практично був відсутнім – це зберігання енергії, що повністю змінить звичну нам систему теплозабезпечення. Пристрої для зберігання теплоти є важливими елементами SmartGrid систем теплозабезпечення, особливо в системах, що використовують поновлювані джерела енергії. Європейський Союз, США та інші держави витрачають значні кошти на пошук автономних систем акумуляції високо- та низькопотенційної теплоти, а також розвитку інтелектуальних SmartGrid систем теплозабезпечення. Відмінністю мобільних теплоаккумуляторів від широко розповсюджених стаціонарних є наявність кумулятивного блоку вбудованого блокового теплового пункту який поділяє контури споживача й акумулятора, а також вузла приєднання МТА до джерел теплоти й споживача. МТА розташований в стандартному контейнері, призначеному для транспортування будь яким видом транспорту. Проведений нами аналіз сучасного стану систем теплопостачання свідчить, що акумулювання – серйозний фактор економії енергії. Він дозволяє перерозподіляти одержання і споживання енергії в часі [1].

#### **Об'єкт дослідження**

Об'єктом дослідження є мобільний акумулятор теплоти, вибір методики його конструкторського розрахунку та експлуатаційних показників.

#### **Мета та задачі дослідження**

Метою дослідження є визначення часу заряджання та розряджання мобільного теплового акумулятора в залежності від виду, об'єму теплоакumuлюючого матеріалу та температури. Для виконання дослідження необхідно проаналізувати види накопичення теплової енергії, класи теплових акумуляторів, діапазон робочих температур теплового акумулятора, різноманітні конструктивні особливості апаратів, час експлуатації та методи розрахунку конструктивних параметрів.

#### **Класифікація теплових акумуляторів**

На даний час існує декілька напрямків розвитку систем акумулювання теплової енергії, кожний з яких має свої особливості та алгоритм розрахунку.

Залежно від умов використовується пряме акумулювання тепла, коли акумулюючий матеріал є одночасно і

теплоносієм, і непряме акумулювання – при різних теплоакumuлюючих і теплопередаючих середовищах. Також можливе застосування схем зі спільним використанням цих двох способів акумулювання [2]. Ефективний робочий діапазон температур теплового акумулятора визначається нижнім рівнем комфортної температури в опалюваних приміщеннях і робочими температурами теплоносія, на які розраховані опалювальні прилади. Найпоширеніші радіатори опалення допускають мінімальну температуру на подаючих магістралях не нижче  $t = 40 \dots 50^\circ\text{C}$ . Таким чином, нижня межа робочого діапазону повинна бути не нижче  $t = 35^\circ\text{C}$ . Верхній рівень робочого діапазону визначається санітарними нормами й становить  $t = 65^\circ\text{C}$ . Для фанкойлів максимальна температура теплоносія становить  $t = 50^\circ\text{C}$ , а для системи опалення «тепла підлога» достатньо  $t = 35^\circ\text{C}$ .

Робота МТА заснована на здатності речовин запасати енергію при нагріванні та віддавати при охолодженні. Найпоширенішою і часто вживаною речовиною, яка ефективно акумулює теплоту, є вода. Вода – екологічно чистий матеріал, економічно доступний і має високу теплоємність.

За типом процесу акумуляції енергії розрізняють: теплове акумулювання енергії твердими й рідкими тілами шляхом зміни температури речовини (однофазне); теплове акумулювання енергії за допомогою використання теплоти фазового переходу і термохімічне акумулювання теплової енергії. Основні види зберігання теплової енергії представлені на рисунку 1.

До першого класу апаратів відносять теплові ємнісні акумулятори, які набули широкого поширення. Основна маса котелень в Україні використовує саме рідинні теплові акумулятори.

В якості теплоакumuлюючого матеріалу в них найчастіше використовують воду. Агрегатний стан ТАМ в них не змінюється у всьому робочому діапазоні. Зарядка і розрядка характеризуються виключно зміною температури. Рідинні теплоакumuлятори відносяться до числа простих і надійних приладів акумулювання. Єдиним недоліком використовуваних в них ТАМ є низька питома теплоємність, що призводить до великих габаритних розмірів МТА [3] Як правило, в їх робочому процесі реалізовано пряме акумулювання тепла шляхом власної теплоємності теплоносія в малому діапазоні температур [4]. Для систем теплопостачання це пов'язано, в першу чергу, зі зручністю використання у якості теплоносія води, як найбільш теплоємної рідини у якості ТАМ. Однак, вода є кращим рідким ТАМ тільки у діапазоні робочих температур від 0 до  $100^\circ\text{C}$  – як за комплексом

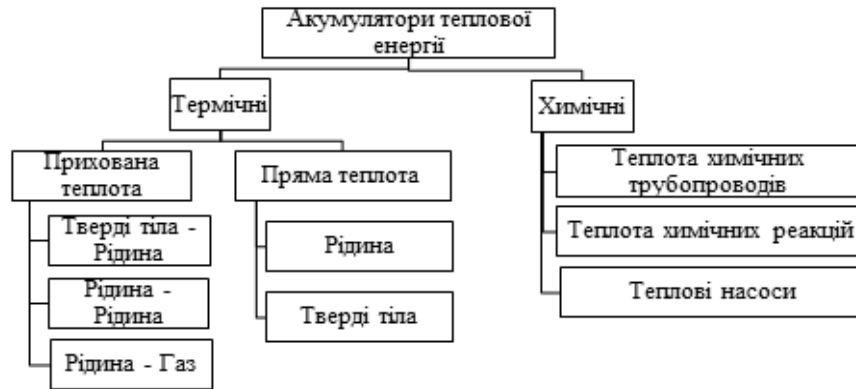


Рис. 1. Види накопичення теплової енергії.

теплофізичних властивостей, так і за економічними показниками. Подальше підвищення робочої температури води недоцільне через те, що пов'язане з істотним зростанням тиску, що значно ускладнює проектування та підвищує вартість конструкції теплового акумулятора. До недоліків слід віднести також низьку теплоємність води, яка компенсується великим обсягом місткості акумулятора та призводить до високої вартості, труднощів монтажу та експлуатації цих систем, а також до зростання непродуктивних теплових втрат.

Другий тип апаратів даної класифікації – акумулятори теплоти фазового переходу, якій використовують приховану теплоту фазового переходу зворотного процесу: плавлення/затвердіння. В якості ТАМ для цих пристроїв застосовуються матеріали зі змінним фазовим станом в заданому діапазоні температур експлуатації системи (PCM), такі як парафіни й гідрати солей. Питома теплоємність PCM дозволяє акумулювати значно більше теплоти, ніж в ємнісних теплових акумуляторах. До недоліків даного типу апаратів слід віднести їх високу вартість і складність конструкції, можливість процесу зарядки/розрядки в дуже вузькому діапазоні температур, корозійну активність більшості PCM, в першу чергу гідратів солей. У зв'язку з тим, що щільності та теплопровідності PCM у твердому і рідкому стані відрізняються, на практиці застосовуються схеми з проміжним теплоносієм (вода), які здійснюють теплопередачу енергії від джерела до ТАМ при зарядці та від ТАМ до споживача при розрядці. Конструкції таких апаратів можуть бути різними.

Акумуляція теплової енергії в акумуляторах з твердим теплоакумулятивним матеріалом здійснюється непрямою акумуляцією шляхом теплоємності ТАМ, що знаходиться у твердій фазі. Цей тип отримав широке поширення в країнах Західної Європи й США [5].

Термохімічний спосіб акумулювання теплової енергії заснований на використанні оборотних хімічних реакцій і дозволяє запасати теплової енергії на одиницю маси більше, ніж в перших двох випадках. Але він більш складний в реалізації та в конструкціях, що застосовуються в системах опалення і ГВП, у зв'язку з чим сьогодні практично не застосовується.

За інтервалом робочих температур теплові акумулятори систем опалення та ГВП можна розділити на три групи: низькотемпературні ( $t = 35 \dots 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ); середньотемпературні ( $t = 200 \dots 500 \text{ }^\circ\text{C}$ ) та високотемпературні ( $t > 500 \text{ }^\circ\text{C}$ ). У системах центрального і автономного опалення широке застосування знайшли низькотемпературні теплові акумулятори. Це обумовлено тим, що діапазони робочих температур, які в них використовуються, розраховані на температуру теплоносія  $t < 115 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Середньо- і високотемпературні теплові акумулятори поки не знайшли широкого застосування. Джерелами теплоти для середньотемпературних теплових акумуляторів можуть бути енергетичні котли, печі та системи утилізації тепла технологічних процесів, а для високотемпературних, наприклад, металургійні печі тощо.

За часом експлуатації теплові акумулятори поділяють на: короткострокової дії, в яких зарядка/розрядка не перевищує тривалості однієї доби, та довгострокової дії, де тривалість процесу зарядки й розрядки перевищує тривалість доби.

Як правило, теплові акумулятори для систем центрального та автономного опалення розраховуються на короткострокову дію, а системи підтримки температури в будівлях, які не експлуатуються, на тижневий цикл.

#### Методи розрахунку МТА

Слід зазначити, що конструкція акумулятора та ТАМ, який в ній використовується, впливають на розрахунки

МТА. Система зберігання енергії може бути описана з точки зору наступних характеристик:

- місткість визначає енергію, що зберігається в системі, і залежить від процесу зберігання, середовища та розміру системи;
- потужність визначає, як швидко енергія, що зберігається в системі, може бути розряджена (і заряджена);
- ефективність – це співвідношення енергії, що надається користувачеві, до енергії, необхідної для зарядки системи зберігання. Вона враховує втрату енергії в період зберігання і циклів зарядки / розрядки.
- період зберігання визначає, як довго зберігається енергія, і триває від кількох годин до кількох місяців (тобто години, дні, тижні й місяці для сезонного зберігання);
- тривалість зарядки та розрядки визначає, скільки часу потрібно для роботи системи;
- вартість відноситься або до потужності (капітал / кВт-год), або до потужності (кВт / кВт) системи зберігання і залежить від капітальних і експлуатаційних витрат на устаткування для зберігання і його термін служби (тобто кількості циклів).

Для ретельного аналізу кількості акумульованої теплоти та часу, необхідного для її охолодження, потрібно провести розрахунки, які враховують фізичні й термодинамічні особливості ТАМ. Розглянемо їх.

Класичний підхід до проведення розрахунків за тепловим навантаженням проводиться за формулою:

$$Q = G \cdot C_p \cdot \Delta T. \quad (1)$$

Більш інформативним є розрахунок за ентальпією, який проводиться за формулою:

$$Q = G \cdot (h_1 - h_2). \quad (2)$$

Дані методи є відносно простими, але існує велика ймовірність отримати результат з великою похибкою. Тому вони можуть бути використані тільки для проведення інженерних розрахунків.

Для МТА, які використовують у якості ТАМ воду та водні розчини, необхідно враховувати обмеження температурного діапазону, який, в свою чергу, обмежений температурою кипіння. Вода з її високим питомим теплом є найпоширенішим матеріалом для систем зберігання з  $t < 100$  °С [6].

Органічні рідини та високомолекулярні олії ефективні при більш високих температурах ( $t \leq 320$ °С) без підвищення тиску, однак вони мають недолік у низькій питомій теплоємності (2,3 кДж/кг.К проти 4,19 кДж/кг.К для води). Крім того, їм притаманні полімеризація та утворення летючих продуктів. Переваги та недоліки води як накопичувального середовища наведені в роботі [7].

Фундаментальним рівнянням для розрахунку кількості накопиченої теплоти є:

$$Q = m C_p \Delta T = \rho V C_p \Delta T. \quad (3)$$

Окрім того, можна розглядати температуру водного ТАМ як функцію часу [8].

$$T_s = t_i + \Delta \tau / m C_p [Q_u - Q_L - U_s A_s (t_f - t_a)]. \quad (4)$$

Втрати теплоти прямо пропорційні різниці температур між МТА та навколишнім середовищем. Важливим чинником є швидкість, з якою може охолоджувався МТА, яка є функцією теплової дифузії. Окрім того, теплопровідність ТАМ значно впливає на час зарядки та розрядки та норму зберігання. Ця залежність виражається наступним рівнянням:

$$\lambda = \rho C_p a. \quad (5)$$

В розглянутому нами випадку відомим підходом до розв'язання даної проблеми є розрахунок за диференціальним рівнянням охолодження циліндра, який проводився наступним чином:

- за Фур'є, записуємо загальне рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left( t \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (6)$$

- для тіла з обмеженими геометричними параметрами, у розглядаємому нами випадку циліндра, це рівняння набуває вигляд:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left[ \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \left( \frac{1}{r} \right) \frac{\partial t}{\partial r} \right]. \quad (7)$$

Недоліком даного методу є його громіздкість та необхідність чіткого розуміння важливості усіх критеріїв, за якими проводиться пошук рішень для отримання вірогідного результату.

Приховане зберігання теплоти базується на поглинанні або виділенні теплоти: при зберіганні матеріал зазнає фазової зміни від твердого до рідкого або від рідкого до газового, або навпаки. Ця система теплового накопичення тепла передбачає накопичення енергії у зміні фаз матеріалу (PCM). Великою перевагою даної системи є висока щільність зберігання енергії та компактніші розміри МТА. Це призводить до меншої площі та товщини ізоляції, а також до менших розмірів і ваги МТА. Ще одна важлива особливість МТА з PCM полягає в тому, що ці накопичувачі можуть працювати в ізотермічних умовах.

Порівняння МТА із рідинним ТАМ та із PCM показує, що використання PCM дає можливість отримати у 5...10 разів більшу щільність зберігання. Системи із PCM можна використовувати в широких межах діапазону температур [7]. Оскільки PCM не можуть використовуватися як носій теплоти, вони використовуються з проміжними теплообмінниками для передачі енергії від джерела до МТА при його завантаженні та від МТА до споживача при розвантаженні. Місткість накопичувача системи МТА із середовищем PCM задається [9]:

$$Q = m [C_{sp}(T_m - T_i) + a_m \Delta h_m + C_{lp} (T_f - T_m)]. \quad (8)$$

При фазовому переході ентальпія PCM, зазвичай, набагато вища (у 100...200 разів), ніж теплота водних розчинів. Отже, ці сховища теплоти мають значно більшу щільність зберігання, ніж сховища першого типу [10].

Взагалі, задачі теплового і конструктивного розрахунку акумуляторів теплоти фазового переходу пов'язані з рішенням задачі Стефана [11]. Особливої уваги, при цьому, заслуговує варіаційний метод, за допомогою якого можна отримати математичні формули, провести аналіз граничних умов та застосовувати прямі методи обчислювання. Фазові переходи моделюються на основі загального припущення, що загальну структуру PCM можна наблизити двома фазами – твердою та рідкою. Для PCM технічного класу зміна фаз відбувається не при точній температурі, а в певному діапазоні температур. Це означає, що передбачається наступне: дві фази співіснують під час переходу у тверду фазу та у рідку фазу і дозволяють наблизити загальну структуру PCM за одним характерним параметром  $\psi \in [0,1]$ , що позначає

фазову частку (рідка маса), а  $m_p$  і  $m_m$  – маси твердої та рідкої фаз відповідно.

$$\Psi = m_m / (m_p + m_m). \quad (9)$$

У діапазоні температур фазового переходу теплофізичні властивості PCM моделюються за допомогою лінійної суперпозиції вкладів із властивостей чистої твердої та чистої рідинної PCM. Ця суперпозиція дає так звані ефективні властивості PCM. Отже, кількість теплоти, накопиченої PCM, залежить від властивостей матеріалу з ефектом фазового переходу і маси матеріалу:

$$Q = \Delta H_f \cdot m. \quad (10)$$

З цього рівняння випливає, що максимальна кількість теплоти може бути отримана як шляхом збільшення теплового ефекту, так і шляхом збільшення маси акумулятивного матеріалу.

#### **Конструкторський розрахунок теплового акумулятора**

Для вибору конструкції теплового акумулятора необхідно виконати розрахунки, які дозволять визначити його габарити, максимально можливу кількість запасованої теплоти, а також обґрунтувати вибір і необхідний обсяг ТАМ. Величина теплової енергії, яка надходить споживачеві, залежить від джерела теплоти і параметрів теплоносія нагрівального контуру. Залежно від типу джерела теплоти використовуються різні алгоритми розрахунку. Слід враховувати, що використання теплових акумуляторів типу МТА не завжди може покрити необхідне споживачеві теплове навантаження.

З речовин, придатних для теплової акумуляції, вибирається та, яка має температуру фазового переходу близьку до робочої. Без виконання цієї умови неможливо забезпечити необхідні параметри ТАМ. Серед речовин, які відповідають цій умові, вибирається така, яка найбільш повно відповідає вимогам до МТА. При цьому потрібно віддавати перевагу речовині, яка забезпечує найбільшу надійність функціонування МТА, в тому числі теплоакумуляційної здатності, що виражається величиною питомої ентальпії. З цієї точки зору речовина має, в першу чергу, володіти стійкістю фізико-хімічних властивостей до термоциклування, бути корозійностійкою і стійкою до переохолодження при кристалізації [12]

Розміри місткості МТА визначаються максимально необхідним запасом теплової енергії. Необхідний запас вибирається, виходячи з прийнятої стратегії конструювання, а саме: забезпечення надійності, можливості компенсації непередбачених перебоїв в надходженні енергії, наявності або плануванні резервних джерел, обмеження по вартості тощо, а також враховувати особливості конкретного проекту. Облік всіх факторів дасть можливість вибрати прийнятний коефіцієнт запасу (0,7...0,8) по тепловій енергії. Вибір занадто великого запасу призведе до зростання вартості МТА. З огляду на це кількість ТАМ в МТА знаходиться за формулою:

$$m = k_Q \cdot Q_L / Q_{\phi}. \quad (11)$$

Для теплоемнісного МТА кількість ТАМ визначається за формулою:

$$m = k_Q \cdot Q_L / (C_p \rho \Delta T). \quad (12)$$

Де  $\Delta T$  – підвищення температури ТАМ при зарядці.

Для забезпечення теплопередачі в МТА необхідно створити перепад температур між теплоносієм і поверхнею фазового переходу. Ця величина може бути незначною, проте призводить до неізотермічності РСМ. Крім того, в ряді випадків після завершення фазового переходу РСМ він працює в режимі теплоемнісного МТА, що призводить до деякого збільшення запасеної теплоти. Однак, у багатьох випадках цій додаток вносить не надто істотний внесок, хоча при необхідності він може бути врахований в тепловому балансі. Величина коефіцієнта запасу  $k_Q$  вибирається, виходячи з умов нерегулярності і нерівномірності надходження теплоти з урахуванням цільового призначення МТА.

#### **Визначення розмірів МТА**

У загальному випадку обсяг ТАМ дорівнює різниці, отриманої відніманням від загального обсягу огорожувальної конструкції об'ємів компенсаційної порожнини та теплообмінної частини МТА. Виходячи з особливостей розміщення теплообмінної частини, вибираються розміри його робочої частини й діаметру підвідного і відвідного патрубків. Площа поперечного перерізу акумулятора повинна вибиратися з урахуванням зменшеної швидкості руху теплоносія і мінімальних гідродинамічних втрат. Для забезпечення інтенсивності теплообміну, як при зарядці, так і при розрядці МТА, вибираються інші відсутні параметри, наприклад, діаметр місткості, витрата теплоносія та інше. Перевірча мето-

дика базується на основі рівняння теплового балансу з використанням критеріальних залежностей теплообміну і гідродинаміки теплоносія.

Також можуть бути проведені варіантні розрахунки і вибір іншого ТАМ та розмірів МТА з метою забезпечення гідродинамічних втрат. Такий підхід дозволить провести часткову оптимізацію МТА – зменшення вартості ТАМ і зниження гідродинамічних втрат. У конкретних системах мають місце свої особливості розрахунку, які виражаються у використанні тих чи інших заданих параметрів.

#### **Результати дослідження**

В даній роботі обмежимося лише прикладом розрахунку теплового акумулятора ємнісного типу з водним розчином у якості ТАМ. Для подальших розрахунків приймаємо температуру зарядки теплового акумулятора  $t = 95^\circ\text{C}$ , а робочу температуру розрядки акумулятора  $-t = 50^\circ\text{C}$ . Слід зазначити, що для підтримки робочої температури ємнісного акумулятора на рівні  $t = 95^\circ\text{C}$ , при його зарядці, температура теплоносія нагрівального контуру повинна становити  $t = 110^\circ\text{C}$ . Результати розрахунків наведені на рис.2, 3 та 4.

Як можна бачити, час заряджання МТА теплотою напругу залежить від потужності джерела та об'єму ТАМ. Таким чином, потужність джерела теплоти та температура теплоносія напругу впливають на швидкість процесу заряджання МТА. Розрахунки проведено в діапазоні підвищення температури від  $40$  до  $90^\circ\text{C}$ . Час, потрібний для зарядження тепломістких МТА з водним розчином у якості ТАМ, складає від  $1,5$  до  $3$  годин для МТА об'ємом  $2,5 \text{ м}^3$ , від  $3$  до  $6$  годин для МТА об'ємом  $5,0 \text{ м}^3$  та від  $6$  до  $12$  годин для МТА об'ємом  $10 \text{ м}^3$ . Отже, для зарядження  $1,0 \text{ м}^3$  ТАМ буде потрібно від  $100$  до  $200 \text{ кВт}$  теплоти на годину.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що час розряджання напругу залежить від потреб споживача та місткості МТА. Розрахунки проведено в діапазоні зменшення температури ТАМ із  $90$  до  $40^\circ\text{C}$ . Середній час охолодження МТА складає  $1,5$  години для МТА об'ємом  $2,5 \text{ м}^3$ ,  $2,5$  години для МТА об'ємом  $5,0 \text{ м}^3$  та близько  $6$  годин для МТА об'ємом  $10,0 \text{ м}^3$ . Виходячи з економічної доцільності найкращі показники мають МТА об'ємом ТАМ –  $10,0 \text{ м}^3$  та вище. Це необхідно враховувати при виборі конструкції та при розрахунках потужності акумулятора.

Теплові втрати через стінку корпусу МТА залежать від якості теплоізоляційного матеріалу, об'єму та температури ТАМ. Розрахунки проведено в діапазоні зниження температури ТАМ від  $90$  до  $40^\circ\text{C}$  у неробочому стані

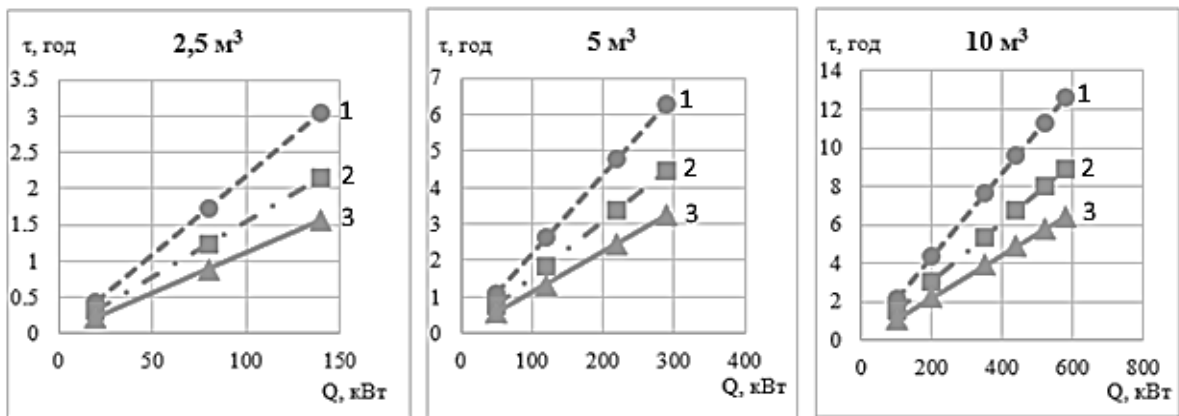


Рис. 2. Зарядка теплового мобільного акумулятора, де: 1 – мінімальна, 2 – середня, 3 – максимальна потужність джерела теплоти.

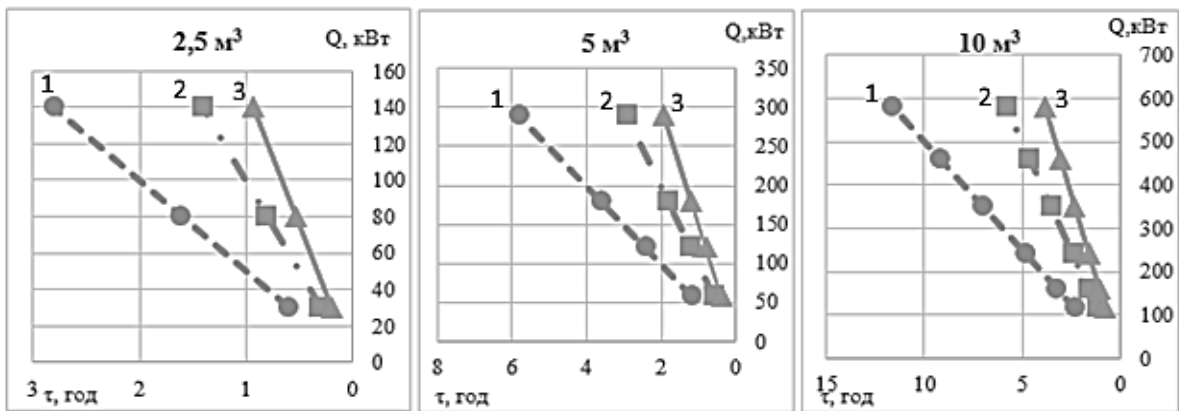


Рис. 3. Розрядка теплового мобільного акумулятора, де: 1 – мінімальна, 2 – середня, 3 – максимальна опалювальна площа.

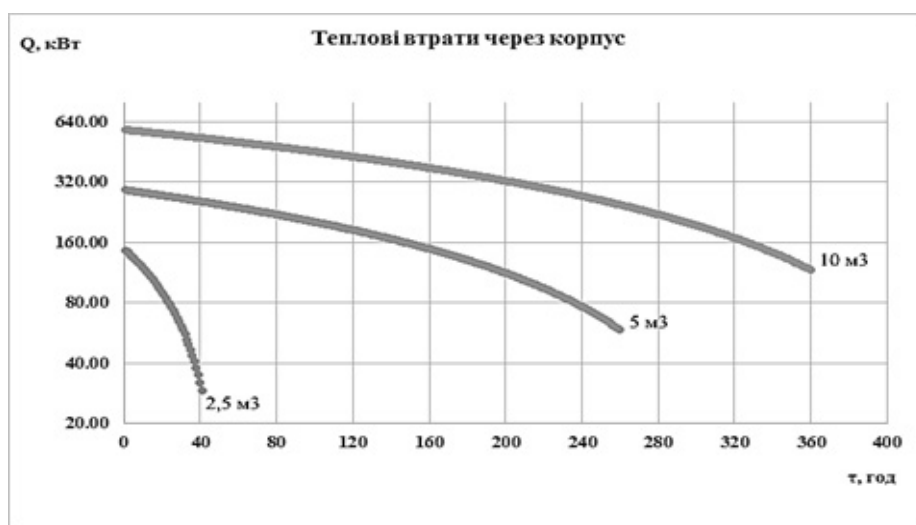


Рис. 4. Теплові втрати крізь огорожувальну конструкцію акумулятора.

(покої) МТА (мається на увазі – без відбору теплоти). За модель МТА прийняті габаритні розміри стандартного ємнісного бака-акумулятора об'ємом 2500 літрів, циліндричної форми, з шаром ізоляції з поліуретану товщиною 100 мм. Втрати теплоти складають 4,0 кВт.год для МТА об'ємом 2,5 м<sup>3</sup>, 1,15 кВт.год для МТА об'ємом 5,0 м<sup>3</sup> та 0,64 кВт.год МТА об'ємом 10,0 м<sup>3</sup>. Тому акумулятори підвищеної місткості за цим показником найкращі. Проведені дослідження підтвердили, що транспортування теплової енергії економічно та енергетично доцільніше з використанням МТА місткістю від 10,0 м<sup>3</sup> та вище. Акумулятори меншої місткості рекомендується використовувати переважно для стаціонарного розміщення.

### Висновки

Розвиток систем дискретного теплопостачання докорінно змінює стратегію енергопостачання. Основним елементом системи ДСО є мобільний акумулятор теплоти. Відмінністю мобільних теплоакумуляторів від широко розповсюджених стаціонарних є наявність кумуляційного блоку, вбудованого блокового теплового пункту, який поділяє контури споживача й акумулятора, а також вузла приєднання МТА до джерел теплоти й споживача. МТА розташований в стандартному контейнері, призначеному для транспортування будь-яким видом транспорту. Мобільні теплові акумулятори можуть бути легко інтегровані в інноваційний концепт SmartGrid системи теплопостачання.

Для накопичення теплової енергії в мобільних акумуляторах найкраще підходить використання прямої та прихованої теплоти. Порівняння МТА із рідинним ТАМ та ТАМ із РСМ показує, що використання РСМ дає можливість отримати у 5...10 разів більшу щільність зберігання теплоти. Однак, використання РСМ ускладнює і здорочує конструкцію МТА. Конструкція рідинних теплових акумуляторів краща за багатьма показниками. Методика розрахунку МТА змінюється та залежить від обраного типу теплоакумулятивного матеріалу, агрегатного стану ТАМ та його об'єму, обраного класу акумулятора, його габаритних розмірів, конструкції кумуляційного блока накопичення теплової енергії, технології передачі та відбору теплоти, конструкції блока теплового пункту, площі огорожувальної конструкції та якості теплової ізоляції.

Результати дослідження показали, що використання МТА об'ємом менше ніж 10,0 м<sup>3</sup>, що відповідає транспортуванню близько 0,5 МВт.год корисної теплоти, не є доцільним. Сформульовані в результаті дослідження основні показники тривалості роботи МТА дозволяють

провести оптимізацію конструкції мобільних теплових акумуляторів. Наочно результат представлений на діаграмах та обґрунтовано оптимальний об'єм теплових акумуляторів для проведення подальшої роботи по розвитку проєкту щодо їх впровадження.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Демченко В.Г., Трубочев А.С., Гронь С.С., Оцінка впровадження дискретної системи опалення населеного пункту експрес-методом 3е, Теплофізика та теплоенергетика, 2019, т.41, №1
2. Левенберг, В. А. Аккумуляирование тепла / В. А. Левенберг, М. П. Ткач, В. А. Гольстрем. - Киев: Техника, 1991. -112 с.
3. Sarbu I. [A comprehensive review of thermal energy storage], [Sustainability], 2018, 191 p.
4. Schossig P. Dötsch Dr. Ch., Drück H., Göttische Dr. J., Huenges Dr. Er., Kabus Dr. Fr., Tamme Dr. R. [Heat storage for the domestic energy supply], [Themen], 2005, 125 p.
5. Stiles L., Gitchell A., Hulse D., [Underground Thermal Energy Storage in the United States], [International Conference on Thermal Energy Storage], Warsaw, 2003 - P. 651-656
6. Dincer I. [On thermal energy storage systems and applications in buildings], [Energy and Buildings], 2002, vol.34(4) p. 377-388
7. Shah YT, editor. ThermalEnergy: Sources, Recovery, and Applications. BocaRaton, FL, USA: CRC Press; 2018 p. 235
8. Sarbu I. A comprehensive review of thermal energy storage. Sustainability. 2018;10(2):191
9. Sharma A, Tyagi VV, Chen CR, Buddhi D. [Review on thermal energy storage with phase change materials and applications], [Renewable and Sustainable Energy Reviews], 2009, vol.13(2), p. 318-345
10. Tian Y, Zhao CY. [A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications] [Applied Energy], 2013, vol. 104, p. 538-553
11. Муїрманов А.М. Задача Стефана. Новосибирск: Наука. Сиб. Отделение, 1986. 240с.
12. Демченко В.Г., Фалько В.Ю., Експериментальне дослідження термічної стійкості речовин для зберігання теплової енергії, Теплофізика та теплоенергетика, 2019, Т. 41, №2



## CONSTRUCTION CALCULATION OF MOBILE HEAT STORAGE

Demchenko V.G., Gron SS, Pogorelova N.D..

*Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhehuabova, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2019.5>

Modern thermal power is built based on three components: generation, transmission, and distribution of thermal energy. In this industry, another fourth element which was previously virtually absent is energy storage. Energy storage completely change our usual heat supply system. Heat storage is a serious factor in saving energy and improving environmental safety. The introduction of autonomous high and low potential heat storage systems is a real opportunity for the development of Intelligence Smart Grid heating systems. Therefore, the study of mobile heat storage batteries and the choice of methods for their design calculation and performance is an important task of modern science and technology. For this purpose, a study was conducted to determine the charging and discharge time of a mobile heat accumulator, depending on the type, volume, and temperature of the heat storage material. Types of thermal energy accumulation, classes of thermal accumulators, range of operating temperatures for a thermal accumulator were analyzed, design features of accumulators, operating time and methods of calculation of design parameters were considered. It is concluded that the method of calculation of MTA depends on the selected type of heat storage material. Although, phase transition materials have a higher heat storage density than liquid solutions, the design of liquid thermal batteries is much more attractive regarding technological, technical, and economic parameters. As a result of the study, the dependence of the MTA charging rate on the heat source power was obtained, the required amount of heat was determined, the average battery cooling time from the volume of the heat storage material, and the heat losses through the MTA body was analyzed. The results obtained must be taken into account when choosing the design and capacity of the battery.

References 12, figure 4.

**Key words:** heat supply system, mobile storage, heat, method, calculation.

1. Demchenko V.G., Trubachev A.S., Hron S.S, [Evaluation of the introduction of a discrete heating system of the settlement by the express method 3e], *Prom. Teplotekhnika* [Industrial heat engineering], 2019, vol.41. No. 1 (Ukr.)
2. Livenderg V. A., Tkach M.P., Golsterm V.A., [Termal stogare], [Technics], 1991, 112 p. (Rus.)
3. Sarbu I. [A comprehensive review of thermal energy storage], [Sustainability], 2018, 191 p.
4. Schossig P. Dötsch Dr. Ch., Drück H., Göttsche Dr. J., Huenges Dr. Er., Kabus Dr. Fr., Tamme Dr. R. [Heat storage for the domestic energy supply], [Themen], 2005, 125 p.
5. Stiles L., Gitchell A., Hulse D., [Underground Thermal Energy Storage in the United States], [International Conference on Thermal Energy Storage], Warsaw, 2003 - P. 651-656
6. Dincer I. [On thermal energy storage systems and applications in buildings], [Energy and Buildings], 2002, vol.34(4) p. 377-388
7. Shah Y.T., [Thermal Energy: Sources, Recovery, and Applications], [Boca Raton], FL, USA: CRC Press; 2018, p. 235
8. Sarbu I., [A comprehensive review of thermal energy storage], [Sustainability], 2018, vol.10(2), p.191
9. Sharma A, Tyagi VV, Chen CR, Buddhi D. [Review on thermal energy storage with phase change materials and applications], [Renewable and Sustainable Energy Reviews], 2009, vol.13(2), p. 318-345
10. Tian Y, Zhao CY. [A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications] [Applied Energy], 2013, vol. 104, p. 538-553
11. Myrmanov A.M., [Zadacha Stefan's], [Science. Sib. Branch], Novosibirsk, 1986. 240 p. (Rus.)
12. Demchenko V.G., Falko V.Y., [Experimental study of thermal stability of thermal energy storage substances], *Prom. Teplotekhnika* [Industrial heat engineering], 2019, vol.41. No. 2, (Ukr.)

*Отримано 30.09.2019*

*Received 30.09.2019*