

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ІЗ СЕЗОННИМИ ТЕПЛОВИМИ АКУМУЛЯТОРАМИ З КРИСТАЛІЗАЦІЄЮ ТЕПЛОНОСІЯ

Отримано 19 жовт. 2024 р.; рекомендовано до публікації 27 лист. 2024 р.
Доступно онлайн 11 груд. 2024 р.

Попович О. М.¹, Головань І. В.²

Автор для кореспонденції: Попович Олександр,
e-mail: popovich1955@ukr.net

¹ д-р техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-9238-5782>

² канд. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-5250-6981>

Розроблено комплексну математичну модель системи теплопостачання, яка використовує енергію сезонного теплового акумулятора з можливістю кристалізації теплоносія.

Модель враховує взаємний вплив електромеханічних і теплотехнічних складових системи та призначена для визначення ефективного співвідношення конструктивних і режимних параметрів системи з тепловим акумулятором з кристалізацією і без неї. Як критерій енергетичної ефективності варіанта системи застосовано зниження споживання енергії з електричної мережі протягом опалювального сезону порівняно з таким споживанням системи з тепловим насосом, який бере енергію з атмосфери. Відношення вартостей економії електричної енергії й теплової ізоляції сезонного теплового акумулятора використано для оцінки ефективності капітальних вкладень. Досліджено варіанти системи з сезонними тепловими акумуляторами: з водою у рідкому стані за зміни діапазону її робочих температур; з урахуванням тепла кристалізації всього об'єму води або його половини. Дослідження виконано для варіантів зміни потрібної енергії на опалення у 10 і 100 разів. Визначено закономірності зміни потужностей і температур протягом опалювального сезону, інтегральні величини критеріїв ефективності. Показано, що застосування теплового акумулятора з водою у рідкому стані може збільшити енергетичну ефективність системи до двох разів. Визначено вплив використання теплоти кристалізації всього об'єму води на зміну потрібного об'єму теплового акумулятора, величини показників енергетичної та ресурсної ефективності. Варіант з кристалізацією програє варіанту з водою у рідкому стані за показниками енергетичної та ресурсної ефективності, але дозволяє зменшити потрібну величину акумулятора. Для варіанта з кристалізацією половини об'єму води досліджено синергетичний ефект отримання питної води, очищеної розморожуванням, показано можливість покращення при цьому показників ресурсної ефективності у 2,5 ... 8,5 раз, що може знижувати термін окупності витрат на теплову ізоляцію до кількох місяців.

Ключові слова: сезонний тепловий акумулятор з кристалізацією води, комплексна математична модель, критерії енергетичної та ресурсної ефективності.

STUDY OF HEAT AND POWER SYSTEMS WITH SEASONAL HEAT ACCUMULATORS WITH CRYSTALLISATION OF THE COOLANT

Received Oct. 19, 2024; accepted Nov. 27, 2024
Available online Dec. 11, 2024

Popovych O.¹, Golovan I.²

Author for correspondence: Popovych Olexandr,
e-mail: e-mail: popovich1955@ukr.net

¹ Dr. of Tech.Science
<https://orcid.org/0000-0002-9238-5782>

² Cand. of Tech.Science
<https://orcid.org/0000-0002-5250-6981>

A comprehensive mathematical model of a heat supply system that uses the energy of a seasonal heat accumulator with the possibility of crystallization of the heat carrier has been developed. The model takes into account the mutual influence of the electromechanical and thermal-technical

^{1, 2} Institute of Electrodynamics, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine; Institute of renewable energy, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

components of the system and is intended to determine the effective ratio of design and operating parameters of the system with a thermal accumulator with and without crystallization. As a criterion for the energy efficiency of the system variant, we used a reduction in energy consumption from the electrical grid during the heating season, compared to that of a system with a heat pump that takes energy from the atmosphere. The ratio of the cost of saving electricity and thermal insulation of the seasonal heat accumulator is used to assess the efficiency of capital investments. Variants of the system with seasonal thermal accumulators are investigated: with water in a liquid state when the range of its operating temperatures changes; taking into account the heat of crystallization of the entire volume of water or its half. The study was performed for variants of changing the required energy for heating by a factor of 10 and 100. The regularities of power and temperature changes during the heating season and the integral values of efficiency criteria are determined. It is shown that the use of a thermal accumulator with water in a liquid state can increase the energy efficiency of the system by up to two times. The influence of using the heat of crystallization of the entire volume of water on the change in the required volume of the heat accumulator, the values of energy and resource efficiency indicators is determined. The option with crystallization is inferior to the option with water in a liquid state in terms of energy and resource efficiency, but prevails in terms of the required size of the accumulator. For the variant with the crystallization of half the volume of water, the synergistic effect of obtaining drinking water purified by defrosting was investigated, showing the possibility of improving the resource efficiency indicators by 2.5...8.5 times, which can reduce the payback period for thermal insulation costs by up to several months.

Keywords: seasonal thermal accumulator with water crystallization, complex mathematical model, energy and resource efficiency criteria.

Перелік використаних позначень та скорочень

ТА – тепловий акумулятор
ТАК – тепловий акумулятор з кристалізацією теплоносія
ТН – тепловий насос
ККД – коефіцієнт корисної дії
ЕМС – електромеханічна система

АД – асинхронний двигун
W – енергія
 dW/dt – потужність
T – температура
t – час
A – теплова провідність

Вступ. Ощадливе користування енергетичними ресурсами підвищує ефективність суспільства в усіх галузях його діяльності, сприяє мінімізації шкідливих впливів на довкілля. Одним із чинників, що негативно впливають на енергоефективність, є неузгодженість графіків споживання і генерування енергії, зокрема в системах з відновлюваною генерацією [1, 2]. Для ефективного узгодження цих графіків застосовують різні засоби акумулювання енергії. Значною мірою таку неузгодженість викликають сезонні коливання, які визначають режими роботи систем опалення, кондиціювання, освітлення та інших. Для компенсації сезонних коливань в енергосистемах застосовують установки, які можуть забезпечувати значну щільність накопичення енергії й ефективність її збереження протягом тривалого часу, наприклад на основі водню [3], або теплові акумулятори (ТА) [4–7]. Застосування ТА особливо ефективне для споживачів теплової енергії.

Наявність різноманітних способів акумулювання теплової енергії спонукає до створення та використання інструментів для проектування таких систем. Їхнє завдання полягає у визначенні структури системи (принципи роботи, склад і зв'язки обладнання), а також оптимальних конструктивних параметрів, виходячи з потреб споживача щодо потужності та режиму роботи.

Для ефективного проєктування необхідно використовувати комплексний підхід [7], який передбачає:

1. Оцінку ефективності системи за кінцевим результатом.
2. Урахування витрат енергетичних та матеріальних ресурсів.
3. Аналіз процесів енергоперетворення та енергообміну між компонентами системи з урахуванням їх взаємного впливу.
4. Оцінку процесів на основі циклу аналізу енергоспоживання та зміни потужностей протягом його часу.
5. Використання комплексних математичних моделей і критеріїв [8].

Комплексні математичні моделі [7–9] забезпечують аналіз процесів у досліджуваній системі з визначенням вихідної інформації для розрахунку величини критерію ефективності за кінцевим результатом корисної дії системи. Для цього визначаються параметри робочих режимів складових системи з урахуванням їх взаємного впливу протягом циклу роботи, виконується їх інтегральна оцінка. Продуктивним середовищем для комплексного дослідження ефективності є системи імітаційного моделювання, наприклад МАТЛАБ. Завдяки наявності інструментарію дослідження динамічних режимів, розвинутої системи математичних процедур і бібліотечних блоків різних технічних об'єктів такі засоби дослідження надають можливість максимально використати готові

програми щодо відомих технічних об'єктів і зосередитись на інноваційній складовій дослідження.

Математичні і програмні засоби комплексного дослідження енергетичних систем з сезонними ТА розроблено у [7], де забезпечується аналіз системи теплопостачання об'єкта опалення з використанням сезонних ТА з рідким теплоносієм [10]. Передбачено два режими тепловідбору з ТА: за допомогою теплообмінника з системою опалення або теплового насоса (ТН). Це важливо для порівняльного дослідження систем ТА з високою та низькою температурами теплоносія [11, 12]. Момент переключення режимів визначається під час зіставлення температур: змінної у ТА і потрібної для системи опалення. Вихідною інформацією для дослідження [7] є питома тепла провідність оболонки об'єкта опалення (на одиницю сезонної енергії теплопостачання), температурні режими, ККД ТА, максимальні потужності асинхронного двигуна (АД) приводу компресора ТН і системи опалення. За цією інформацією і заданою енергією для опалення протягом сезону визначається потрібний запас енергії ТА і його розміри, конструктивні параметри. Модель [7] призначено для досліджень у діапазоні потужностей, які забезпечуються серійними АД компресорного агрегату ТН. Енергетичні характеристики цих АД задано поліноміальними залежностями ККД у функції потужності, відповідно до довідникової інформації про АД серії 4А [13], а також з урахуванням зміни ККД АД із завантаженням. Оскільки математична модель є суттєво нелінійною, рішення знаходиться за серією ітераційних розрахунків. На кожному етапі моделювання визначаються часові залежності зміни температур і потужностей складових системи теплопостачання протягом опалювального сезону, за інтегральними величинами енергій розраховуються циклові ККД складових системи, величини показників її ефективності. Уточнені величини ККД ТА, максимумів потужностей використовуються при наступній ітерації до досягнення збіжності. Інформація про величини показників ефективності системи забезпечує визначення оптимальних величин конструктивних і режимних параметрів ТА і складових системи опалення за вибраним критерієм.

Ефективність системи теплозабезпечення залежить як від обсягів споживання енергії, так і від матеріалів. Для підвищення ресурсоефективності системи доцільне зниження обсягів використання конструкційних матеріалів, що потребує збільшення щільності енергії у ТА. Такий ефект можна отримати у ТА з використанням теплоти кристалізації теплоносія [14–17], (наприклад для води, вона майже у 80 разів перевищує теплоємність). Тобто обсяг енергії в одиниці об'єму можна практично подвоїти, але при цьому змінюються умови роботи ТН і його енергоефективність. Визначення умов ефективного функціонування систем теплопостачання з тепловими акумуляторами з кристалізацією (ТАК) теплоносія потребує комплексного аналізу.

Мета роботи полягає в дослідженні конструктивних параметрів сезонних теплових акумуляторів із кристалі-

зацією теплоносія й ефективності структур систем теплопостачання на їх основі засобами комплексного проектного синтезу.

Для порівняння варіантів систем з сезонним акумулюванням тепла пропонується використовувати **критерій ефективності**, який визначається за однакового обсягу корисної дії кожної системи. Базовим варіантом є система з тепловим насосом (ТН), що бере тепло з повітря. Критерій ефективності кожного іншого варіанта визначаємо за відношенням зменшення витрат на електроенергію, відносно базового варіанта (в чисельнику), до величини капітальних вкладень на теплоізоляцію ТА, наприклад пінопласту (в знаменнику). Цей підхід дозволяє зрозуміти загальні тенденції зміни ефективності таких систем і розробити рекомендації для їх використання. Для уточненого аналізу окремих варіантів потрібно додатково враховувати вартість ТН, будівельних матеріалів і витрат на спорудження ТА.

Отже, будемо досліджувати такі варіанти:

1. ТН з сезонним ТА з водою в рідкому стані
2. ТН без ТА з тепловідбором з атмосфери
3. ТН з сезонним ТА з водою в рідкому і кристалічному станах

Щоб порівняти енергоефективність варіантів 1 і 2, а також 2 і 3, використовуємо коефіцієнти енергоефективності (k_{eef}). Вони показують, скільки теплової енергії (W_u) протягом опалювального сезону знадобиться для підтримки потрібної температури в приміщенні, порівняно з тим, скільки електроенергії споживає компресор теплового насоса. Ці коефіцієнти розраховуються для різних джерел низькопотенційного тепла: з атмосфери, з теплоаккумулятора з водою в рідкому стані або з водою в рідкому стані та льодом (енергія з мережі з використанням цих джерел, відповідно, позначена W_{mhp2} , W_{mhp} , W_{mhpB}):

$$\begin{aligned} k_{eef1} &= W_u / W_{mhp}; \\ k_{eef2} &= W_u / W_{mhp2}; \\ k_{eef3} &= W_u / W_{mhpB}, \end{aligned} \quad (1)$$

Енергетична доцільність варіанта визначається тим, наскільки зменшується споживання електроенергії з мережі в опалювальний сезон завдяки використанню ТА. При цьому також враховується енергія, необхідна для зарядки ТА поза опалювальним періодом:

$$\begin{aligned} \Delta W_{e21} &= W_u \left(\frac{1}{k_{eef2}} - \frac{1}{k_{eef1}} - \frac{k_{1ha}}{\eta_{ha}} \right); \\ \Delta W_{e23} &= W_u \left(\frac{1}{k_{eef2}} - \frac{1}{k_{eef3}} - \frac{k_{1ha}}{\eta_{ha}} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

де k_{1ha} – коефіцієнт використання енергії з електричної мережі в процесі зарядки ТА, який дорівнює нулю в разі використання суто відновлюваних джерел (наприклад,

перетворення надлишків енергії сонячної установки на тепло ТА); $\eta_{ha} = W_u / W_1$ – коефіцієнт використання енергії ТА як співвідношення енергії, направленої споживачу, і енергії на вході ТА.

Оцінку ефективності капітальних вкладень на створення ТА виконаємо за співвідношенням вартостей економії електричної енергії й теплової ізоляції ТА

$$K_{ef21} = \frac{c_e \Delta W_{e21}}{c_i 4\pi R^2 \delta_{hi}} ;$$

$$K_{ef23} = \frac{c_e \Delta W_{e23}}{c_i 4\pi R^2 \delta_{hi}} , \quad (3)$$

де R – радіус ТА у формі кулі; δ_{hi} – товщина теплової ізоляції; вартості електричної енергії $c_e = 1,68$ грн/кВт·год і теплоізоляційного матеріалу c_i (пінопласт, 1500 грн/м³).

$$W_u / \eta_{ha} = M_{ha} \left[T_{md} c_{tw} + \frac{1 - Zn(T_{mi})}{2} C_w - \frac{(c_{tw} - c_{tic}) Zn(T_{mi}) + c_{tw} + c_{tic}}{2} T_{mi} \right] = W_{haw} + W_{haC} + W_{haic} ; \quad (4)$$

$$M_{ha} = \frac{(\rho_w - \rho_{ic}) Zn(T_{mi}) + \rho_w + \rho_{ic}}{2} V_{ha} , \quad (5)$$

де $c_{tic} = 2,1$ кДж/(кг·град) – питома теплоємність льоду;

$C_w = 332$ кДж/кг – питома теплота кристалізації води;

$c_{tw} = 4,19$ кДж/(кг·град) – питома теплоємність води;

T_{ma} – задана максимальна температура води;

W_{haw} , W_{haC} , W_{haic} – тепла енергія при охолодженні води ТА від максимальної температури до нуля, її кристалізації та охолодженні льоду до мінімальної температури від нульової, відповідно;

$\rho_w = 1000$, $\rho_{ic} = 920$ – густина води та льоду у кг/м³;

$Zn(T_{mi}) = \begin{cases} -1, T_{mi} < 0, \\ 1, T_{mi} > 0, \end{cases}$ – ключовий елемент для функцій, які здійснюють дискретні зміни у виразах (4), (5). Це

величини коефіцієнтів попереду:

C_w (коефіцієнт змінюється від 0 до 1);

T_{mi} (коефіцієнт змінюється від c_{tw} до c_{tic});

$$V_{ha} = \frac{4\eta_{ha}^{-1} W_u / [(\rho_w - \rho_{ic}) Zn(T_{mi}) + \rho_w + \rho_{ic}]}{2T_{md} c_{tw} - T_{mi} [(c_{tw} - c_{tic}) Zn(T_{mi}) + c_{tw} + c_{tic}] + C_w [1 - Zn(T_{mi})]} . \quad (6)$$

Відповідно до (4) в цих режимах поточні значення зміни енергії ТА з початку аналізу і температури теплоносія ТА пов'язані співвідношеннями:

$$\Delta W_{haw} = V_{ha} \rho_{ic} (T_{ma} - T_{haw}) c_{tw} ;$$

$$T_{haw} = T_{ma} - \Delta W_{haw} / (V_{ha} \rho_{ic} c_{tw}) . \quad (7)$$

$$\Delta W_{haic} = W_{haw} + W_{haC} - V_{ha} \rho_{ic} T_{haic} c_{tic} ;$$

У цій роботі методологія комплексного математичного моделювання системи з ТА була розроблена як продовження засобів моделювання в [7] для випадків, коли використовується процес кристалізації води. Геометричні розміри ТА залежать від величини енергії, яку він може накопичити з урахуванням властивостей теплоносія. Для порівняння варіантів ТА, де теплоносієм є вода, що може змінювати агрегатний стан, потрібно враховувати енергію, накопичену у воді, льоді, а також енергію, що виділяється під час кристалізації. Температурний режим теплоносія оцінюватимемо за знаком мінімальної температури T_{mi} , визначеної для системи [7]. Варіант системи з ТА розглянемо у двох підваріантах. У першому, якщо мінімальна температура нижча за 0 °С, вважаємо, що весь об'єм теплоносія кристалізується. В цьому разі, визначаючи величину накопиченої енергії в об'ємі ТА, необхідно враховувати зміни густини й теплоємності води. Для таких умов співвідношення накопиченої теплової енергії ТА і його маси M_{ha} та об'єму V_{ha} розраховується за формулами:

V_{ha} (коефіцієнт змінюється від ρ_w до ρ_{ic}), які дискретно змінюються залежно від знаку заданої мінімальної температури теплоносія ТА T_{mi} .

Вирази теплових енергій (4) залежно від знаку заданої мінімальної температури з урахуванням функцій, які дискретно змінюють у (4), (5) величини коефіцієнтів, визначаються в такий спосіб:

$$W_{haw} = \begin{cases} M_{ha} T_{md} c_{tw}, T_{mi} < 0; \\ M_{ha} (T_{ma} - T_{mi}) c_{tw}, T_{mi} > 0 ; \end{cases}$$

$$W_{haC} = \begin{cases} M_{ha} C_w, T_{mi} < 0; \\ 0, T_{mi} > 0 \end{cases} ;$$

$$W_{haic} = \begin{cases} M_{ha} |T_{mi}| c_{tic}, T_{mi} < 0; \\ 0, T_{mi} > 0 \end{cases} .$$

З виразів (4), (5) можна визначити потрібний об'єм ТА (якщо теплоносієм перебуває в кристалічному стані, його об'єм збільшується, і це враховується потрібною величиною об'єму ТА для накопичення величини теплової енергії W_u / η_{ha}) у заданих діапазоні температур і варіантах агрегатного стану теплоносія:

$$T_{haic} = (W_{haw} + W_{haC} - \Delta W_{haic}) / (V_{ha} \rho_{ic} c_{tic}) , \quad (8)$$

де ΔW_{haw} , ΔW_{haic} – поточна величина зміни енергії ТА з початку аналізу (на відтинках загальної залежності ΔW_{ha}) в разі перебування води в рідкому і кристалічному станах, відповідно; T_{haw} , T_{haic} – поточні температури теплоносія, що відповідають цим відтинкам.

Ці поточні зміни енергії ТА у функції температури теплоносія еквівалентні енергії теплообміну ТА з

навколишнім середовищем і системою опалення, з моменту початку аналізу (t_s) до поточного часу [7]:

$$\Delta W_{ha} = \int_{t_s}^t \left\{ A_{ha} (T_{ha}(t) - T_{atm}) + \left(\frac{1}{2} + \frac{t}{2|t|} \right) \left[A_{hs} (T_{hs} - T_u) - \frac{1}{1/k_r + 1/k_{h1}} \frac{dW_{uhp}}{dt} \right] \right\} dt, \quad (9)$$

де, відповідно до [7] A_{ha}, A_{hs} – теплові провідності оболонки ТА і системи опалення; $T_{ha}(t), T_{atm}, T_{hs}, T_u$ – температури: ТА, атмосфери, системи й об'єкта опалення; k_r – добуток ККД АД приводу компресора і коефіцієнта врахування незворотних втрат у компресорі; k_{h1} – зворотна величина до холодильного коефіцієнта; $dW_{uhp}/dt = dW_{hp}/dt + dW_{mhp}/dt$ – потужність теплопостачання споживача завдяки функціонуванню теплового насоса; dW_{mhp}/dt – потужність споживання енергії двигуном теплового насоса; $(1 - k_r)dW_{mhp}/dt$ –

потужність втрат енергії у ЕМС теплового насоса; dW_{hp}/dt – потужність теплового потоку від теплового акумулятора до теплового насоса. Коефіцієнт попереду виразу в квадратних дужках у (9) забезпечує врахування цього виразу за умови, що величина часу більша за нуль, тобто в опалювальний період [7].

Зіставивши (9) з (7) і (8), отримаємо вираз визначення температури теплоносія ТА у всіх робочих режимах системи з ТАК, у варіанті кристалізації всього об'єму теплоносія з припущенням рівномірного розподілу температури в об'ємі ТА:

$$T_{ha} = \left(T_{ma} - \frac{\Delta W_{ha}}{V_{ha} \rho_{ic} c_{tw}} \right) \left[\frac{1}{2} - \frac{\Delta W_{ha} - W_{haw}}{2|\Delta W_{ha} - W_{haw}|} \right] + \frac{W_{haw} + W_{haC} - \Delta W_{ha}}{V_{ha} \rho_{ic} c_{tic}} \left[\frac{1}{2} + \frac{\Delta W_{ha} - W_{haw} - W_{haC}}{2|\Delta W_{ha} - W_{haw} - W_{haC}|} \right]. \quad (10)$$

Завдяки перемикальним функціям у цьому виразі (величини у квадратних дужках) величина температури ТА дорівнюватиме: величині залежності (7), якщо $\Delta W_{ha} < W_{haw}$; залежності (8), якщо $\Delta W_{ha} > W_{haw} + W_{haC}$; нулю (протягом процесу використання в ТА теплоти кристалізації води), якщо $W_{haw} < \Delta W_{ha} < W_{haw} + W_{haC}$.

Дослідження ефективності системи з ТА із застосуванням режиму кристалізації води було виконано за допомогою розробленої математичної моделі. Результати зведено до таблиці у порівнянні з даними варіантів системи з атмосферним ТН (визначені за [7] з температурою на вході ТН, яка дорівнює атмосферній) і з ТА без кристалізації. У першому стовпчику таблиці наведено інформацію про сезонні витрати енергії на опалення тестового варіанта системи [7] і вартість електроенергії (за ціною 4,32 грн/кВт*год) у разі опалення електричною енергією з мережі. Також (під ризиком) наведено інтегральні за сезон співвідношення енергій на виході атмосферного ТН (енерговитрати на опалення) і на вході його АД (енергія з мережі). Інформація першого стовпчика представлена у трьох рядках відповідно кількості тестових будинків, які обслуговуються системою теплопостачання: 1, 10 і 100. Пропорційно кількості тестових будинків змінюються умови чисельного експерименту щодо потрібної енергії на опалення протягом сезону і теплової провідності зовнішньої оболонки об'єкта опалення. У цій роботі, при порівняльному дослідженні структур системи з ТА, витрати тепла в системі транспортування тепла не враховуються за малістю в умовах незначної відстані транспортування. Зі збільшенням величини

енергії покращуються властивості ТА, оскільки на одиницю збереженої енергії зменшується величина теплових втрат (об'єм кулі ТА збільшується пропорційно радіусу в третьому степені, а площа поверхні теплообміну з навколишнім середовищем – у другому).

Для кожного з варіантів кількості будинків виконано дослідження системи з ТА без кристалізації для 5 значень мінімальної температури теплоносія (5 перших рядків). У наступному, за температурою, стовпчику наведено оптимальну товщину теплової ізоляції ТА за критерієм максимуму коефіцієнта ефективності $K_{ef21}, (K_{ef23})$, яку визначено варіюванням за серією розрахунків. Максимальна ефективність системи (за заданої закономірності зміни температури навколишнього середовища) має місце за температури теплоносія $T_{mi} 5^\circ\text{C}$. Розрахункові залежності зміни потужностей (dW_{uha} – корисного використання енергії ТА; dW_u – розсіювання тепла споживачем; dW_{uhp} – теплопостачання споживача завдяки функціонуванню теплового насоса; dW_{mhp} – на вході АД ТН) і температур цього варіанта (у функції часу в тижнях, подібно до [7]) наведені на рис. 1. У наступних стовпчиках наведено, відповідно: радіус ТА у формі кулі, співвідношення енергій опалення і споживання з мережі (ТН відбирає енергію з ТА), вартість теплової ізоляції ТА, коефіцієнт ефективності (його чисельник – економія коштів на енергію з мережі, порівняно із атмосферним ТН; знаменник – вартість теплової ізоляції ТА), ККД ТА. Видно, що ефективність ТН з ТА збільшується (порівняно з атмосферним ТН) майже вдвічі.

Таблиця. Результати дослідження варіантів системи з тепловим акумулятором

Table. Results of the study of system variants with a thermal accumulator

Варіант системи, $T_{ma} = 80^\circ\text{C}$		$\delta_{hi},$ м	$R_{ha},$ м	$\frac{W_u}{W_{mhp.ha}}$	$c_{hi} * V_{hi},$ тис. грн	$K_{ef\ 21}$ ($K_{ef\ 23}$)	η_{ha}	K_{efw}	$V_{haic} * c_{w2},$ тис. грн
$\frac{W_u, \text{кВт-тижн.}}{W_u / W_{mhp.atm}}$	$T_{mi},$ $^\circ\text{C}$								
<u>24,94; (18 100 грн)</u> 3,382	TA	20	0,1549	3,592	6,716	37,662	0,07053	0,3091	-
		15	0,1379	3,465	6,021	31,215	0,07513	0,3179	-
		10	0,1258	3,303	5,441	25,874	0,07824	0,3408	-
		5	0,1162	3,125	4,944	21,386	0,07901	0,3755	-
		0	0,1162	2,875	4,437	18,104	0,07625	0,4519	-
	ТАК	-1,5	0,2275	1,848	3,67	14,643	0,02831	0,9252	-
		-1,31	0,196	2,121	3,829	16,621	0,03759	0,8174	2,698
<u>24,94*10; (181 000 грн)</u> 4,037	TA	20	0,07018	7,869	8,127	81,923	0,2754	0,2939	-
		15	0,06292	7,577	7,363	68,095	0,2974	0,3039	-
		10	0,05808	7,194	6,633	56,661	0,3097	0,3297	-
		5	0,05324	6,834	5,993	46,864	0,3123	0,3591	-
		0	0,05324	6,296	5,503	39,775	0,3003	0,4306	-
	ТАК	-8	0,1186	3,924	4,357	34,422	0,09578	0,9469	-
		-7,07	0,1234	4,421	4,502	45,462	0,1019	0,8655	8,931
<u>24,94*100; (1 810 000 грн)</u> 4.2	TA	20	0,03146	17,25	8.54	176,517	1,241	0,2789	-
		15	0,02904	16,39	7,65	146,981	1,322	0,3005	-
		10	0,02662	15,6	6,888	122,16	1,376	0,3232	-
		5	0,0242	14,86	6,216	100,79	1,387	0,3489	-
		0	0,0242	13,68	5,706	85,328	1,332	0,42	-
	ТАК	-48	0,1888	7,444	4,372	197,182	0,08566	1,235	-
		-48,25	0,847	8,349	4,236	1113,018	0,00326	1,277	2,458

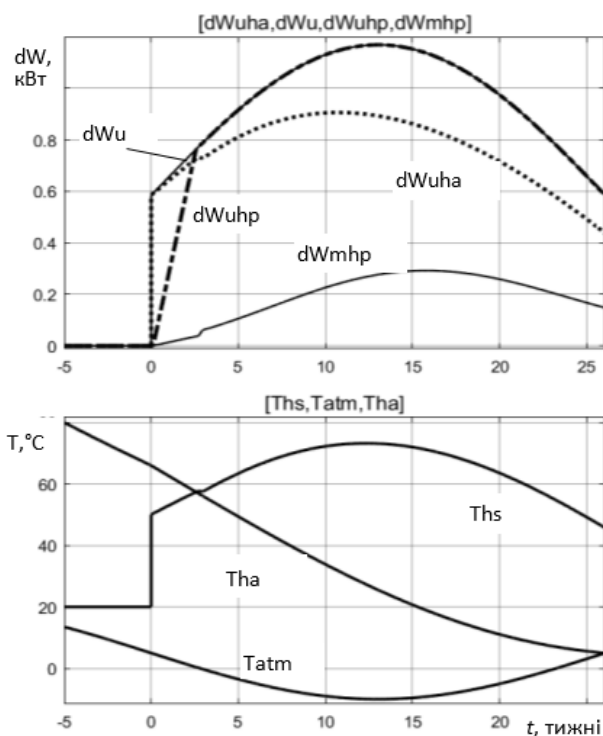


Рис. 1. Параметри робочих режимів, ТА з рідиною
Fig. 1. Parameters of working modes, HA with liquid

У шостому рядку наведено результати дослідження системи з кристалізацією всього об'єму теплоносія і за припущення рівномірного розподілу температури в об'ємі ТА. Дослідження показало, в якому ступені, завдяки залученню теплоти кристалізації води, збільшиться обсяг енергії в одиниці об'єму ТА. А також як зменшуються розміри ТА за (6). Але при цьому, навіть із завищенням енергетичної ефективності за припущення рівномірного розподілу температури в теплоносії ТА, ефективність за виразом (3) знижується. Причиною є зниження енергетичної ефективності ТН зі зниженням температури ТА (джерела тепlopостачання), порівняно з температурою навколишнього середовища. Розрахункові залежності зміни потужностей і температур цього варіанта наведені на рис. 2. Видно, що внаслідок припущення про рівномірний розподіл температури теплоносія ТА, вона залишається нульовою протягом етапу кристалізації.

Підвищення конкурентоспроможності системи з ТАК завдяки синергетичним ефектам можливе в разі використання: 1) льоду, накопиченого в опалювальний сезон, як джерела холоду системи кондиціювання у літній період; 2) процесу кристалізації води як заходу підвищення якості питної води. Без цього виконаний аналіз суто енергетичної відносної ефективності (за виразом (3)) застосування сезонних ТАК систем опалення показує зниження доцільності цього варіанта. Але ситуація

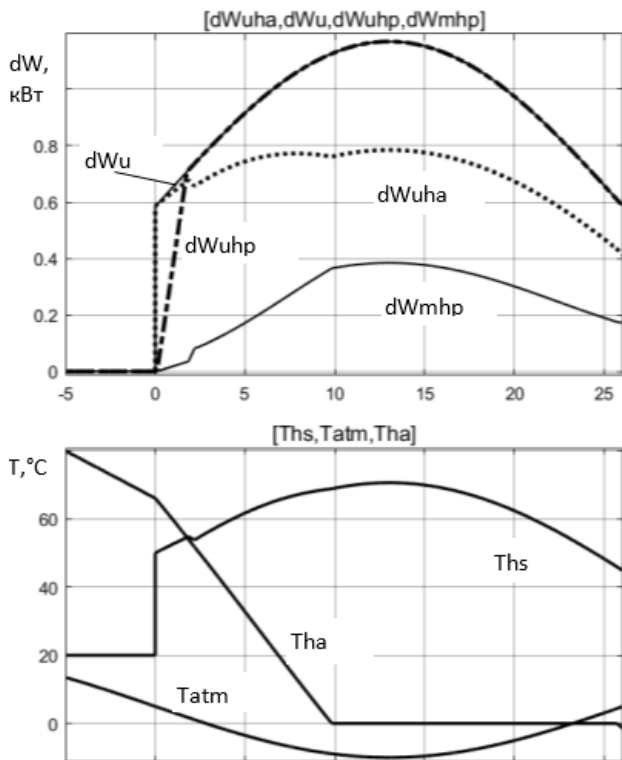


Рис. 2. Параметри робочих режимів, ТА з кристалізацією всього об'єму і за рівномірної температури

Fig. 2. Parameters of working modes HA with crystallization of the entire volume and at uniform temperature

змінюється завдяки розширенню кола корисних продуктів, створених системою. Важливість енергетичних аспектів підвищення ефективності систем кондиціонування збільшується для регіонів з теплішим кліматом. Наприклад, у США енерговитрати на кондиціонування у рази

перевищують такі потреби опалення. Аналіз ефективності систем опалення і кондиціонування з ТА (в разі річного циклу аналізу) потребує доробки математичної моделі й критеріїв ефективності системи, що є предметом окремого дослідження. В межах цієї роботи з дослідження систем опалення з ТА оцінимо синергетичні ефекти підвищення якості питної води.

Результати експериментального дослідження процесу кристалізації водопровідної води з рівнем домішок 350 ppm, визначеним Комплексним аналізатором якості води EZODO 7200, прийнято як вихідні дані для оцінки ефективності очищення води. Заморожування здійснювалась у морозильній камері холодильного агрегату з потужністю 300 Вт до кристалізації половини води. Внаслідок видалення рідкої, збагаченої розчиненими домішками, фракції й розморожування чистого льоду зафіксований рівень домішок очищеної води становив 75 ppm. Вартість питної води такої якості у роздрібній торгівлі становить приблизно 10 грн/дм³.

Для подальшого порівняльного дослідження систем з ТАК приймаємо: частка об'єму очищеної води визначається коефіцієнтом k_{ic} (якщо очищена вода становить половину вихідного об'єму $k_{ic} = 0,5$); вартість водопровідної води – $c_{w1} = 30,384$ грн/м³; вартість очищеної води оцінимо як чверть її ринкової вартості – $c_{w2} = 2500$ грн/м³. За даних умов розглянемо другий підваріант системи з ТАК, де потрібний об'єм ТА для накопичення величини теплової енергії W_u/η_{ha} за умови кристалізації визначеної частки об'єму води ТА становить:

$$V_{haic} = \frac{4\eta_{ha}^{-1}W_u / [(\rho_w - \rho_{ic})Zn(T_{mi}) + \rho_w + \rho_{ic}]}{2T_{md}c_{tw} - T_m c_{tw} [1 + Zn(T_{mi})] + (C_w - k_{tic}T_{icm}c_{tic})k_{ic}[1 - Zn(T_{mi})]}, \quad (11)$$

де T_{icmi} – мінімальна температура (°C) зовнішнього шару льоду ТА, яка визначається за результатами ітераційного розрахунку циклу його роботи; k_{tic} – коефіцієнт усереднення теплової енергії в льоді за зміни його температури з глибиною від T_{icmi} до температури рідкої фракції води в ТА (у першому наближенні приймаємо $k_{tic} = 0,5$).

Моделювання процесів енергообміну в системі опалення з ТА з використанням виразів (9), (10) відповідає припущенню рівномірного розподілу температури в об'ємі ТА. Це може мати місце в разі роботи з рідким теплоносієм (наприклад, з використанням системи примусової циркуляції). В разі кристалізації хоча би частини води ТА моделювання з (9), (10) буде призводити до завищення температури поверхні теплоносія ТА і, відповідно, енергоефективності системи. За даних умов для підвищення точності аналізу слід враховувати зниження температури поверхні ТАК (ΔT_{ic}) порівняно з шарами води всередині ТА, яке залежить від теплової провідності шару льоду і потужності потоку тепла кристалізації

води з середини ТА до його поверхні. При цьому об'єм льоду визначається за енергією кристалізації, яка є інтегралом за період часу, починаючи з моменту t_0 зниження температури поверхні ТА до нуля, тобто в разі виконання умов $W_{haw} < \Delta W_{ha} < W_{haw} + W_{haC}$:

$$W_{ic} = \int_{t_0}^t (\Delta W_{ha} - W_{haw}) dt,$$

Об'єм льоду (V_{ic}), товщина (δ_{ic}) і усереднена площа (S_{ic}) його шару визначаються як:

$$V_{ic} = W_{ic} / (\rho_{ic} C_w);$$

$$\delta_{ic} = \sqrt[3]{3V_{ha}/4\pi} - \sqrt[3]{3(V_{ha} - V_{ic})/4\pi};$$

$$S_{ic} = \sqrt[3]{4,5\pi} [V_{ha}^{2/3} + (V_{ha} - V_{ic})^{2/3}];$$

За параметрами шару льоду можна визначити падіння в ньому температури залежно від потужності тепловідбору з ТА (dW_{ha}/dt), яка визначається за підінтегральним виразом у (9):

$$dW_{ha}/dt = A_{ic} \Delta T_{ic}.$$

$$A_{ic} = S_{ic} \lambda_{ic} / \delta_{ic};$$

$$\Delta T_{ic} = \delta_{ic} (dW_{ha}/dt) / (S_{ic} \lambda_{ic}).$$

A_{ic} – теплова провідність шару льоду ТА; $\lambda_{ic} = 2,24 \cdot 10^{-3}$ кВт/(м·°C) – теплопровідність льоду,

Інформація про величину падіння температури в шарі льоду дає можливість уточнити вираз (10) для умов часткової кристалізації об'єму води ТА:

$$T_{ha} = \left(T_{ma} - \frac{\Delta W_{ha}}{V_{ha} \rho_{ic} c_{tw}} \right) \left[\frac{1}{2} - \frac{\Delta W_{ha} - W_{haw}}{2|\Delta W_{ha} - W_{haw}|} \right] - \Delta T_{ic}$$

За умови врахування очищеної води як виробленого корисного продукту системи з ТАК кількісну оцінку цієї корисної дії оцінимо коефіцієнтом відношення різниці вартостей очищеної й водопровідної води до вартості теплової ізоляції:

$$K_{efw} = \frac{V_{haic} (k_{ic} c_{w2} - c_{w1}) \rho_{ic} / \rho_w}{c_i 4\pi R^2 \delta_{hi}}.$$

Результати дослідження підваріанта ТАК з частковою кристалізацією теплоносія і використанням очищеної води наведено у табл. 1 (останній рядок кожного варіанта кількості будинків). В останньому стовпчику табл. 1 наведено інформацію про вартість очищеної води, у передостанньому – її співвідношення з вартістю теплової ізоляції ТА. Розрахункові залежності зміни потужностей і температур цього варіанту наведені на рис. 3. Видно, що протягом етапу кристалізації температура зовнішньої поверхні льоду є від'ємною внаслідок падіння в ньому теплового потенціалу. Таке зниження температури є особливо значним в останньому варіанті таблиці. Тому ТА цього варіанту доцільно зменшувати в розмірах: наприклад, застосувати сім ТА попереднього варіанту для 10 будинків.

Висновки

1. Розроблено засоби комплексного дослідження систем тепlopостачання на основі електромеханічних систем теплових насосів із сезонними тепловими акумуляторами, які використовують воду як теплоносії у рідкому і кристалічному станах. Розроблені засоби враховують зміну робочого режиму протягом опалювального сезону, здійснюють сумісний аналіз ефективності електромеханічних і теплотехнічних складових системи, виконують і забезпечують визначення інтегральної оцінки корисної дії системи за кінцевим результатом, а також оптимального співвідношення конструктивних і режимних параметрів.

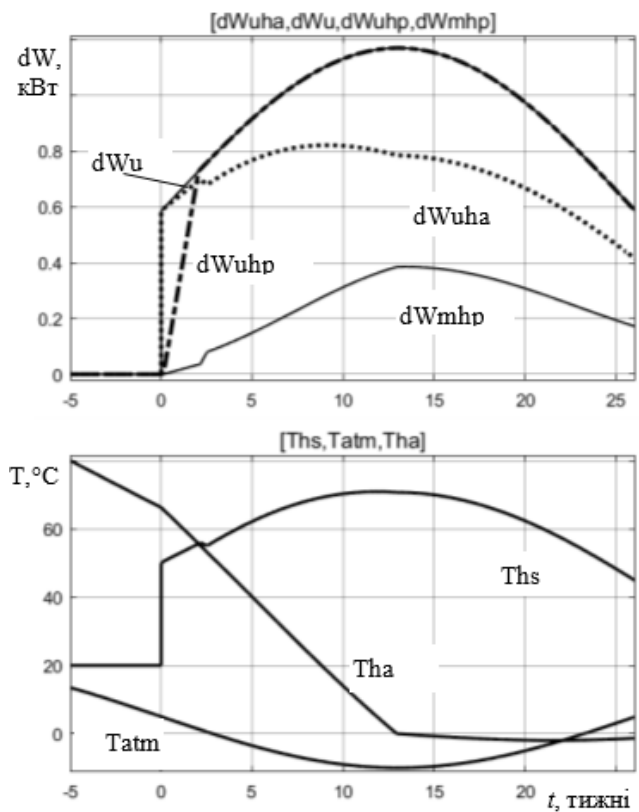


Рис. 3. Параметри робочих режимів, ТА з частковою кристалізацією і зі зниженням температури льоду

Fig. 3. Parameters of working modes, HA with partial crystallization and at lower ice temperatures

2. Системи тепlopостачання на основі електромеханічних систем теплових насосів із сезонними водяними тепловими акумуляторами забезпечують зниження споживання електричної енергії порівняно з атмосферними тепловими насосами в 1,5 ... 2 рази. При цьому економія коштів на електроенергію відносно витрат на теплову ізоляцію теплового акумулятора змінюється від 8 до 30 % у разі збільшення потрібної енергії на опалення в 10 разів і від 8 до 130 % – у разі її збільшення в 100 разів.

3. Системи тепlopостачання на основі електромеханічних систем теплових насосів із сезонними тепловими акумуляторами з кристалізацією води в повному об'ємі забезпечують незначне зниження споживання електричної енергії порівняно з атмосферними тепловими насосами: до 10 %. При цьому економія коштів на електроенергію відносно витрат на теплову ізоляцію теплового акумулятора змінюється від 3 до 10 % у разі збільшення потрібної енергії на опалення в 10 разів і від 3 до 9 % – в разі її збільшення в 100 разів. Потрібний об'єм теплового акумулятора завдяки кристалізації знижується в 5 ... 8 разів.

4. Системи тепlopостачання на основі електромеханічних систем теплових насосів із сезонними тепловими акумуляторами з кристалізацією половини води, так само, як і атмосферні теплові насоси, забезпечують незначне зниження споживання електричної енергії та економію коштів на електроенергію відносно витрат на

теплову ізоляцію теплового акумулятора. Потрібний об'єм теплового акумулятора внаслідок кристалізації знижується в 4 рази. Завдяки синергетичному ефекту очищення води під час кристалізації виявляється додатковий аспект корисної дії системи, який в економічному обчисленні відносно витрат на теплову ізоляцію теплового акумулятора становить 250 ... 850 %.

5. Основна перевага систем тепlopостачання на основі електромеханічних систем теплових насосів із сезонними тепловими акумуляторами з кристалізацією полягає у можливості очищення води (як питної, так і для потреб сільського господарства). Завдяки цьому витрати на теплову ізоляцію теплових акумуляторів можуть окупатися за кілька місяців.

ПОСИЛАННЯ

1. Кузнєцов М. П., Хомутов С. В. Оцінка роботи установок зберігання електроенергії в енергосистемі з відновлюваною генерацією. *Відновлювана енергетика*. 2024. № 3. С. 34–45.
DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3\(74\).115-126](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74).115-126)
2. Зошченко С. А. Сонячне тепlopостачання: різновиди систем перетворення, ефективність. *Відновлювана енергетика*. 2022. № 4. С. 43–48.
DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4\(71\).43-48](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4(71).43-48)
3. Кузнєцов М. П., Лисенко О. В., Хомутов С. В. Сезонне акумуляування енергії в гібридній енергосистемі. *Відновлювана енергетика*. 2024. № 1. С. 6–21.
DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1\(76\).6-21](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1(76).6-21)
4. Tian Y., Zhao C.Y. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*. Volume 104. April 2013. Pp. 538–553.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.051>
5. Rismanchi B., Saidur R., Boroumandjazi G., Ahmed S. Energy, exergy and environmental analysis of cold thermal energy storage (CTES) systems. *Renew Sustain Energy Rev*. 16 (2012) 5741–5746.
6. Yau Y.H., Rismanchi B. A review on cool thermal energy storage technologies and operating strategies. *Renew Sustain Energy Rev*. 15 (2012) 787–797.
7. Попович О. М. Моделювання систем з сезонними тепловими акумуляторами відновлюваної енергетики. *Відновлювана енергетика*. 2023. № 3. С. 115–126.
DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3\(74\).115-126](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74).115-126)
8. Popovych O. M., Golovan I. V. Complex design tools for improvement of electromechanical systems with induction motors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 2. Pp. 52–59. DOI: <https://doi.org/10.15407/tech-ned2022.02.052>

9. Попович О. М., Головань І. В. Дослідження енергетичної ефективності електромеханічної системи малих гес у маневрових режимах роботи засобами комплексного моделювання. *Відновлювана енергетика*. 2024. № 3. С. 122–131.
DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3\(78\).122-131](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78).122-131)
10. Забарний Г. М., Кудря С. О., Маслюкова З. В., Примак А. І. Сезонне акумуляування теплоти в підземних акумуляторах. К.: ТОВ «БІОЛ-ПРИНТ», 2009. 278 с.
11. Fernandes D., Pitie F., Caceres G., Baeyens J. Thermal energy storage: "How previous findings determine current research priorities". *Energy*. 39 (2012) 246–257.
12. Fernandez A. I., Martinez M., Segarra M., Martorell I., Cabeza L. P. Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 94 (2010) 1723–1729.
13. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А. Э/ Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
14. Kousksou T., Bruel P., Jamil A., El Rhafiki T., Zeraoui Y. Energy storage: Application and challenges. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 120 (2013) 59–80.
15. Chen H., Cong T. N., Yang W., Tan C., Li Y., Ding Y. Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*. 19 (2009) 291–312.
16. Garg H. P., Mullick S. C., Bhargava A. K. *Solar Thermal Energy Storage*, first ed., D. Reidel Publishing Company. Dordrecht. Holland. 1985.
17. Lane G. A. *Solar Heat Storage: Latent Heat Materials*. CRC Press. Boca Raton. USA. 1983.

REFERENCES

1. Kuznyetsov M., Khomutov S. Otsinka roboty ustanovok zberihannya elektroenerhiyi v enerhosystemi z vidnovlyuvanoyu heneratsiyeyu [Evaluation of the operation of electricity storage facilities in the energy system with renewable generation]. *Vidnovlyuvana enerhetyka*. 2024. No. 3. Pp. 34–45.
DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3\(74\).115-126](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74).115-126). [in Ukr].
2. Zoshchenko S. Sonyachne teplopостачання: riznovydy system peretvorenniya, efektyvnist' [Solar heat supply: types of conversion systems, efficiency]. *Vidnovlyuvana enerhetyka*. 2022. No. 4. Pp. 43–48.
DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4\(71\).43-48](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4(71).43-48). [in Ukr].
3. Kuznyetsov M., Lysenko O., Khomutov S. Sezonne akumuluvannya enerhiyi v hibrydnyy enerhosystemi [Seasonal energy accumulation in a hybrid energy system]. *Vidnovlyuvana enerhetyka*. 2024. No. 1. Pp. 6–21.

- DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1\(76\).6-21](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1(76).6-21). [in Ukr].
4. Tian Y., Zhao C. Y. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*. Volume 104. April 2013. Pp. 538–553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.051>
5. Rismanchi B., Saidur R., Boroumandjazi G., Ahmed S. Energy, exergy and environmental analysis of cold thermal energy storage (CTES) systems. *Renew Sustain Energy Rev*. 16 (2012) 5741–5746.
6. Yau Y. H., Rismanchi B. A review on cool thermal energy storage technologies and operating strategies. *Renew Sustain Energy Rev*. 15 (2012) 787–797.
7. Popovych O. Modelyuvannya system z sezonnyimi teplovymy akumulatoryami vidnovlyuvanoi enerhetyky [Modeling of systems with seasonal heat accumulators of renewable energy]. *Vidnovlyuvana enerhetyka*. 2023. No. 3. Pp. 115–126. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3\(74\).115-126](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74).115-126). [in Ukr].
8. Popovych O., Golovan I. Complex design tools for improvement of electromechanical systems with induction motors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No. 2. Pp. 52–59. DOI: <https://doi.org/10.15407/tech-ned2022.02.052>
9. Popovych O., Golovan I. Doslidzhennya enerhetychnoyi efektyvnosti elektromekhanichnoyi systemy malykh hes u manevrovnykh rezhymakh roboty zasobamy kompleksnoho modelyuvannya [Research of the energy efficiency of the electromechanical system of small hydropower plants in maneuvering modes of operation by means of complex modeling]. *Vidnovlyuvana enerhetyka*. 2024. No. 3. Pp. 122–131. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3\(78\).122-131](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78).122-131). [in Ukr].
10. Zabarnyy H., Kudrya S., Maslyukova Z., Prymak A. Sezone akumuluyannya teploty v pidzemnykh akumul'yatorakh [Seasonal accumulation of heat in underground accumulators]. K.: TOV «VIOL-PRYNT», 2009. 278 s. [in Ukr].
11. Fernandes D., Pitie F., Caceres G., Baeyens J. Thermal energy storage: "How previous findings determine current research priorities". *Energy*. 39 (2012) 246–257.
12. Fernandez A. I., Martinez M., Segarra M., Martorell I., Cabeza L. P. Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 94 (2010) 1723–1729.
13. Asinkhronnyye dvigateli serii 4A, [Asynchronous motors of the 4A series: Handbook]: Spravochnik / A. E. Kravchik, M. M. Shlaf, V. I. Afonin, E. A. Sobolenskaya. M.: Energoizdat, 1982. 504 s. [in Rus].
14. Kousksou T., Bruel P., Jamil A., El Rhafiki T., Zeraoui Y. Energy storage: Application and challenges. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 120 (2013) 59–80.
15. Chen H., Cong T. N., Yang W., Tan C., Li Y., Ding Y. Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*. 19 (2009) 291–312.
16. Garg H. P., Mullick S. C., Bhargava A. K. *Solar Thermal Energy Storage*, first ed., D. Reidel Publishing Company. Dordrecht. Holland. 1985.
17. Lane G. A. *Solar Heat Storage: Latent Heat Materials*. CRC Press. Boca Raton. USA. 1983.