

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ ТЕПЛООВОГО АКУМУЛЯТОРА З ТВЕРДИМ АКУМУЛЮЮЧИМ МАТЕРІАЛОМ ПОРИСТОЇ СТРУКТУРИ ДЛЯ ГЕЛІОТЕРМІЧНИХ УСТАНОВОК

Сергій Коробка, к. т. н., Віталій Власовець, д. т. н., Сергій Сиротюк, к. т. н., Михайло Бабич, к. т. н., Роман Кригуль, к. т. н., Ігор Стукалець, к. т. н.

*Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: korobkasv@ukr.net*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2022.26.077>

Коробка С., Власовець В., Сиротюк С., Бабич М., Кригуль Р., Стукалець І. Обґрунтування параметрів та режимів роботи теплового акумулятора з твердим акумулюючим матеріалом пористої структури для геліотермічних установок

Розроблено новий тип акумулятора з твердим теплоакumuлюючим матеріалом пористої структури для геліотермічної установки, який базується на використанні екологічно чистого і відновлюваного джерела теплової енергії – сонячного випромінювання та акумульованого тепла.

Обґрунтовано конструктивно-технологічну схему насадного теплового акумулятора з використанням гальки та проаналізовано режими його роботи. Для оцінки ефективності акумулятора встановлені такі чинники: спектральний склад поглиненого випромінювання, що визначає швидкість нагрівання гальки, організація поля випромінювання за рахунок керування потоком теплоносія, властивості досліджуваного матеріалу і нещільності середовища, зміна умов теплообміну, геометричні параметри акумулятора.

Отримано математичну модель, за допомогою якої можна розрахувати значення поглинання температурного градієнта в умовах нерухомого пористого шару гальки і регламентувати глибину проникнення теплового потоку для конкретного шару акумулятора, в якому відбуваються фазові перетворення.

Запропоновано методику інженерного розрахунку теплових полів для нерухомого пористого шару гальки та рекомендації щодо їх успішного використання в геліотермічній установці для забезпечення її роботи в нічний час та в умовах часткової хмарності. Вибір таких теплоакumuлюючих елементів передбачав дослідження теплового потоку в пористому шарі і енергії конвективного теплообміну. Встановлено, що найперспективнішим щодо використання як акумулятора сонячної радіації в режимі температур 30...50 °С є шар гальки з пористою структурою за використання якого енергія, що підводиться до теплового акумулятора, становила 615,4 кДж, а нагрівання теплоакumuлюючого матеріалу масою 50 кг на 1 °С дало змогу акумулювати 42,25 кДж/°С тепла.

Ключові слова: тепловий акумулятор, тепломасообмін, геліотермічна установка.

Korobka S., Vlasovets V., Syrotiuk S., Babych M., Kryhul R., Stukalets I. Justification of the parameters and operation modes of a thermal accumulator with a solid accumulative material of a porous structure for heliothermal installations

A new type of battery with a solid heat-accumulating material of a porous structure has been developed for a heliothermal installation, which is based on the use of an environmentally friendly and renewable source of thermal energy - solar radiation and accumulated heat.

The structural and technological scheme of the plug-in heat accumulator using pebbles was substantiated and its modes of operation were analyzed. In order to evaluate the battery efficiency, the following factors are determined, in particular, the spectral composition of the absorbed radiation that determines the rate of pebbles heating, organization of the radiation field due to the control of the the coolant flow, properties of the material under study and the leakage of the medium, changes in the conditions of heat exchange, geometric parameters of the battery.

A mathematical model was obtained. It can be used to calculate the amount of absorption of the temperature gradient in the conditions of a stationary porous layer of pebbles and to regulate the depth of heat flow penetration for a specific layer of the battery in which phase transformations take place.

A method of engineering calculation of thermal fields for a stationary porous layer of pebbles and recommendations for their successful use in a heliothermal installation to ensure its operation at night and in partly cloudy conditions are proposed. The choice of such heat-accumulating elements was based on the study of the heat flow in the porous layer and the energy of convective heat exchange. It was established that a layer of pebbles with a porous structure is the most promising in terms of its use as a solar radiation accumulator in the temperature regime of 30...50 °С. By using the layer, the energy supplied to the heat accumulator was 615.4 kJ, and the heating of the heat-accumulating material with the weight of 50 kg per 1 °С made it possible to accumulate 42.25 kJ/°С of heat.

Key words: heat accumulator, heat and mass exchange, heliothermal installation.

Постановка проблеми. У сфері виробництва, енергозбереження та використання надлишкової теплової енергії сьогодні існує багато невирішених завдань, зокрема одним із них є акумулювання надмірної теплової енергії в геліотермічних установках протягом доби. Проблема полягає в тому, що цю надлишкову теплову енергію складно акумулювати. Наприклад, у геліосушарках потрібно акумулювати надлишкову теплову енергію в денний час і використовувати для нагріву теплоносія в нічний період, що дасть змогу продовжити процес сушіння і стабілізувати тепловологісні режими [1].

На підставі аналізу існуючих способів і засобів використання сонячної енергії, наприклад для сушіння фруктів, встановлено, що найперспективнішим для особистих селянських і фермерських господарств є використання геліотермічної установки з акумулятором на основі гальки, а застосування сонячної енергії для сушіння фруктів є прийнятним, зокрема, для широти розташування Рівненської області, яка має середньорічну потужність сонячного випромінювання порядку $3,41 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ за світловий день. Це дозволяє з 1 м^2 площі повітряного колектора отримати від 1,5 до 2,3 кВт·год енергії за добу.

На сьогодні не існує зручних методик для розрахунку процесів теплообміну в акумуляторах з твердими матеріалами. Таким чином, дослідження, спрямовані на підвищення ефективності роботи акумуляторів теплоти на основі твердих матеріалів у геліотермічних установках є актуальними і відповідають сучасним тенденціям розвитку теплоенергетики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Енергозабезпечення геліотермічної установки складається з джерела первинної енергії, підсистеми перетворення енергії та споживачів перетвореної енергії. У системі можуть виникати невідповідності як у часі, так і в просторі – між подачею енергії та потребами. Подолання цих невідповідностей є основною метою акумулювання енергії [2; 3; 8].

На сьогодні існує велике розмаїття теплоакуюлюючих матеріалів (ТАМ), видів і конструкцій теплових акумуляторів, зумовлене широким спектром сфер їх застосування [11]:

- теплові акумулятори з твердим ТАМ [4];
- теплові акумулятори з плавильним ТАМ [5];
- рідинні акумулятори тепла [6];
- парові акумулятори тепла [7];

- теплові акумулятори фазового переходу [8];
- термохімічні акумулятори [9].

Здебільшого основними недоліками вищевказаних систем і видів акумуляторів, що перешкоджають їхньому поширенню, є великі габарити, складність конструкції, експлуатації, дороге виготовлення.

Тому перспективною і прогресивною ідеєю є створення нових систем акумулювання. Зокрема, у геліотехніці це створення теплоакуюлюючих систем на основі твердих ТАМ з використанням гальки приблизно однакової дисперсності (фракційності). Запропонований вид енергоощадної акумуляції дає змогу миттєво запасати в акумуляуючій речовині велику кількість теплової енергії в денний період, а в нічний час із великою швидкістю і теплопровідністю віддати акумуляоване тепло теплоносію. Тому така простота виготовлення і принципу роботи повинна бути покладена в основу методики розрахунку та проектування насадного теплового акумулятора з твердим ТАМ із пористою структурою для геліотермічних установок [10].

Однак складність експериментальних досліджень із визначення оптимальних параметрів адсорбції й геометричних параметрів шару сорбенту вимагає залучення методів математичного моделювання для розв'язання задачі. Більшість математичних моделей, зокрема наведених у працях [2; 3], описують кінетику адсорбції для окремої насадки сорбенту й динаміку сорбції під час продування шару ТАМ атмосферним повітрям. При цьому вони мають загальний характер та є складними для інженерних застосувань.

Постановка завдання. Наше завдання – підвищити ефективність роботи акумуляторів теплоти на основі твердих матеріалів пористої структури для геліотермічних установок. Такі рішення є зручними для аналізу теплових режимів, оскільки явно відображають вплив на розподіл температури визначальних чинників, що дозволяють оцінити їх значення і виділити головні з них. Вони також можуть слугувати критерієм оцінки достовірності числових розв'язків.

Виклад основного матеріалу. Обґрунтовано конструктивно-технологічну схему насадного теплового акумулятора з твердим ТАМ з пористою структурою для геліотермічних установок (рис. 1).

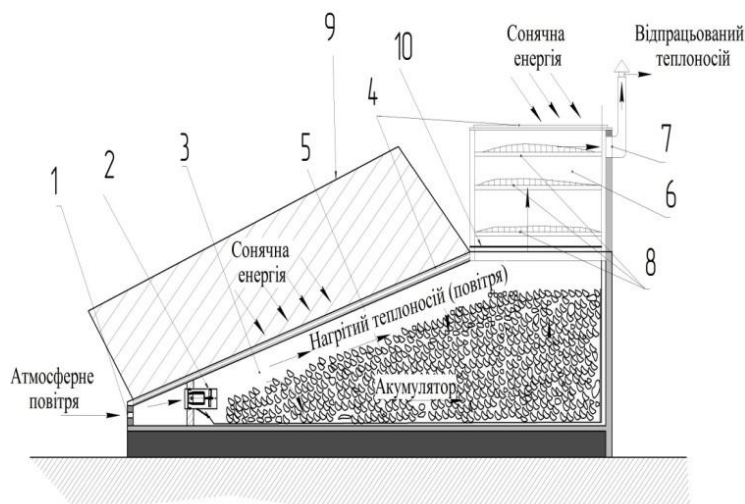


Рис. 1. Схема насадного теплового акумулятора з твердим теплоакумуючим матеріалом з пористою структурою для геліотермічних установок: 1 – вхідний канал; 2 – вентилятор; 3 – повітропровід; 4 – повітряний колектор; 5 – теплоакумуючий матеріал (галька); 6 – сушильна камера; 7 – витяжний канал; 8 – решета; 9 – дзеркальний концентратор; 10 – заслінка

Fig. 1. Scheme of a plug-in heat accumulator with a solid heat-accumulating material of the porous structure for heliothermal installations: 1 – input channel; 2 – fan; 3 – duct; 4 – air collector; 5 – heat-accumulating material (pebbles); 6 – drying chamber; 7 – exhaust channel; 8 – sieve; 9 – mirror concentrator; 10 – damper

Акумулятор являє собою гетерогенну систему, що складається з твердого кістяка й рідини, що приймає або передає теплоту (у краплинній чи газоподібній формі). Оскільки швидкість протікання рідини невелика (число Маха M безумовно менше 0,6), газоподібне середовище вважається нестиснутим [11].

За розрахунковою моделлю приймаємо, що акумулятор являє собою щільне вкладення сферичних часток. Схема розрахункової моделі наведена на рис. 2.

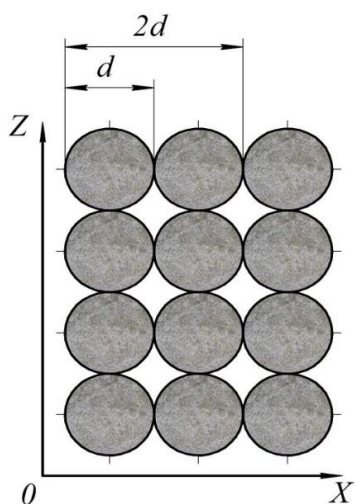


Рис. 2. Схема розрахунку акумулятора
Fig. 2. Calculation scheme of the accumulator

У прийнятій схемі твердий кістяк моделі являє собою періодичну структуру, що є безпервною у всьому просторі акумулятора [12].

Безпервність кістяка не означає його цілісності. Оскільки сферичні частини не деформуються, то координати центра сферичних частин постійні.

В акумуляторі в процесі заряду й розряду теплоти відбуваються складні теплофізичні й масообмінні явища, зумовлені конструктивними й фізичними параметрами системи акумулявання теплоти. Аналіз цих явищ можливий завдяки розв'язанню системи рівнянь, що описують фізичні процеси, які протікають у них [1; 2].

Рух нестиснутої в'язкої рідини описується системою рівнянь Нав'є – Стокса. Нехтуючи в цьому випадку гравітаційною силою, що для газоподібного теплоносія цілком припустимо, система рівнянь має такий вигляд [13]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right),$$

де u, v, w – компоненти швидкості; τ – час; x, y, z – природні декартові координати; ρ – густина середовища; p – тиск; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості.

Рівняння енергії записується так:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} + w \frac{\partial t}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

де a – коефіцієнт теплопровідності.

Рівняння нерозривності для нестисливого середовища:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (3)$$

Рівняння (1)...(3) становлять повну систему рівнянь тепломасообміну однорідної в'язкої нестиснутої рідини з постійним коефіцієнтом в'язкості μ .

Акумулятор являє собою прямокутний бак розміром $2 \times 2 \times 3$ м, заповнений гравієм у вигляді круглих куль діаметром 50 мм. Акумулятор теплоізований прошивними матами товщиною 100 мм, маса ТАМ становить 50 кг. Теплофізичні характеристики гравію й матів наведені в таблиці. Об'єм акумулятора розглядається як пористе середовище з пористістю $\epsilon = 0,476$, що є відношенням загального об'єму повітря між кулями (шматками) гравію до загального обсягу бака. При цьому обсяг повітря, що прилягає до окремої кулі, становив різницю між об'ємами куба й описаної в ньому кулі [14].

Розрахунок тривимірних нестационарних полів температур в об'ємі повітряного акумулятора теплоти з гравійним наповненням у режимі зарядки й розрядки здійснювали за допомогою числового розв'язання рівнянь Нав'є – Стокса за допомогою комп'ютерної програми MatLab.

Швидкість повітря на вході в акумулятор як у режимі зарядки, так і в режимі розрядки становила 2 м/с. Розміри вхідного й вихідного отворів становили 20×20 см.

Таблиця. Теплофізичні властивості акумулюючого матеріалу [15]

Table. Thermo-physical properties of the accumulating material [15]

| Матеріал | Теплопровідність, Вт/(м·К) | Теплоємність, Дж/(кг·К) | Густина, кг/м ³ |
|---------------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Галька (гравій) | 3,2 | 921,6 | 2680 |
| Теплоізоляція (мінеральна вата) | 0,045 | 836,0 | 582 |

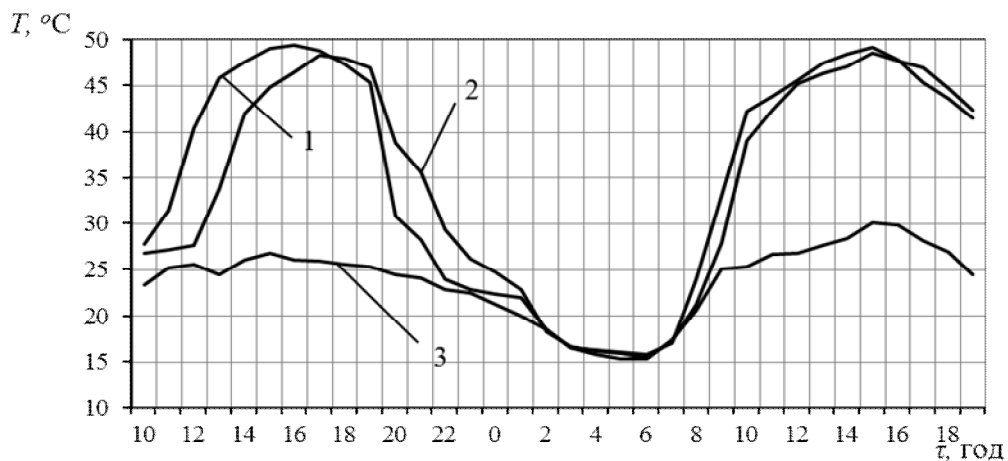


Рис. 3. Зміна температурних показників робочого матеріалу теплового акумулятора впродовж доби 15.07.2022 р.; 16.07.2022 р.: 1 – температура теплоносія; 2 – температура теплового акумулятора; 3 – температура навколишнього середовища

Fig. 3. Change in temperature indicators of the working material of the heat accumulator during the day of 15 July 2022; 16 July 2022: 1 – coolant temperature; 2 – heat accumulator temperature; 3 – ambient temperature

На рис. 3 подано результати дослідження зміни температури теплоносія в повітряному колекторі. 15 липня о 10⁰⁰ год. температура теплоносія становила 27,6 °С, а від 13⁰⁰ до 15⁰⁰ год. досягла максимального значення 49,4 °С, з 15⁰⁰ до 19⁰⁰ год. температура теплоносія знизилась до 45,3 °С. У нічний період з 15 на 16 липня від 20⁰⁰ до 5⁰⁰ год. температура теплоносія змінювалася від 30,6 °С до 25,1 °С, а нижнього піку у 15 °С досягла о 6⁰⁰ год.

16 липня теплоносієм з 9⁰⁰ до 14⁰⁰ год. нагрівався від температури 33,1 °С до температури 48,4 °С та о 15⁰⁰ год. досяг температури 49,2 °С.

Аналогічно змінювалася температура теплового акумулятора за результатами досліджень впродовж доби 15.07.2022 р. та 16.07.2022 р. Так, 15 липня від 10⁰⁰ до 17⁰⁰ год. тепловий акумулятор нагрівався від 26,8 °С до 48,3 °С, після чого з 18⁰⁰ до 6⁰⁰ год. температура знизилась до 15,4 °С. 16 липня з 7⁰⁰ до 18⁰⁰ год. температура теплового акумулятора змінювалася від 17,9 °С до 48,6 °С.

Температура навколишнього середовища 15 липня в денний період від 10⁰⁰ до 18⁰⁰ год. коливалася від 23,3 °С до 25,6 °С, тоді як у ночі з 15 на 16 липня від 22⁰⁰ до 9⁰⁰ год. температура навколишнього середовища змінювалася від 22,8 °С до 25,1 °С з нижнім піком у 15 °С о 6⁰⁰ год.

У режимі зарядки (рис. 4) температура поверхні ТАМ, розташованого в центрі теплового акумулятора, досягне значення 31,4 °С о 10⁰⁰ год., а з 11³⁰ до 15⁰⁰ год. температура дорівнює 48,9 °С. ТАМ, що перебуває поблизу виходу, після однієї

години зарядки з 10⁰⁰ до 11¹⁵ год. має температуру 42 °С, а після п'яти годин з 11²⁰ до 15⁰⁰ год. – 52 °С.

У режимі розрядки (рис. 5) з 17⁰⁰ до 7⁰⁰ год. температура ТАМ на вході коливається від 46,5 °С до 20,6 °С, у центрі – від 47,3 °С до 20,9 °С, а на виході – від 48,1 °С до 21,1 °С.

Отже, тепловий акумулятор характеризується розмірами: довжина – 1360 мм, ширина – 850 мм, глибина – від 10 мм при вході до 180 мм на виході (об'ємом 0,35 м³ на 1,5 м² площі колектора), маса ТАМ $m_{ma}=50$ кг і власна густина $\rho_{вл} = 2550\dots 2670$ кг/м³, насипна густина $\rho_n = 742,65$ кг/м³, питома теплоємність $c_{ma}=0,845$ кДж/кг °С.

Теплофізичні параметри ТАМ: у режимі зарядки температура T_{ma} становила 30,5 ÷ 45,6 °С не менше ніж 6 годин, а в режимі розрядки – 45,6 ÷ 20,9 °С не більше ніж 7 годин; енергія, що відводиться від (підводиться до) теплового акумулятора, становить 615,4 кДж. Нагрівання ТАМ масою 50 кг на 1 °С дає змогу акумулювати 42,25 кДж/°С тепла.

Реалізація натурального випробування насадного теплового акумулятора з твердим ТАМ із пористою структурою в геліотермічній установці здійснювалася за допомогою багатоканального цифрового вимірювального перетворювача РТ-0102.

Тепловий акумулятор заряджається гарячим повітрям, що рухається в повітропроводі з певною швидкістю, передаючи своє надлишкове тепло елементам насадки. Розряджається тепловий акумулятор холодним повітрям, що рухається в повітропроводі в нічний час, охолоджуючи елементи насадок.

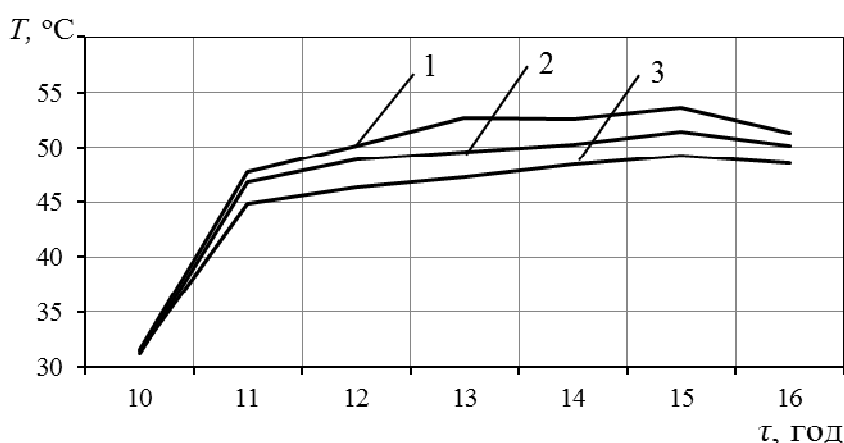


Рис. 4. Темп нагрівання теплоакumuлюючого матеріалу: 1 – температура робочого матеріалу теплового акумулятора у верхньому шарі; 2 – температура робочого матеріалу теплового акумулятора в центральному шарі; 3 – температура робочого матеріалу теплового акумулятора в нижньому шарі

Fig. 4. Accumulator heating rate: 1 – temperature of the working material of the thermal accumulator in the upper layer; 2 – temperature of the working material of the thermal accumulator in the central layer; 3 - the temperature of the working material of the thermal accumulator in the lower layer

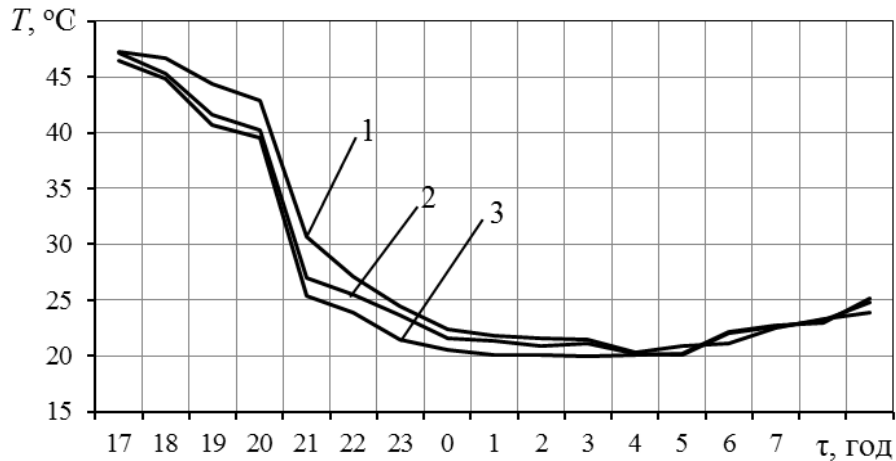


Рис. 5. Темп охолодження ТАМ: 1 – температура робочого матеріалу теплового акумулятора у верхньому шарі; 2 – температура робочого матеріалу теплового акумулятора в центральному шарі; 3 – температура робочого матеріалу теплового акумулятора в нижньому шарі
Fig. 5. Accumulator cooling rate: 1 – temperature of the working material of the thermal battery in the upper layer; 2 – temperature of the working material of the thermal accumulator in the central layer; 3 – the temperature of the working material of the thermal accumulator in the lower layer



Рис. 6. Робоче вікно програми TPara8
Fig. 6. Working window of the TPara8 program

Для вимірювання температури навколишнього середовища, теплоносія, ТАМ використовували вісім термоопорів Pt 100. Як реєструвальний прилад використовували електронний цифровий мікровольтметр регулятор-вимірювач РТ-0102-8.

Під час здійснення цієї операції через персональний комп'ютер (ПК) достатньо на вікні програми *TPara8* (рис. 6) ініціювати функцію

Змінити уставки

У вікні, яке з'явиться, відзначити «галочками» потрібні нам порти, натиснути «применить», після чого підтвердити законність втручання набором коду зміни параметрів. Надалі відбувається по чергове опитування ввімкнених вимірювальних каналів з індикацією результатів на панелі приладу та побудовою графічних залежностей у робочому вікні монітора в режимі реального часу.

Для перегляду вимірювальної інформації в текстовому варіанті потрібно: вибрати

Архіви → Перегляд → «Перегляд архівів (прилад № 1)» і отримуємо інформацію до спостереження. Для її збереження виконуємо такі дії: Архіви → Текстовий файл → «Сохранить как ...». Зберігаємо як текстовий документ, інформацію з якого надалі можемо обробляти в різних програмах (MathCad, Origin, Excel та ін.).

Після завершення дослідження зберігаємо дані на ПК. Функцією Архіви → База даних → «Сохранить как ...» → вибираємо тип файла і місце, де потрібно зберегти. Щоб зберегти отриману графічну інформацію, потрібно правою клавішею маніпулятора (миші) клацнути у вікні графічної інформації в програмі *TParad*. Отримані графіки можна переглядати в різних часових інтервалах (задається через функцію «часова вісь», що знаходиться у функції Конфігурація), після чого потрібні частини зберігаються або графік у цілому.

Графічні матеріали розподілу температурного градієнта вздовж шару ТАМ можна зберігати у вигляді кольорових ліній на чорному фоні, як це видно на рис. 6 або інверсному (рис. 7), де кольорові лінії видно на білому фоні. Для інверсування зображення потрібно завести стрілку «мишки» на поле рисунка і клацнути правою клавішею. У вікні, що відкривається, клацнути на потрібному написі «інверсія» і «збереження» у вигляді файла.



Рис. 7. Інверсне зображення графічного матеріалу
Fig. 7. Inverse image of graphic material

Після завершення вимірювань потрібно спочатку вийти з програми, вимкнути живлення пристрою і від'єднати його від ПК.

Наведений вище опис дає змогу проаналізувати роботу насадного теплового акумулятора з твердим ТАМ із пористою структурою в геліотермічній установці та описати в реальному часі піки температурних градієнтів у режимах зарядки та розрядки, що дозволяє розрахувати основні параметри, обґрунтувати конструкції акумулятора, що нагрівається сонячним випромінюванням та дає змогу суміжно збільшити енергоефективність геліотермічної установки. Наприклад, у конвективній геліосушарці можливо в денний час стабілізувати теплофізичні параметри сушильного агента, а в нічний час забезпечується процес сушіння фруктів.

Висновки

1. Отримано математичну модель, за допомогою якої можна розрахувати значення поглинання температурного градієнта в умовах нерухомого пористого шару гальки і регламентувати глибину проникнення теплового потоку для конкретного шару акумулятора, в якому відбуваються фазові перетворення.

2. Розроблено новий тип акумулятора з ТАМ для геліотермічної установки, який базується на використанні екологічно чистого і відновлюваного джерела теплової енергії (сонячного випромінювання та акумульованого тепла). Показано, що важливими чинниками оцінки ефективності акумулятора є спектральний склад поглиненого випромінювання (визначає швидкість нагрівання гальки), організація поля випромінювання за рахунок керування потоком теплоносія, властивостями досліджуваного матеріалу і нещільності середовища, стін та генераторів випромінювання (зміна умов теплообміну), геометричні параметри акумулятора.

3. Проаналізовано режими роботи теплового акумулятора. Визначено основні теплофізичні параметри ТАМ: у режимі зарядки температура T_{ma} становила $30,5 \div 45,6$ °C не менше ніж 6 годин, у режимі розрядки – $45,6 \div 20,9$ °C не більше ніж 7 годин; енергія, що відводиться від (підводиться до) теплового акумулятора, становила 615,4 кДж, а нагрівання ТАМ масою 50 кг на 1 °C дало змогу акумулювати 42,25 кДж/°C тепла.

4. Запропоновано методику інженерного розрахунку теплових полів для нерухомого пористого шару гальки та рекомендації щодо їх успішного використання в геліотермічній установці для забезпечення її роботи в нічний час та в умовах часткової хмарності неба. Вибір таких теплоакуюлюючих елементів передбачав дослідження тепло-

вого потоку в пористому шарі та енергії конвективного теплообміну. Встановлено, що найперспективнішим щодо використання як акумуляторів сонячної радіації в режимі температур 30... 50 °C є шар гальки з пористою структурою.

Бібліографічний список

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року. Біла книга енергетичної політики України «Безпека та конкурентоспроможність». Київ, 2015. 49 с.
2. Ермуратский В. В., Ермуратский В. В., Ермуратский П. В. Эффективность применения плоских рефлекторов в гелиоустановках. *Вестник Института энергетики АН Молдовы. Проблемы региональной энергетики*. 2015. Т. 1. С. 1-6.
3. Сажин Б. Н. Основы техники сушки: учеб. пособие. Москва: Химия, 1984. 320 с.
4. Шаргут Я. В., Петела Р. И. Эксергия: учеб. пособие. Москва: Энергия, 1968. 280 с.
5. Experimental performance and modeling of a greenhouse solar dryer for drying macadamia nuts / S. Janjai, C. Phusampao, W. Nilnont, P. Pankaew. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2014. Vol. 5, iss. 6.5. P. 1155-1161.
6. Korobka S., Babych M. Substiation of the constructive-technological parameters of a solar fruit dryer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1 (8). P. 13-19.
7. Manoj M., Manivaimair A. Simulation of solar dryer utilizing green house effect for cocoa bean drying. *International Journal of Advanced Engineering Technology*. 2013. Vol. 4, iss. 2. URL: <http://www.technicaljournalonline.com/ijeat/VOL%20IV/IJAET%20VOL%20IV%20ISSUE%20II%20APRIL%20JUNE%202013/Vol%20IV%20Issue%20II%20Article%207.pdf> (Last accessed: 12.08.2022).
8. Modeling of the motion of free convective drying agent in plastic helio dryer / Z. M. Khazimov, G. C. Bora, K. M. Khazimov, M. Z. Khazimov. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2014. Vol. 23, iss. 4. P. 306–315. doi: 10.1134/S1810232814040080.
9. Mohanraj M., Chandrasekar P. Performance of a forced convection solar drier integrated with gravel as heat storage for chili drying. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2009. Vol. 4, iss. 3. URL: https://www.researchgate.net/publication/49593948_Performance_of_a_forced_convection_solar_drier_integrated_with_gravel_as_heat_storage_material (Last accessed: 12.08.2022).
10. NASA Surface meteorology and Solar Energy. URL: <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid/cgi?uid=3030> (Last accessed: 28.07.2017).
11. Results of research into technological process of fruit drying in the solar / S. Korobka, M. Babych, R. Krygul, A. Zdobytshy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1(8). P. 64-73.
12. Review on the Application of a Tray Dryer System for Agricultural Products / S. Misha, S. Mat, M. H. Ruslan, K. Sopian, E. Salleh. *World Applied Sciences Journal*. 2013. Vol. 22, iss. 3. P. 424-433. doi: 10.5829/idosi.wasj.2013.22.03.343.
13. Thermal and physical properties modelling of terebinth fruit (*Pistacia atlantica* L.) under solar drying / Kaveh M., Amiri Chayjan R., Esna-Ashari M. *Research in Agricultural Engineering*. 2015. Vol. 61, iss. 4. P. 150-161. doi: 10.17221/45/2013-RAE.
14. Thin layer drying model for simulating the drying of tilapia fish in a solar tunnel dryer / G. M. Kituu, D. R. Shitanda., C. L. Kanali, J. T. Mailutha. *Journal of Food Engineering*. 2010. Vol. 98, iss. 3. P. 325-331. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2010.01.009.
15. Urmashv B. A., Danaev N. T., Darybaev B. S. On a Problem of Thermal Convection with Unset Flow Rate. *IECMSA-2012: 1st International Eurasian Conference on Mathematical Sciences and Applications*. Prishtine, 2012. P. 309.

Стаття надійшла 17.08.2022