

УДК 661.85: 62-192

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2026.1\(503\).1.21](https://doi.org/10.15589/znп2026.1(503).1.21)EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A HYBRID HEAT STORAGE SYSTEM
WITH AN UNDERGROUND CHANNEL AND PCMЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ
НАКОПИЧЕННЯ ТЕПЛА З ПІДЗЕМНИМ КАНАЛОМ І PCM

Igor O. Pysarevskyi

ori@ukr.net

ORCID: 0009-0007-3920-9601

Ihor I. Mukminov

fatalrew@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3674-9289

І. О. Писаревський,

аспірант

І. І. Мукмінов,

доктор філософії

*Odesa National University of Technology, Odesa**Одеський національний технологічний університет, м. Одеса*

Abstract. Purpose. The study aims to experimentally investigate the daily thermal regime of a greenhouse equipped with a hybrid thermal energy storage system combining sensible heat storage (SHS) in a gravel-filled underground channel and latent heat storage using a phase-change material (PCM) based on modified paraffin with a melting temperature of 35 °C.

Method. A dual-circuit heat carrier system with separate daytime charging and nighttime discharging modes was implemented. Experimental studies were conducted for three underground channel lengths (0.2, 0.5, and 1.0 m). Continuous measurements included indoor and outdoor air temperatures, water temperatures at key circuit points, temperature at the center of the gravel layer, paraffin temperature in floor-mounted tubes, and solar radiation intensity. Temperature profiles were approximated using GaussAmp functions for heating and cooling processes and a BiHill function for solar radiation dynamics.

Results. The approximation error did not exceed 3–4% for temperature processes and 6–7% for solar radiation, confirming the adequacy of the analytical approach. During daytime operation, excess solar heat was effectively stored in the gravel layer, with water temperature differences of 8–12 °C across the channel. At night, accumulated heat was transferred to the greenhouse interior through floor pipes, while paraffin underwent phase transition, stabilizing indoor air temperature. Increasing channel length significantly prolonged nighttime thermal retention and reduced the cooling rate; the 1.0 m configuration maintained indoor temperature above 20 °C for up to 12.7 hours.

Scientific novelty. The study experimentally substantiates the synergistic interaction between SHS and PCM within a dual-mode circulation system and quantifies the influence of underground channel length on transient thermal behavior.

Practical importance. The results provide a basis for optimizing geometric and operational parameters of hybrid thermal storage systems in energy-efficient greenhouses.

Key words: greenhouse; heat storage; gravel thermal accumulator; phase-change material; paraffin; daily thermal regime; energy efficiency.

Анотація. Мета. Метою роботи є експериментальне дослідження добового теплового режиму теплиці з гібридною системою акумулювання теплоти, що поєднує акумулювання відчутної теплоти у підземному щебеневому каналі та акумулювання прихованої теплоти за рахунок фазозмінного матеріалу на основі модифікованого парафіну з температурою плавлення 35 °C.

Методика. Реалізовано двоконтурну систему циркуляції теплоносія з розділеними денним режимом акумулювання та нічним режимом тепловіддачі. Експериментальні дослідження виконано для трьох довжин підземного каналу (0,2; 0,5; 1,0 м). Здійснювалась безперервна реєстрація температур повітря всередині та зовні теплиці, температур води у характерних точках контурів, температури в центрі щебеневого шару, температури парафіну в підлогових трубках та інтенсивності сонячного випромінювання. Температурні залежності апроксимовано функціями типу GaussAmp, а зміну сонячного випромінювання – функцією BiHill.

Результати. Похибка апроксимації не перевищувала 3–4% для температурних процесів і 6–7% для сонячного потоку, що підтверджує адекватність моделі. У денний період надлишкова теплота ефективно акумулюється

у щелезовому шарі, при цьому різниця температур води на вході та виході з каналу становить 8–12 °С. У нічний період теплота передається у внутрішній об'єм теплиці через підлогові трубки, а парафін проходить фазовий перехід, стабілізуючи температурний режим. Збільшення довжини каналу подовжує тривалість нічного утримання температури та зменшує швидкість охолодження; для довжини 1,0 м температура повітря перевищувала 20 °С до 12,7 год.

Наукова новизна. Експериментально обґрунтовано синергетичну взаємодію акумулювання відчутної та прихованої теплоти в двоконтурній системі та кількісно визначено вплив довжини підземного каналу на нестационарні теплові процеси.

Практична значимість. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації геометричних і режимних параметрів гібридних систем теплового акумулювання в енергоефективних тепличних спорудах.

Ключові слова: теплиця; акумулювання теплоти; щелезовий акумулятор; фазозмінний матеріал; парафін; добовий тепловий режим; енергоефективність.

ВСТУП

Сучасне тепличне господарство стикається з високою добовою амплітудою температур. У сонячні години теплиця може перегріватися, уночі – швидко втрачати теплоту. Зменшення температурних коливань важливе для стабільності мікроклімату й енергоефективності. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є застосування теплових акумуляторів, які накопичують сонячну енергію вдень і віддають її вночі. При цьому використовують два принципово різні підходи:

Акумулятори відчутної теплоти (SHS) – матеріали з великою теплоємністю (гравій, каміння, вода), які при нагріванні підвищують температуру, зберігаючи запас внутрішньої енергії. Недолік такого підходу – необхідність значного об'єму для суттєвої кількості енергії.

Фазозмінні матеріали (PCM) – речовини, у яких теплота накопичується під час фазового переходу. Парафіни належать до найпоширеніших PCM; їхня латентна теплота плавлення часто у 7–10 разів перевищує запас відчутної теплоти в традиційних матеріалах.

В більшості досліджень наведені підходи розглядаються окремо, що не дає можливості реалізувати їх переваги одночасно. У другій роботі, яку аналізуємо, запропоновано гібридну схему: денний контур нагріває й заряджає теплоізований підземний канал зі щелевом (SHS), а вночі теплота від щелеву передається воді, яка циркулює через трубки на підлозі, де розміщені трубки з парафіном (PCM). Така система дозволяє підтримувати парафін у діапазоні фазового переходу й подовжити нічну тепловіддачу.

У даному дослідженні метою є розширене обґрунтування та кількісний аналіз цієї системи: описати фізичні процеси, виконати енергетичні оцінки для різних довжин підземного каналу, порівняти акумуляційну здатність SHS та PCM, а також обґрунтувати практичну значимість для тепличних господарств.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В останні роки спостерігається зростання інтересу до ефективного використання низькопотенційної

теплової енергії [1–3]. Одним із перспективних напрямів у цьому контексті є застосування сонячних теплових акумуляторів, які забезпечують вирівнювання нерівномірності надходження теплоти та формування стабільнішого температурного режиму в теплицях [4]. Аналіз наукових джерел свідчить, що найбільш поширеним підходом є поєднання сонячних теплових систем із акумулюючими пристроями короткострокової та сезонної дії [5–7]. Використання теплових акумуляторів сонячної енергії у тепличних спорудах розглядається як один із ефективних способів підвищення енергоефективності та зменшення залежності від традиційних джерел теплопостачання [8, 9]. Разом із тим практична реалізація таких систем супроводжується низкою технічних, економічних і експлуатаційних обмежень.

У низці досліджень розглядаються системи, у яких надлишкова сонячна теплота, накопичена протягом денного періоду, використовується в нічний час, що дозволяє істотно зменшити споживання традиційних енергоносіїв [10, 11]. Значну увагу приділено вибору матеріалів для акумулювання теплоти [12]. Традиційні теплоакумулюючі середовища, зокрема вода, камінь і бетон, характеризуються відносно невисокою питомою теплоємністю, що зумовлює збільшення габаритів акумуляторів [14, 15]. У сучасних дослідженнях активно вивчаються матеріали з фазовим переходом, які відзначаються високою щільністю накопичуваної теплової енергії та дають змогу зменшити розміри акумулюючих пристроїв [16–18]. Підкреслюється, що такі матеріали забезпечують більш рівномірну віддачу теплоти в заданому температурному діапазоні, однак їх практичне застосування ускладнюється високою вартістю, обмеженою довговічністю, складністю підбору температури фазового переходу відповідно до кліматичних умов [19], а також недостатньою теплопровідністю, що знижує загальний енергетичний ефект системи. Значну увагу також приділено питанням конструктивної інтеграції теплових акумуляторів у тепличні споруди [21–23]. Показано, що нераціональне розміщення акумулюючих пристроїв може призводити до погіршення світлового режиму та зменшення корисної площі вирощування рослин [22].

Поєднання технологій накопичення теплоти з використанням матеріалів із фазовим переходом розглядається як ефективний підхід, що дозволяє акумулювати енергію в період її надлишкового надходження та використовувати у моменти дефіциту [23]. Такий підхід має очевидні переваги для подолання періодичності сонячної енергії.

Основною проблемою застосування теплових акумуляторів сонячної енергії в теплицях залишається нерівномірність надходження сонячної енергії протягом доби та сезону [23–24]. Технологія накопичення теплоти у поєднанні з матеріалами з фазовим переходом пропонує ефективне рішення, яке забезпечує можливість накопичення енергії під час її генерації та подальшого використання за потреби [25]. Це створює передумови для зменшення впливу періодичності сонячного випромінювання на тепловий режим теплиць.

Таким чином, застосування сонячних теплових акумуляторів у тепличних системах є складною багатфакторною задачею, що визначається обмеженнями сонячного ресурсу, теплофізичними властивостями акумулюючих матеріалів, конструктивними особливостями систем і економічними умовами їх експлуатації. Розв’язання цієї проблеми потребує оптимізації параметрів теплових акумуляторів, обґрунтованого вибору матеріалів і розроблення адаптивних систем керування тепловим режимом теплиць.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є експериментальне дослідження добового теплового режиму теплиці з гібридною системою акумулювання теплоти, що поєднує підземний теплоізолюваний щебеневий канал і фазозмінний акумулятор з модифікованим парафіном, а також визначення впливу довжини підземного каналу на температурну динаміку робочих середовищ у денному та нічному режимах роботи системи.

Об’єктом дослідження є добовий процес обміну теплоти в тепличній системі з підземним теплоізолюваним каналом, заповненим щебенем, та модифікованим парафіновим акумулятором (температура плавлення якого складала 35°C), що розташований у трубках на підлозі теплиці.

Предметом дослідження є температурні залежності повітря у теплиці, води в контурах, щебеню та парафіну упродовж двох діб для трьох варіантів довжини каналу.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Конструкція установки

Схема установки показана на рис. 1. Установка включає теплицю (1), під якою закладено теплоізолюваний канал зі щебенем (5). Канал утворює вертикальний рукав, через який тече вода. Над щебеневим каналом та всередині теплиці розташовані два окремі контури з насосами (7, 8):

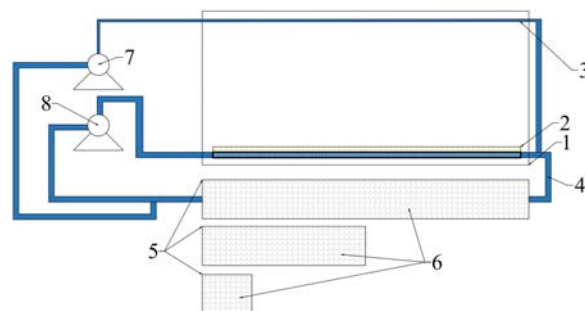


Рис. 1. Схема установки: 1 – корпус теплиці; 2 – трубка з парафіном; 3 – канал з водою (денний режим); 4 – канал з водою (нічний режим); 5 – підземні ізолювані канали для щебеню (1 м, 0,5 м, 0,2 м); 6 – шар щебеню; 7 – насос (денний режим); 8 – насос (нічний режим)

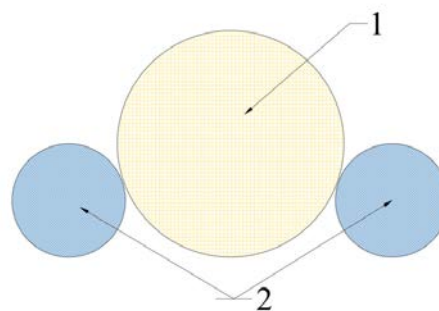


Рис. 2. Схема розташування трубок на підлозі теплиці. 1 – трубка з парафіном; 2 – трубки з водою

Денний контур: вода подається у трубки під стелею теплиці (3), нагрівається сонячним випромінюванням і через верхній отвір вливається у щебеневий канал (6). Протікаючи крізь засипку, вода віддає теплоту і повертається до насоса.

Нічний контур: інший насос (8) забирає воду з щебеневого каналу (6) й подає її у трубки, розташовані на підлозі (4). Між двома кожухами водяних трубок встановлено три трубки з парафіном (2), рис. 2. Діаметри водяних трубок становлять 1 см, а діаметр трубок з парафіном – 2 см. Вода, проходячи вздовж підлоги, віддає теплоту парафіну й повітрю теплиці, після чого повертається у щебеневий канал. При цьому парафін віддає своє тепло повітрю теплиці тим самим підтримуючи комфортну температуру всередині.

Довжина підземного каналу може змінюватись: 0,2 м; 0,5 м; 1,0 м. Для кожного варіанту проведено дві доби експерименту із безперервним вимірюванням температур.

Вимірювальні прилади та процеси

Для контролю процесів використовували температурні датчики MAX6675 з точністю 0,25 °C, встановлені у наступних точках:

- всередині теплиці та зовні (для порівняння);
- на вході та виході щебеневого каналу (подача й повернення денного контуру);
- у центрі щебеневі засипки;
- у трубках на підлозі (вздовж потоку води);

- у трубах з парафіном (безпосередньо в РСМ);
- у трубах під стелею;
- для вимірювання інтенсивності сонячного випромінювання застосовували датчик освітленості GY-302 BH1750FVI.

Збір даних здійснювали з використанням мікроконтролера (Arduino/ESP32) та зберігали у цифровій формі. Для кожної довжини каналу записувались температурні графіки за дві доби.

Аналітична обробка експериментальних даних

Отримані температурні криві апроксимували аналітичними функціями типу GaussAmp (добре підходить для опису піків нагрівання та охолодження) та ВіHill (для опису сонячного випромінювання). В табл. 1 наведено типи функцій і величини середньоквадратичних похибок. Похибки становлять 3–4% для температурних процесів та 6–7% для сонячного потоку.

Ці функції дозволили отримати гладкі залежності, необхідні для подальших розрахунків теплових потоків і енергетичних балансів.

Температурні режими повітря

На рис. 3–5 представлено добові зміни температури всередині теплиці, зовнішнього повітря та сонячного випромінювання для трьох довжин каналу. За цими графіками можна виділити характерні особливості:

Денні максимуми. Температура всередині теплиці регулярно перевищує температуру зовнішнього повітря на 20–25 °С; це свідчить про сильний парниковий ефект і потребу в акумулюванні надлишкового тепла.

Нічні мінімуми. Уночі внутрішня температура знижується до 19–21 °С для всіх довжин каналу, що є суттєво нижчим за денні значення.

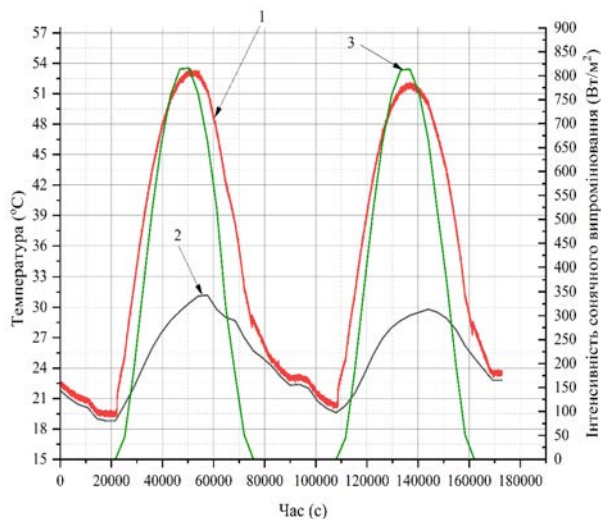


Рис. 3(а). Довжина каналу гравію – 0.2 м. 1 – Температура всередині теплиці; 2 – Температура навколишнього середовища; 3 – інтенсивність сонячного випромінювання

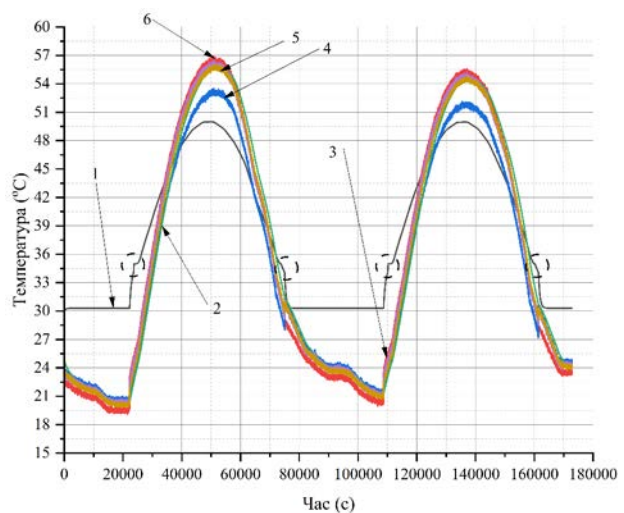


Рис. 3(б). Довжина каналу гравію – 0.2 м. 1 – температура парафіну в трубах; 2 – температура по центру каналу з щебнем; 3 – температура води на вході в канал з щебнем; 4 – температура води в трубах на підлозі теплиці (нічний цикл); 5 – температура води на виході з каналу з щебнем; 6 – температура води в трубі під стелею теплиці (денний цикл)

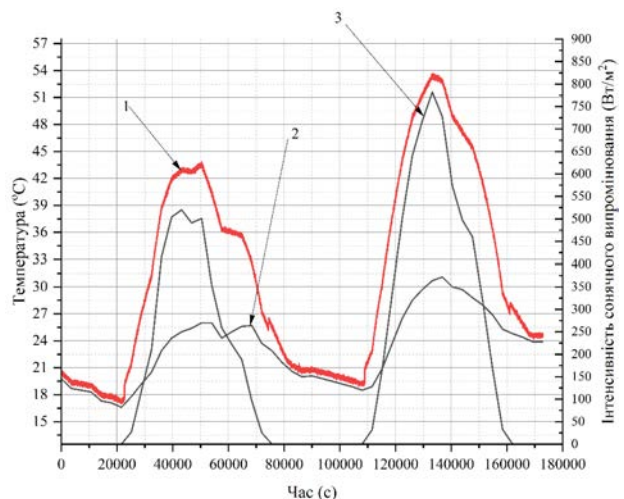


Рис. 4(а). Довжина каналу гравію – 0.5 м. 1 – Температура всередині теплиці; 2 – Температура навколишнього середовища; 3 – інтенсивність сонячного випромінювання

Таблиця 1. Підсумок емпіричних кривих змін температури та освітлення з плином часу

День	Процес	Аналітична функція L = 0.2 м	Тип функції	ε, %
1	Нагрів/ охолодження води у контурі	$t_{d1} = 22.5 + 34.4 \cdot \exp(-0.5 \cdot (\tau - 50970 / 13842.5)^2)$, °C	GaussAmp	3.2
2		$t_{d2} = 23.2 + 32.4 \cdot \exp(-0.5 \cdot (\tau - 137050 / 13833)^2)$, °C		3.6
1	Нагрів/ охолодження парафіну у трубах	$t_{i1} = 30.3 + 19.7 \cdot \exp(-0.5 \cdot (\tau - 136590 / 14386)^2)$, °C	GaussAmp	3.2
2		$t_{i2} = 30.2 + 19.8 \cdot \exp(-0.5 \cdot (\tau - 50290 / 14400)^2)$, °C		3.2
1	Нагрів/ охолодження шару щебня	$t_{u1} = 24.5 + 31.4 \cdot \exp(-0.5 \cdot (\tau - 51820 / 13070)^2)$, °C	GaussAmp	4.1
2		$t_{u2} = 24.2 + 30.4 \cdot \exp(-0.5 \cdot (\tau - 137690 / 13631)^2)$, °C		4.2
1	Інтенсивність сонячного випромінювання	$E_1 = 837.3 / (1 + (13395 / \tau)^{34.2}) / (1 + (\tau / 16297)^{43.7})$, Вт/м²	BiHill	7.3
2		$E_2 = 833 / (1 + (22035 / \tau)^{57.1}) / (1 + (\tau / 24980)^{64.4})$, Вт/м²		7.5
L = 0.5 м				
1	Нагрів/ охолодження води у контурі	$t_{d1} = 20.4 + 26.3 \cdot \exp(-0.5 \cdot (\tau - 50310 / 13285)^2)$, °C	GaussAmp	3.3
2		$t_{w2} = 22.5 + 34.7 \cdot \exp(-0.5 \cdot (\tau - 133430 / 12925)^2)$, °C		3.3
1	Нагрів/ охолодження парафіну у трубах	$t_{i1} = 30.2 + 15.6 \cdot \exp(-0.5 \cdot (\tau - 43330 / 14047)^2)$, °C	GaussAmp	3.1
2		$t_{i2} = 30.3 + 19.6 \cdot \exp(-0.5 \cdot (\tau - 133430 / 13756)^2)$, °C		3.0
1	Нагрів/ охолодження шару щебня	$t_{u1} = 24.5 + 31.4 \cdot \exp(-0.5 \cdot (\tau - 51820 / 13070)^2)$, °C	GaussAmp	3.9
2		$t_{u2} = 24.2 + 30.4 \cdot \exp(-0.5 \cdot (\tau - 137690 / 13631)^2)$, °C		4.1
1	Інтенсивність сонячного випромінювання	$E_1 = 587.3 / (1 + (33486 / \tau)^{10.4}) / (1 + (\tau / 57534)^{10.1})$, Вт/м²	BiHill	6.9
2		$E_2 = 771 / (1 + (119928 / \tau)^{34.6}) / (1 + (\tau / 148207)^{30.6})$, Вт/м²		6.8
L = 1.0 м				
1	Нагрів/ охолодження води у контурі	$t_{d1} = 21.2 + 34.7 \cdot \exp(-0.5 \cdot (\tau - 49300 / 13397)^2)$, °C	GaussAmp	3.3
2		$t_{d2} = 21.5 + 33.1 \cdot \exp(-0.5 \cdot (\tau - 136590 / 12806)^2)$, °C		3.3
1	Нагрів/ охолодження парафіну у трубах	$t_{i1} = 30.2 + 19.8 \cdot \exp(-0.5 \cdot (\tau - 48310 / 14444)^2)$, °C	GaussAmp	3.1
2		$t_{i2} = 30.3 + 19.2 \cdot \exp(-0.5 \cdot (\tau - 136800 / 13784)^2)$, °C		3.2
1	Нагрів/ охолодження шару щебня	$t_{u1} = 24.9 + 28.2 \cdot \exp(-0.5 \cdot (\tau - 56560 / 12508)^2)$, °C	GaussAmp	4.2
2		$t_{u2} = 25.4 + 25.4 \cdot \exp(-0.5 \cdot (\tau - 141110 / 11819)^2)$, °C		4.1
1	Інтенсивність сонячного випромінювання	$E_1 = 818 / (1 + (33528 / \tau)^{10.8}) / (1 + (\tau / 63731)^{19.96})$, Вт/м²	BiHill	7.2
2		$E_2 = 783 / (1 + (120260 / \tau)^{30.7}) / (1 + (\tau / 148568)^{41})$, Вт/м²		6.5

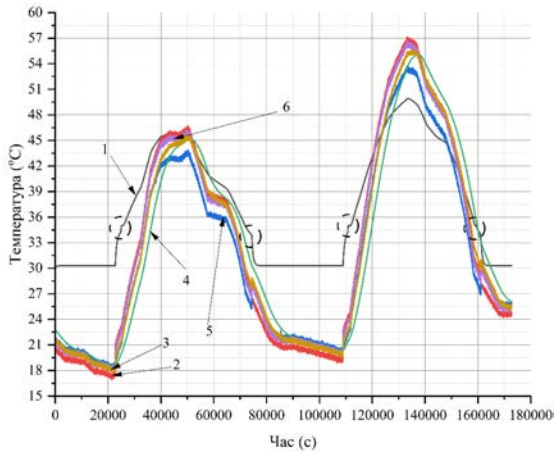


Рис. 4(б). Довжина каналу гравію – 0.5 м. 1 – температура парафіну в трубках; 2 – температура води в трубці під стелею теплої (денний цикл); 3 – температура води на виході з каналу з щебенем; 4 – температура по центру каналу з щебенем; 5 – температура води в трубках на підлозі теплої (нічний цикл); 6 – температура води на вході в канал з щебенем

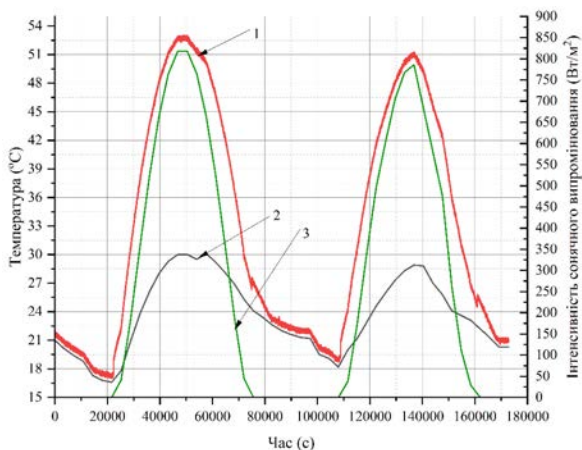


Рис. 5(а). Довжина каналу гравію – 1.0 м. 1 – Температура всередині теплої; 2 – Температура навколишнього середовища; 3 – інтенсивність сонячного випромінювання

Вплив довжини каналу. Більш довгий канал сприяє рівномірнішому нічному режиму, адже велика маса щебеню віддає тепло повільніше. Короткий (0,2 м) канал швидко охолоджується, тому температура у підлозі та парафіні спадає швидше, ніж у випадках 0,5 м та 1,0 м.

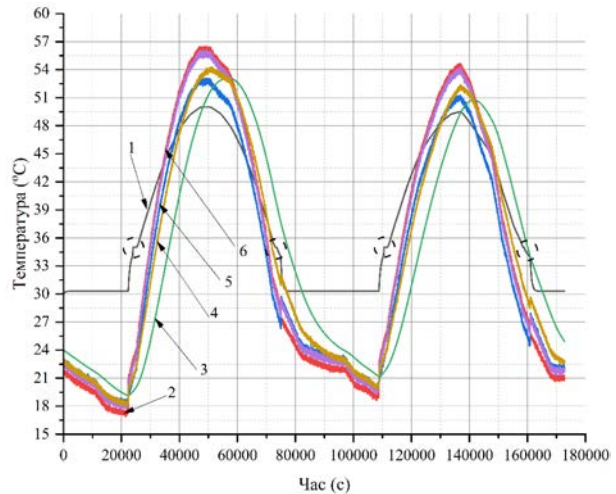


Рис. 5(б). Довжина каналу гравію – 1.0 м. 1 – температура парафіну в трубках; 2 – температура води в трубці під стелею теплої (денний цикл); 3 – температура по центру каналу з щебенем; 4 – температура води на виході з каналу з щебенем; 5 – температура води в трубках на підлозі теплої (нічний цикл); 6 – температура води на вході в канал з щебенем

В узагальненому вигляді основні температурні характеристики наведені в таблиці 2.

На рис. 5–7 показані зміни температур у різних точках системи: парафінові трубки, центр щебеневого каналу, водяні трубки підлоги та стелі. Виявлені ключові ефекти:

– *Фазовий перехід парафіну.* Для всіх довжин каналів крива температури парафіну має характерну “плато” в діапазоні 34–36 °С, що відповідає плавленню / кристалізації. Цей інтервал відзначено на графіках. Тривалість перебування у фазовому переході залежить від довжини каналу: чим довший канал і більший запас відчутної теплоти у щебені, тим довше парафін залишається у стані плавлення.

– *Денний заряд щебеню.* Денні температури води на вході в канал і в його центрі досягають 52–57 °С. Різниця температур між входом і виходом становить 8–12 °С, що підтверджує високу тепловіддачу води щебеню.

– *Нічна віддача.* Уночі вода нагрівається в каналі до 35–38 °С та проходить через підлогові трубки, віддаючи тепло підлозі та парафіну. Температура парафіну поступово падає до 30–32 °С, але стабілізується завдяки тепловій підтримці від води.

Таблиця 2. Узагальнені основні температурні характеристики теплої за дні експерименту

	Довжина каналу					
	0.2 м		0.5 м		1.0 м	
	День експерименту					
	1	2	1	2	1	2
Максимум всередині теплиці, °С	52.8	51.3	43.4	53.1	54.6	52.7
Максимум зовні теплиці, °С	33.0	29.6	32.6	31.2	33.0	30.6
Мінімуми всередині за ніч між днями, °С	20.2		21.8		20.0	
Мінімуми зовні за ніч між днями, °С	19.5		20.0		18.3	
Скільки годин від «заходу сонця» (коли сонячне випромінювання падає до ~0) до мінімуму температури всередині за ніч між днями	9.1		10.1		14.5	
Середня швидкість охолодження, °С/год	1.49		1.28		1.15	
Скільки годин за ніч всередині трималася температура не нижче 20°С	9.9		10.5		12.7	

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Порівняння запасу енергії в щебені та парафіні

Аби оцінити, наскільки більше теплоти може зберігати щебеневий канал порівняно з парафіновим акумулятором, введемо прості оцінки. Нехай:

– *Секція підземного каналу* має площу поперечного перерізу S (м²) і довжину L (м). Канал заповнений щебенем із середньою щільністю $\rho_{щ} = 1600$ кг/м³ та питомою теплоємністю $c_{рщ} = 0.8$ кДж/кг·°C.

– *Трубки з парафіном*: кількість трубок $n = 3$, діаметр кожної трубки $d = 0.02$ м. Парафін має щільність $\rho_n = 800$ кг/м³, питому теплоємність $c_{рп} = 2.0$ кДж/кг·°C і латентну теплоту плавлення $L_n = 180$ кДж/кг. Температурний діапазон зміни для порівняння $\Delta T = 10$ °C.

Для зручності порівняння розглянемо питому енергію на одиницю довжини каналу ($L=1$ м) та візьмемо площу каналу $S = 0.1$ м² (що відповідає поперечному розміру приблизно $0,3 \times 0,3$ м). Розрахуємо орієнтовні значення:

Енергія у щебені за рахунок відчутної теплоти:

$$Q_{щ} = \rho_{щ} \cdot c_{рщ} \cdot S \cdot L \cdot \Delta T \quad (1)$$

$$Q_{щ} = 1600 \cdot 0.8 \cdot 0.1 \cdot 1 \cdot 10 = 1280, \text{ кДж}$$

Енергія у парафіні (три трубки) складається з відчутної та латентної складових:

$$Q_n = n \cdot \rho_n \cdot S \cdot L \cdot (c_{рп} \cdot \Delta T + L_n) \quad (2)$$

$$Q_n = 3 \cdot 800 \cdot 0.000314 \cdot 1 \cdot (2.0 \cdot 10 + 180) = 151, \text{ кДж}$$

Тобто, за однакової довжини каналу 1 м і поперечного перерізу 0,1 м², запас енергії у щебені виявляється в 8–9 разів більшим за запас енергії в парафіні. Це добре узгоджується з експериментальним висновком, що об'ємний (або масивний) матеріал (щебінь) забезпечує значно більшу відчутну енергію, тоді як РСМ дає концентровану віддачу, але на триваліший час, що забезпечує більш стабільну температуру всередині теплиці.

Енергетичний баланс добового циклу

Розглянемо спрощений енергетичний баланс одного добового циклу. Денна енергія, що надходить від сонячного випромінювання, частково поглинається повітрям теплиці, частково – водою у денному контурі та передається щебеневому шару. Нічна енергія виділяється за рахунок охолодження щебеню та кристалізації парафіну. Рівняння балансу у скалярній формі:

$$Q_{\text{день}} = Q_{щ} + Q_n + Q_{\text{пов}} + Q_{\text{г}}, \quad (3)$$

$$Q_{\text{ніч}} = Q_{щ} + Q_n - Q_{\text{г}}.$$

де: $Q_{\text{день}}$ – сумарна теплова енергія сонячного випромінювання за день, $Q_{\text{день}}$ – сумарна теплова енергія, що віддавалася вночі, $Q_{\text{в}}$ – втрати тепла через огороження, теплоізоляцію та теплопровідність ґрунту $Q_{щ}$ та Q_n – енергія, накопичена відповідно у щебені та парафіні, $Q_{\text{пов}}$ – теплова енергія, що пішла на нагрів повітря всередині теплиці.

З експерименту випливає, що втрати становлять менше 15% (канал ізольований), тому можна оцінити

сумарний накопичений запас як $0.85Q_{\text{день}}$. Частка, що припадає на щебінь, приблизно у 7–9 разів більша, ніж на парафін. Тож у наближенні можна вважати:

$$Q_{щ} \approx 0.88Q_{\text{з}}, \quad (4)$$

$$Q_n \approx 0.12Q_{\text{з}}.$$

Де: $Q_{\text{з}}$ – сумарна накоплена теплова енергія.

Ці співвідношення можна використовувати при проектуванні: якщо необхідно збільшити тривалість нічного підігріву, можна або збільшити довжину щебеневого каналу, або збільшити кількість парафінових трубок.

Основні закономірності

1. *Синергія SHS + PCM*. Комбінування щебеню та парафіну дозволяє використовувати переваги обох: масивний матеріал накопичує більшу частину енергії, а РСМ забезпечує плавну тепловіддачу без різких змін температури.

2. *Вплив довжини каналу*. Збільшення довжини підземного каналу підвищує масу щебеню й пропорційно збільшує запас відчутної теплоти. Це призводить до менших добових перепадів температури на виході каналу й до більш тривалої підтримки парафіну в зоні фазового переходу. Ефект проявляється як стабілізація нічної температури в теплиці.

3. *Фазовий перехід*. Парафін завдяки високій латентній теплоті забезпечує значну тепловіддачу у вузькому температурному діапазоні. Проте без підживлення теплотою від щебеню парафін кристалізувався б за 1–2 години після заходу сонця. Теплова підтримка водяного контуру подовжує цей процес до 4–6 годин, що відображено на плато температурних кривих.

Практичні рекомендації

– При проектуванні теплиць із гібридним акумулятором доцільно оптимізувати довжину щебеневого каналу: для невеликих теплиць досить 0,5 м, що забезпечує помітний ефект при відносно малих об'ємах робіт з монтажу.

– Кількість та діаметр парафінових трубок можуть варіюватись залежно від потреб. Збільшення діаметру до 3–4 см або встановлення більшої кількості трубок збільшить запас латентної теплоти.

ВИСНОВКИ

1. Розроблена гібридна система акумулювання теплоти демонструє ефективне поєднання відчутної та латентної теплоємності. Її впровадження може підвищити енергоефективність теплиць, забезпечивши комфортний мікроклімат навіть у періоди різких добових коливань температури.

2. Простий розрахунок показує, що запас теплоти у щебені в кілька разів перевищує запас теплоти у парафіні для однакових геометричних параметрів, тому саме щебінь є основним джерелом енергії уночі. Парафін, у свою чергу, відіграє роль стабілізатора температури, зменшуючи швидкість зниження.

3. Подальші дослідження можуть зосередитися на оптимізації гідродинаміки, використанні інших РСМ

з різними температурами плавлення, а також на математичному моделюванні, яке враховуватиме теплові втрати через огороження, радіаційний обмін та вплив погоди.

Acknowledgments

Дослідження виконано завдяки фінансуванню Національного фонду досліджень України у рамках

проекту «Вирішення фундаментальних проблем створення нового покоління термоакумулювальних наноматеріалів для накопичення теплоти сонячної енергії та теплових відходів (теплофізичні властивості, теплообмін)» (реєстраційний номер 2025.07/0417).

REFERENCES

- [1] Ji, D., Liu, G., Romagnoli, A., Rajoo, S., Besagni, G., & Markides, C. N. (2024). Low-Grade Thermal Energy Utilization: Technologies and Applications. *Applied Thermal Engineering*, 122618. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.122618.
- [2] Schwarzmayer, P., Birkelbach, F., Wal-ter, H., & Hofmann, R. (2023). Standby Efficiency and Thermocline Degradation of a Packed Bed Thermal Energy Storage: An Experimental Study. *Applied Energy*, 337, 120917. doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120917.
- [3] Audu, G. A., Mafo, A. R., Jegede, R. E., Tarasenko, M., & Kozak, K. (2025). Advances in Energy Storage Technologies for Renewable Energy Systems: Bridging Inter-Mittency and Sustainable Integration. *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*, 9(2), 79–96. doi: 10.69912/2616-8537.1243.
- [4] Suresh, C., & Saini, R. P. (2020). Thermal Performance of Sensible and Latent Heat Thermal Energy Storage Systems. *International Journal of Energy Research*, 44(6), 4743–4758. doi: 10.1002/er.5255.
- [5] Bazgaou, A., Fatnassi, H., Bouhar-roud, R., Elame, F., Ezzaeri, K., Gourdo, L., Wifaya, A., Demrati, H., Tiskatine, R., Bekkaoui, A., Aharoune, A., & Bouirden, L. (2020). Performance Assessment of Combining Rock-Bed Thermal Energy Storage and Water Filled Passive Solar Sleeves for Heating Canarian Green-House. *Solar Energy*, 198, 8–24. doi: 10.1016/j.solener.2020.01.041.
- [6] Katekar, V. P., Rao, A. B., & Sardesh-pande, V. R. (2023). An Experimental Investigation to Optimise Pebbles-Based Sensible Heat Storage System: An exploration to Improve Thermal Efficiency of Solar Devices. *Journal of Energy Storage*, 73, 108964. doi: 10.1016/j.est.2023.108964.
- [7] Olivkar, P. R., Katekar, V. P., Deshmukh, S. S., & Palatkar, S. V. (2022). Effect of Sensible Heat Storage Materials on the Thermal Performance of Solar Air Heaters: State-of-the-Art Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112085. doi: 10.1016/j.rser.2022.112085.
- [8] Peer, M. S., Cascetta, M., Migliari, L., & Petrollese, M. (2025). Nanofluids in Thermal Energy Storage Systems: A Comprehensive Review. *Energies*, 18(3), 707. doi: 10.3390/en18030707.
- [9] Bonachela, S., López, J. C., Grana-dos, M. R., Magán, J. J., Hernández, J., & Baille, A. (2020). Effects of Gravel Mulch on Surface Energy Balance and Soil Thermal Regime in an Unheated Plastic Green-House. *Biosystems Engineering*, 192, 1–13. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2020.01.010.
- [10] Cano-Pleite, E., Hernández-Jiménez, F., García-Gutiérrez, L. M., & Soria-Verdugo, A. (2023). Thermo-economic Optimization of a Novel Confined Thermal Energy Storage System Based on Granular Material. *Applied Thermal Engineering*, 120123. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120123.
- [11] Singh H., Saini R. P., Saini J. S. A Review on Packed Bed Solar Energy Storage Systems. *Renewable and Sustainable energy reviews*. 2010. Vol.14, no.3. P.1059–1069. doi: 10.1016/j.rser.2009.10.022.
- [12] Singh H., Saini R. P., Saini J. S. A review on packed bed solar energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14, no. 3. P. 1059–1069. doi: 10.1016/j.rser.2009.10.022.
- [13] Mastouri, H., Benhamou, B., & Hamdi, H. (2013). Pebbles Bed Thermal Storage for Heating and Cooling of Buildings. *Energy Procedia*, 42, 761–764. doi: 10.1016/j.egypro.2013.11.079
- [14] Faraj, K., Khaled, M., Faraj, J., Hachem, F., & Castelain, C. (2021). A Review on Phase Change Materials for Thermal Energy Storage in Buildings: Heating and Hybrid Applications. *Journal of Energy Storage*, 33, 101913. doi: 10.1016/j.est.2020.101913.
- [15] Zhang, Y., Guo, Y., Zhu, J., Yuan, W., & Zhao, F. (2024). New Advances in Materials, Applications, and Design Optimization of Thermocline Heat Storage: Comprehensive Review. *Energies*, 17(10), 2403. doi: 10.3390/en17102403.
- [16] Suresh, C., & Saini, R. P. (2020). An Experimental Study on the Performance Evaluation of a Combined Sensible-Latent Heat Thermal Energy Storage. *International Journal of Energy Research*. doi: 10.1002/er.6196.
- [17] Savytskyi M., Danishevskyy V., Bordun M. Accumulation of Solar Energy to Heat Greenhouses. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol.985. P.012013. doi: 10.1088/1757-899x/985/1/012013.
- [18] Bouadila, S., Lazaar, M., Skouri, S., Kooli, S., & Farhat, A. (2014). Assessment of the Greenhouse Climate with a New Packedbed Solar Air Heater at Night, in Tunisia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 31–41. doi: 10.1016/j.rser.2014.03.051.
- [19] Solodka, A., Volgusheva, N., Boshko-va, I., Titlov, A., & Rozhentsev, A. (2017). Investigation of Heat Exchange in a Blown Dense Layer of Granular Materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(8 (89)), 58–64. doi: 10.15587/1729-4061.2017.112217.
- [20] Mukminov, I., Volgusheva, N., Geor-giesh, C., & Boshkova, I. (2022). Experimental Study of a Pilot Unit of a Ground Regenerator for Greenhouses. *ScienceRise*, (2), 3–10. doi: 10.21303/2313-8416.2022.002411
- [21] Soussi, M., Chaibi, M. T., Buchholz, M., & Saghrouti, Z. (2022). Comprehensive Review on Climate Control and Cooling Systems in Greenhouses under Hot and Arid Conditions. *Agronomy*, 12(3), 626. doi: 10.3390/agronomy12030626.

- [22] Mao, Q., & Wang, Y. (2025). Recent Development of Thermal Heat Storage Technology Coupling with Phase change Material. *Journal of Energy Storage*, 139, 118739. doi: 10.1016/j.est.2025.118739.
- [23] Barannyk, L., Crepeau, J., Paulus, P., & Siahpush, A. (2018). Fourier-Bessel Series Model for the Stefan Problem with Internal Heat Generation in Cylindrical Coordinates. *У 2018 26th International Conference on Nuclear Engineering. American Society of Mechanical Engineers*. <https://doi.org/10.1115/icone26-81009>.
- [24] Boshkova, I., & Mukminov, I. (2022). Mathematical Modeling of the Heat Transfer Process in a Dense Blown Layer of Granular Material. *ScienceRise*, (6), 10–17. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2022.002825>.
- [25] Boshkova, I., Volgusheva, N., Solodka, A., Mukminov, I., & Bondarenko, O. (2020). Development of a Soil Regenerator with a Granular Nozzle for Greenhouses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(8 (106)), 14–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.210684>.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Ji, D., Liu, G., Romagnoli, A., Rajoo, S., Besagni, G., & Markides, C. N. (2024). Low-Grade Thermal Energy Utilization: Technologies and Applications. *Applied Thermal Engineering*, 122618. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.122618.
- [2] Schwarzmayer, P., Birkelbach, F., Wal-ter, H., & Hofmann, R. (2023). Standby Efficiency and Thermocline Degradation of a Packed Bed Thermal Energy Storage: An Experimental Study. *Applied Energy*, 337, 120917. doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120917.
- [3] Audu, G. A., Mafo, A. R., Jegede, R. E., Tarasenko, M., & Kozak, K. (2025). Advances in Energy Storage Technologies for Renewable Energy Systems: Bridging Intermittency and Sustainable Integration. *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*, 9(2), 79–96. doi: 10.69912/2616-8537.1243.
- [4] Suresh, C., & Saini, R. P. (2020). Thermal Performance of Sensible and Latent Heat Thermal Energy Storage Systems. *International Journal of Energy Research*, 44(6), 4743–4758. doi: 10.1002/er.5255.
- [5] Bazgaou, A., Fatnassi, H., Bouharroud, R., Elame, F., Ezzaeri, K., Gourdo, L., Wifaya, A., Demrati, H., Tiskatine, R., Bekkaoui, A., Aharoune, A., & Bouirden, L. (2020). Performance Assessment of Combining Rock-Bed Thermal Energy Storage and Water Filled Passive Solar Sleeves for Heating Canarian Green-House. *Solar Energy*, 198, 8–24. doi: 10.1016/j.solener.2020.01.041.
- [6] Katekar, V. P., Rao, A. B., & Sardesh-pande, V. R. (2023). An Experimental Investigation to Optimise Pebbles-Based Sensible Heat Storage System: An exploration to Improve Thermal Efficiency of Solar Devices. *Journal of Energy Storage*, 73, 108964. doi: 10.1016/j.est.2023.108964.
- [7] Olivkar, P. R., Katekar, V. P., Deshmukh, S. S., & Palatkar, S. V. (2022). Effect of Sensible Heat Storage Materials on the Thermal Performance of Solar Air Heaters: State-of-the-Art Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112085. doi: 10.1016/j.rser.2022.112085.
- [8] Peer, M. S., Cascetta, M., Migliari, L., & Petrollese, M. (2025). Nanofluids in Thermal Energy Storage Systems: A Comprehensive Review. *Energies*, 18(3), 707. doi: 10.3390/en18030707.
- [9] Bonachela, S., López, J. C., Grana-dos, M. R., Magán, J. J., Hernández, J., & Baille, A. (2020). Effects of Gravel Mulch on Surface Energy Balance and Soil Thermal Regime in an Unheated Plastic Green-House. *Biosystems Engineering*, 192, 1–13. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2020.01.010.
- [10] Cano-Pleite, E., Hernández-Jiménez, F., García-Gutiérrez, L. M., & Soria-Verdugo, A. (2023). Thermo-economic Optimization of a Novel Confined Thermal Energy Storage System Based on Granular Material. *Applied Thermal Engineering*, 120123. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120123.
- [11] Singh H., Saini R. P., Saini J. S. A Review on Packed Bed Solar Energy Storage Systems. *Renewable and Sustainable energy reviews*. 2010. Vol.14, no.3. P.1059–1069. doi: 10.1016/j.rser.2009.10.022.
- [12] Singh H., Saini R. P., Saini J. S. A review on packed bed solar energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14, no. 3. P. 1059–1069. doi: 10.1016/j.rser.2009.10.022.
- [13] Mastouri, H., Benhamou, B., & Hamdi, H. (2013). Pebbles Bed Thermal Storage for Heating and Cooling of Buildings. *Energy Procedia*, 42, 761–764. doi: 10.1016/j.egypro.2013.11.079
- [14] Faraj, K., Khaled, M., Faraj, J., Hachem, F., & Castelain, C. (2021). A Review on Phase Change Materials for Thermal Energy Storage in Buildings: Heating and Hybrid Applications. *Journal of Energy Storage*, 33, 101913. doi: 10.1016/j.est.2020.101913.
- [15] Zhang, Y., Guo, Y., Zhu, J., Yuan, W., & Zhao, F. (2024). New Advances in Materials, Applications, and Design Optimization of Thermocline Heat Storage: Comprehensive Review. *Energies*, 17(10), 2403. doi: 10.3390/en17102403.
- [16] Suresh, C., & Saini, R. P. (2020). An Experimental Study on the Performance Evaluation of a Combined Sensible-Latent Heat Thermal Energy Storage. *International Journal of Energy Research*. doi: 10.1002/er.6196.
- [17] Savytskyi M., Danishevskyy V., Bordun M. Accumulation of Solar Energy to Heat Greenhouses. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol.985. P.012013. doi: 10.1088/1757-899x/985/1/012013.
- [18] Bouadila, S., Lazaar, M., Skouri, S., Kooli, S., & Farhat, A. (2014). Assessment of the Greenhouse Climate with a New Packedbed Solar Air Heater at Night, in Tunisia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 31–41. doi: 10.1016/j.rser.2014.03.051.
- [19] Solodka, A., Volgusheva, N., Boshko-va, I., Titlov, A., & Rozhentsev, A. (2017). Investigation of Heat Exchange in a Blown Dense Layer of Granular Materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(8 (89)), 58–64. doi: 10.15587/1729-4061.2017.112217.

- [20] Mukminov, I., Volgusheva, N., Geor-giesh, C., & Boshkova, I. (2022). Experimental Study of a Pilot Unit of a Ground Regenerator for Greenhouses. *ScienceRise*, (2), 3–10. doi: 10.21303/2313-8416.2022.002411
- [21] Soussi, M., Chaibi, M. T., Buchholz, M., & Saghrouni, Z. (2022). Comprehensive Review on Climate Control and Cooling Systems in Greenhouses under Hot and Arid Conditions. *Agronomy*, 12(3), 626. doi: 10.3390/agronomy12030626.
- [22] Mao, Q., & Wang, Y. (2025). Recent Development of Thermal Heat Storage Tchnology Coupling with Phase change Material. *Journal of Energy Storage*, 139, 118739. doi: 10.1016/j.est.2025.118739.
- [23] Barannyk, L., Crepeau, J., Paulus, P., & Siahpush, A. (2018). Fourier-Bessel Series Model for the Stefan Problem with Internal Heat Generation in Cylindrical Coordinates. *Y 2018 26th International Conference on Nuclear Engineering. American Society of Mechanical Engineers*. <https://doi.org/10.1115/icone26-81009>.
- [24] Boshkova, I., & Mukminov, I. (2022). Mathematical Modeling of the Heat Transfer Process in a Dense Blown Layer of Granular Material. *ScienceRise*, (6), 10–17. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2022.002825>.
- [25] Boshkova, I., Volgusheva, N., Solodka, A., Mukminov, I., & Bondarenko, O. (2020). Development of a Soil Regenerator with a Granular Nozzle for Greenhouses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(8 (106)), 14–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.210684>.

© Писаревський І. О., Мукмінов І. І.

Дата першого надходження статті до видання: 13.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)