

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 620.91:536.24:631.544

Дослідження акумуляції теплоти сонячного випромінювання для тепличних господарств

І. І. Мукмінов¹✉, Н. В. Волгушева², І. Л. Бошкова³, І. О. Писаревський⁴¹⁻⁴Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна✉ e-mail: ¹fatalrew@gmail.comORCID: ¹<http://orcid.org/0000-0002-3674-9289>; ²<http://orcid.org/0000-0002-9984-6502>;³<http://orcid.org/0009-0009-5599-2709>; ⁴<http://orcid.org/0009-0007-3920-9601>

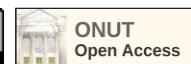
У статті аналізуються технології накопичення теплової енергії у явній формі (акумулятори ємнісного типу), та у прихованій формі при фазовому переході (плавленні та затвердінні). Наголошується, що основна проблема, що перешкоджає розкриттю повного потенціалу сонячних теплових технологій, пов'язана з тим, що джерело енергії має непостійний характер, та його ефективне використання залежить від наявності ефективних та продуктивних систем зберігання енергії. За результатами аналізу літературних даних встановлено, що тепличне виробництво є найбільш енергоємним та витратним видом сільськогосподарської галузі, тому все більше уваги приділяється пошуку проектних рішень для створення екологічних та енергоефективних теплиць. Наведено схему експериментальної установки, розробленої для проведення досліджень акумуляції теплоти сонячного випромінювання елементами ємнісного та фазоперехідного типу. Описано розроблену в роботі модульну систему автоматизованого збору, зберігання та передачі даних, що застосовується для безперервного моніторингу температури та освітленості. Наведено аналіз кривих зміни температур навколишнього середовища, повітря в макеті теплиці, модифікованого парафіну ТЗ у трубках-акумуляторах, усередненої температури частинок щебеню та води на виході з корпусу теплиці. Тривалість експерименту становила 2 доби, дані за температурами фіксувалися з інтервалом 10 с. Представлені результати розрахунку кількості теплоти, акумульованої щільним шаром щебеню в системі зберігання явного типу та кількості теплоти, акумульованої фазоперехідним матеріалом в системі зберігання прихованого типу. Визначено, що питома кількість теплоти, поглинена фазоперехідним матеріалом, у 7...9 разів більша у порівнянні із щільним шаром щебеню, проте використання системи зберігання теплоти прихованого типу пов'язане з проблемою встановлення акумуляторів в обсязі теплиці. Остаточний вибір системи накопичення теплоти прихованого чи явного типу залежить від вартості матеріалу, виготовлення системи, простоти конструкції та можливості інтеграції до теплиці.

Ключові слова: Накопичення теплової енергії; Щільний шар; Парафін; Фазовий перехід; Температура; Експеримент; Енергоефективність

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v62i1.3381>

© The Author(s) 2026. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

1. Вступ

Сучасні тепличні господарства характеризуються високою енергоємністю, значна частка якої припадає на опалення та підтримання стабільного

мікроклімату. В умовах зростання вартості традиційних енергоносіїв, обмеженості викопних ресурсів і посилення екологічних вимог особливої актуальності набуває впровадження енергоефективних та відновлюваних джерел енергії. Сонячне

випромінювання є одним із найбільш доступних і екологічно чистих джерел енергії для тепличних господарств, однак його нерівномірність у часі обмежує ефективність безпосереднього використання. Акумуляція теплоти сонячного випромінювання дозволяє зменшити добові та сезонні коливання температури в теплицях, скоротити споживання традиційних енергоресурсів і підвищити стабільність умов вирощування сільськогосподарських культур. Особливо перспективним є застосування матеріалів з високою теплоємністю або з використанням фазових переходів, що забезпечує ефективне накопичення та віддачу теплової енергії у необхідні періоди.

Технології накопичення теплової енергії розвиваються за двома напрямками: накопичення теплової енергії у явній формі (акумулятори ємнісного типу), що виражається у зміні температури матеріалу, або прихованої формі при фазовому переході, наприклад, плавленні або кипінні [1]. Акумулятори тепла ємнісного типу використовують теплоємність акумулятивного матеріалу. Матеріал акумулятора нагрівається (охолоджується) без зміни свого агрегатного стану [2]. Перевагами систем зберігання явного тепла є простота конструкції, помірна теплопровідність та нижча вартість акумулятивного матеріалу, однак вони мають обмеження у вигляді нижчої щільності зберігання енергії, що додатково збільшує розмір системи зберігання. Технології, що базуються на зберіганні тепла за рахунок теплоємності, застосовують доступні матеріали, такі як тверді породи у вигляді щебеню або каміння [3,4]. Система накопичення прихованої теплоти має такі переваги, як більш висока енергоємність, ізотермічність при розряді та компактний розмір. Але існує проблема низької теплопровідності матеріалу. Істотне збільшення теплопередачі можна досягти додаванням до фазоперехідного матеріалу наночастинок з вищою теплопровідністю [5]. Однак наголошується, що широке застосування їх створить екологічні проблеми. Неправильна утилізація може призвести до токсичності та завдати шкоди екосистемам. Таким чином, незважаючи на значний прогрес, досягнутий у розумінні теплофізичних властивостей та експлуатаційної ефективності наноречовин, зберігаються проблеми у досягненні довготривалої стабільності, мінімізації впливу на навколишнє середовище та підвищенні економічної ефективності. Дослідження процесів акумуляції теплоти сонячного випромінювання

для тепличних господарств є доцільним і науково значущим, оскільки сприяє підвищенню енергоефективності теплиць, зниженню експлуатаційних витрат та розвитку сталих агротехнологій. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації тепличних комплексів різного масштабу.

2. Сучасний стан питання ефективності використання систем зберігання теплової енергії

Для утилізації відпрацьованого тепла промислових процесів існують системи накопичення теплової енергії з щільним насадковим шаром гранульованих матеріалів. Ця система може використовуватися для зберігання надлишкового тепла та його вивільнення при необхідності [6,7]. Теплообмінники з гранульованим шаром успішно використовують у багатьох промислових областях [8]. Як система ТЕС для концентрованої сонячної електростанції у роботі [9] запропонована нова конфігурація з використанням шару з гранульованим матеріалом для зберігання явного тепла. Було виявлено, що оптимальні розміри шару сильно залежать від розміру частинок гранульованого матеріалу, оскільки цей параметр істотно впливає на падіння тиску рідини. Величина перепаду тиску газу, що протікає, має дуже важливе значення при проектуванні регенеративного теплообмінника або пристрою, що використовує шар упакованого або структурованого матеріалу. Домінуючими експлуатаційними витратами є витрати на перекачування циркулюючого повітря, які залежать від перепаду тиску через шар [10]. Огляд літератури показує, що потрібно більше інформації про те, які з порід каменю найкраще підходять для зберігання теплової енергії, оскільки різні автори дотримуються різних точок зору [11]. Для ефективного застосування технології накопичення енергії гранульованим матеріалом необхідно враховувати низку параметрів, такі як масштаб, час та період зберігання запасеної енергії, діапазон робочих температур, діапазон ємності, щільність енергії, час перезарядження [10]. Також одним із визначальних аспектів є розмір частинок, що становлять шар матеріалу. Падіння тиску можна зменшити, матеріал з частками великого розміру, проте при цьому можуть погіршитися теплові характеристики [12]. Акумулятори, засновані на фазовому переході, більш ефективні [13], ніж акумулятори ємнісного типу, оскільки мають значно більшу величину

ентальнії фазового переходу, ніж зміст. У системах TES зазвичай використовуються переходи тверде тіло-рідина. Однак ці акумулятори є дорогими. Класифікацію систем, що використовують приховану теплоту пароутворення, наведено в [14]. Температура плавлення, прихована теплота плавлення та теплофізичні властивості фазо переходного матеріалу (ФПМ) – три основні фактори, що впливають на вибір ПКМ для будь-якого застосування [15]. Було досягнуто численних механічних та нанотехнологічних удосконалень для підвищення швидкості теплопередачі, що є багатобічним. Більшість літератури присвячена стандартним і комерційно доступним ФПМ, таким як парафін.

Авторами [16] отримано, що комбінування явних та прихованих систем акумуляції теплової енергії (САТЕ) дозволяє використовувати характеристики різних матеріалів, компенсуючи недоліки продуктивності окремих матеріалів та покращуючи продуктивність THS.

Технології САТЕ, що дозволяють ефективно використовувати сонячне тепло та знижувати енергоспоживання будівель, представлені у роботі [17]. Описуються принципи роботи кількох методів накопичення енергії та розрахунку ємностей накопичувачів. Наголошується, що низька теплопровідність РСМ покращується шляхом додавання добавок для формування композитного ФПМ.

Основна проблема, що перешкоджає розкриттю повного потенціалу сонячних теплових технологій для опалення (або охолодження) приміщень та гарячого водопостачання, пов'язана з тим, що джерело енергії має непостійний характер, та його ефективне використання залежить від наявності ефективних та продуктивних систем зберігання енергії. [18, 19]. Інженерні рішення вимагають багатокритеріального аналізу компромісів, що ґрунтується на ключових показниках, таких як характеристики джерела тепла, споживана потужність, просторові обмеження за вагою та бюджетні витрати.

У [20] розглядаються різні матеріали та їх властивості, що використовуються для зберігання сонячної теплової енергії у формі явного, прихованого та термохімічного тепла. Економічний аспект систем зберігання сонячної теплової енергії безпосередньо пов'язаний із сумісністю конкретної сонячної системи та накопичувача.

Тепличне виробництво є найбільш енергоємним та витратним видом сільськогосподарської

галузі [21]. Тому все більше уваги приділяється пошуку проектних рішень для створення екологічних та енергоефективних теплиць.

Додаткові дослідження економічної доцільності впровадження акумуляторів сонячної енергії для використання в теплиці доводиться проводити в кожному конкретному випадку [21].

Застосування акумуляторів сонячної енергії для обігріву теплиць доводить перспективність [22, 23]. Підвищення ефективності акумуляції тепла сонячного випромінювання в теплицях є пріоритетним завданням [24]. Представляють науковий та практичний інтерес регенератори, де в якості акумуляційного тіла використовують щільний шар гранульованих (сипучих) матеріалів [25]. Завдяки розвиненій поверхні теплообміну, якою є сукупна поверхня всіх частинок в апараті, інтенсивність теплообміну суттєво зростає [26]. Подібні регенератори можна використовувати підтримки необхідного температурного рівня теплицях [27].

Метою роботи є пошук енергетично ефективних та конструктивно раціональних рішень задачі акумуляції теплоти сонячного випромінювання для тепличних господарств на основі експериментальних досліджень системи зберігання явного тепла (SHS) та прихованого тепла (LHS) з використанням матеріалу з фазовим переходом (PCM) у складі макета корпусу теплиці.

3. Матеріали та методи досліджень

Для дослідження ефективності роботи систем САТЕ було виготовлено та випробувано експериментальну установку у вигляді макета теплиці, що включає теплоакумуляційний шар щебеню для ємнісного накопичення теплової енергії та трубки з акумуляційним матеріалом, в якому здійснюється фазовий перехід тверде тіло-рідина, а також контрольно-вимірвальна апаратура. Схема експериментальної установки наведена на рис. 1. Основні її елементи включали макет корпусу 1 теплиці з габаритними розмірами 0,5x1,0x0,5 м, виконаного з акрилового скла; полімерні трубки 2 заповнені парафіном, розташовані безпосередньо на дні теплиці; теплоізолюваний канал 4 із щільним шаром щебеню 5; полімерна трубка 3 діаметром 2 см., що утворює замкнений контур, яким циркулює вода; насос 6, призначений для перекачування рідини.

Безпосередньо під дахом теплиці проходять

полімерні канали, якими протікає вода, яка вдень нагрівається під дією сонячного випромінювання і подається у вертикальний теплоізольований теплообмінний канал зі щебенем у верхню його частину. При обмиванні частинок щебеню здійснюється процес теплопередачі. На виході з теплообмінного каналу встановлений насос, який подає охолоджену воду до каналів під дах теплиці, де вона знову нагрівається. Таким чином, у системі акумуляції теплоти ємнісного типу організований циркуляційний контур з водою як проміжним теплоносієм. Доцільність вертикального розташування теплообмінного каналу із щебенем та включенням його в замкнутий контур циркуляції пояснюється необхідністю зниження втрат напору при проходженні теплоносія через щільний шар частинок. Як показали попередні дослідження ґрунтового регенератора [23], довжина теплообмінного каналу обмежується можливостями вентиляторів долати аеродинамічний опір шару частинок. Запропонована схема долає цю проблему: вода під дією гравітаційних сил переміщується вниз теплообмінної ділянки, при контакті з частинками шару здійснюється передача теплоти.

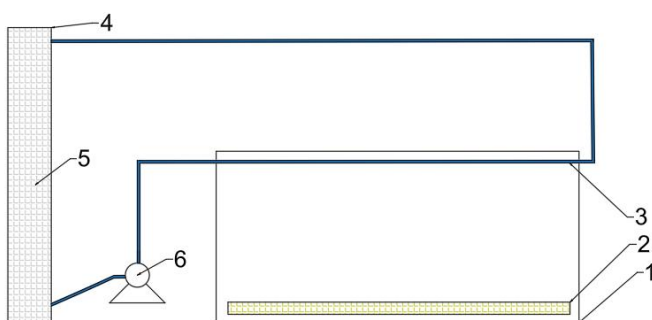


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки для дослідження ефективності акумуляції низькопотенційної теплоти сонячного випромінювання: 1 – макет корпусу теплиці; 2 – теплоаккумуляційний канал з модифікованим парафіном; 3 – циркуляційний нагрівальний контур з водою; 4 – теплообмінний канал; 5 – щільний шар щебеню; 6 – рідинний насос.

Для порівняльної оцінки САТЕ ємнісного типу та фазоперехідних САТЕ на ґрунті теплиці були розташовані трубки, заповнені модифікованим парафіном марки ТЗ. Доступні марки парафіну характеризуються температурою фазового переходу на рівні 50 °С і вище, що робить їх непридатними до використання як акумулювальний матеріал у тепличних господарствах. Для зниження темпера-

тури фазового переходу в розплавленій парафін ТЗ було додано вазелінову олію та гліцерин. В результаті температура плавлення знизилася до $t_{пл} = 35$ °С, при цьому питома теплота плавлення зменшилася.

В експерименті контролювалися наступні характеристики: температура води, що циркулює прозорим каналом на даху макета теплиці і нагрівається від сонячного випромінювання; температура шару щебеню у трьох точках по висоті теплообмінного каналу; температура парафіну в полімерних трубках; температура навколишнього середовища. Для вимірювання температури використовували термопари DS18B20. Інтенсивність сонячного випромінювання визначалася розрахунковим шляхом з урахуванням показань цифрового датчика освітлення GY-302 BH1750FVI. Для сонячного світла в ясний день рекомендовано використовувати приблизний коефіцієнт 120000 лк 1000 Вт/м².

Для забезпечення безперервного моніторингу температури та освітленості створена система автоматизованого збору, зберігання та передачі даних, основу якої складають контролер Arduino Mega 2560 R3, модуль ESP32 та мінікомп'ютер Raspberry Pi 5, що виконують різні, але взаємопов'язані функції. Управління насосом здійснюється автоматично на основі показань датчиків.

Система вимірів складається з наступних рівнів:

1. Сенсорний модуль – вимірювання фізичних параметрів середовища та теплоакуюлюючих матеріалів.
2. Контролерний модуль (Arduino Mega 2560 R3) – обробка та керування.
3. Серверний модуль (Raspberry Pi 5) – збирання, зберігання та візуалізація даних.
4. Енергетичний модуль – автономне живлення від сонячних панелей та акумулятора.

Об'єднання модулів в єдину систему дозволяє уникнути перевантаження одного пристрою, гарантує надійність (після відновлення зв'язку дані синхронізуються, що виключає втрату інформації), забезпечує гнучкість та масштабованість (можна додати нові датчики або підключити додаткові теплиці), підвищує енергоефективність та автономність завдяки живленню від сонячних панелей та сонячних панелей. Кожен вузол системи виконує своє чітко задане завдання – це спрощує обслуговування, ремонт та модернізацію системи.

Виміри всіх фізичних величин проводились з

інтервалом 10 с. Отримані дані використовуються для аналізу теплових процесів в окремих елементах установки (теплообмінному каналі, парафіні, повітрі у макеті теплиці), оцінці ефективності акумулювання теплоти та можливості її утилізації.

Енергетична підсистема на основі двох сонячних панелей по 100 Вт забезпечує автономне електроживлення всієї дослідницької установки. Сонячні панелі з'єднувалися паралельно, що забезпечувало підтримку напруги в діапазоні 12-18 при сумарному струмі до 11 А (при максимальній освітленості). Фото сонячних панелей, встановлених на даху лабораторії, представлено на рис. 2.



Рисунок 2 – Монокристалічні сонячні панелі, змонтовані на даху

Сонячна енергетична підсистема забезпечує стабільне електроживлення всіх вузлів системи (Arduino, ESP32, Raspberry Pi 5, насос); цілодобову роботу без зовнішнього джерела енергії; стійкість до зовнішніх кліматичних впливів; можливість безперервного моніторингу та передачі даних навіть у віддалених умовах.

3. Результати та обговорення.

Криві зміни температур термоакумулювальних матеріалів, повітря в теплиці та навколишньому середовищі та води в циркуляційному контурі, отримані за результатами вимірювань протягом двох діб, представлені на рис. 3. Починаючи з 6 години ранку інтенсивність сонячного випромінювання підвищується, що призвело до зростання всіх досліджуваних температур. Температура зовнішнього повітря (крива 1) значно нижча за температуру повітря в теплиці (крива 2), що поясню-

ється ізолюваністю її повітряного простору. Температура фазоперехідного матеріалу (модифікованого парафіну, крива 3) була завжди вище температур води, щебеню та повітря в теплиці внаслідок того, що самі трубки, наповнені парафіном, були розташовані на ґрунті теплиці. Як показали спостереження, температура ґрунту в макеті теплиці в нічний час не опускалася нижче 30 °С, що говорить про високі теплоакумулювальні здібності самого ґрунту. На цій кривій окремо винесені ділянки фазового переходу при плавленні (ліворуч) та затвердінні (праворуч) модифікованого парафіну.

Видно, що температура шару (крива 4) корелюється з температурою потоку води (крива 5) залишаючись нижче. У верхній точці графіка різниця температур була максимальною: $\Delta t = 3,5$ °С. На другий день максимальна різниця температур була вищою внаслідок більшої інтенсивності сонячного випромінювання і склала $\Delta t = 4,5$ °С.

Температура води, що протікає по трубах під дахом макета теплиці, протягом усього дослідження була вищою за температуру повітря в теплиці: в денний час внаслідок того, що прозорі поліетиленові трубки, прокладені безпосередньо на даху теплиці, дозволяли потоку сонячного випромінювання нагрівати потік води, а в нічний час вода отримувала теплоту.

Кількість теплоти, акумульована шаром щебеню в теплообмінному каналі за період зростання інтенсивності сонячного випромінювання, при припущенні, що втрати тепла в навколишнє середовище відсутні, визначалося за наступними даними: маса щебеню $m = 40$ кг, питома теплоємність щебеню $c = 800$ Дж/(кг·К), зміна температури шару щебеню $\Delta t = 23$ °С за час його нагрівання від потоку води з циркуляційного контуру.

Втратами в довір'я можна знехтувати, оскільки теплообмінний канал зовні має ефективну теплову ізоляцію матеріалом на основі хімічно зшитого спіненого поліетилену товщиною 5 мм із шаром алюмінієвої фольги на зовнішній поверхні. Для першого дня кількість акумульованої теплоти склала $Q = 736000$ Дж, для другого дня ця величина склала $Q = 912000$ Дж. Збільшення кількості теплоти, акумульованої на другий день, пов'язане з більшою інтенсивністю сонячного випромінювання, при цьому нагрівання починалося з нижчої температури, ніж у перший день ($t_1 = 14,5$ °С, $t_2 = 13$ °С). Розрахунок показав, що збільшення середньоінтегральної інтенсивності сонячного випромі-

нювання в 1,27 разів призвело до збільшення акумульованої теплоти в 1,24 рази. Після проходження піку за температурою нагрівання шару щебеню пропонується перекривати надходження води та ізолювати теплообмінний канал на вході та виході заслінками. При зниженні температури в

тепліці в нічний час передбачається утилізувати накопичену теплоту підвищення температури повітря.

Отримано, що питома (з розрахунку на кілограм щебеню) кількість теплоти становить $Q_{\text{пит}} = 18400 \dots 22800$ Дж/кг.

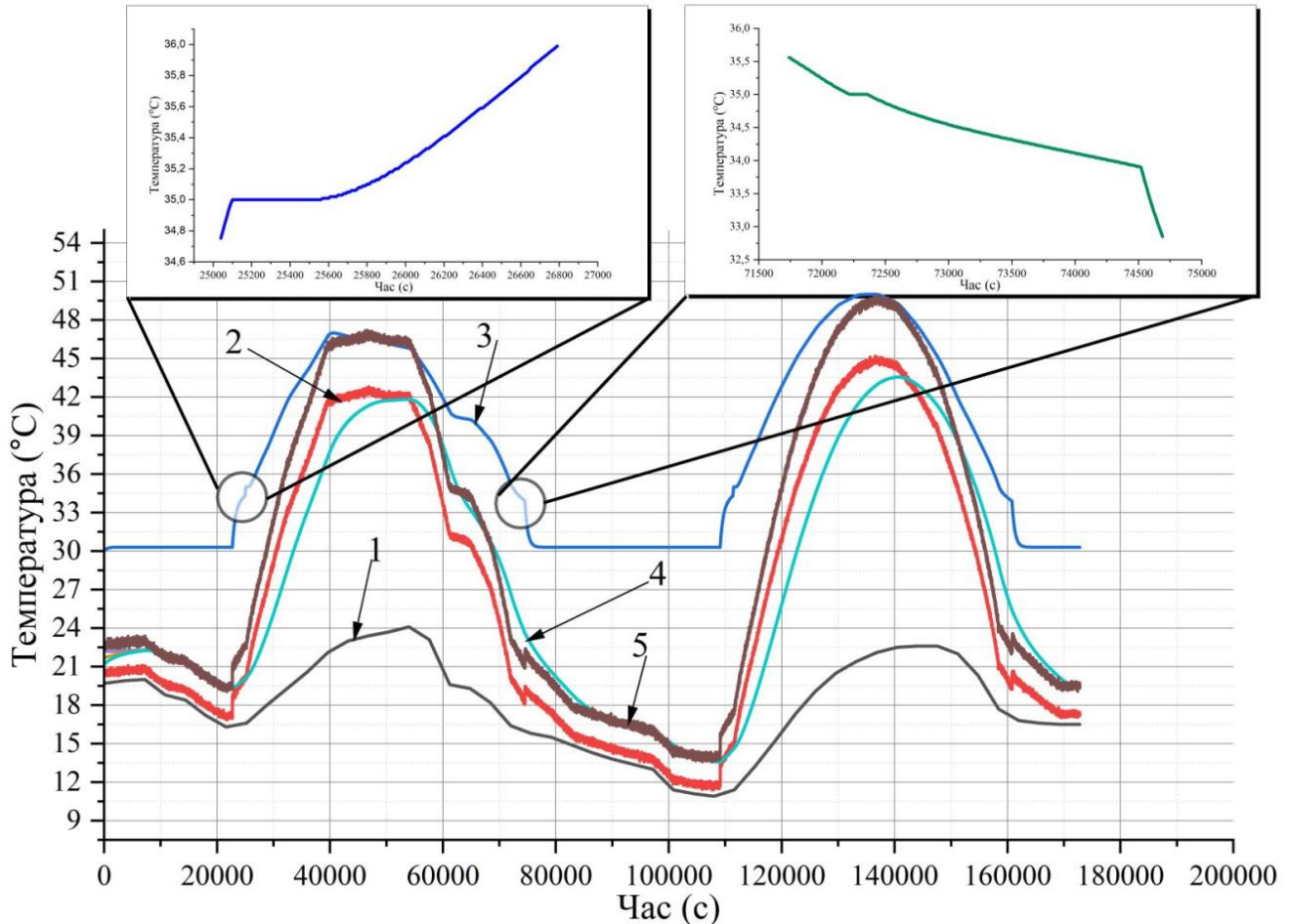


Рисунок 3 – Криві зміни температур робочих середовищ за умов проведення експерименту:
1 – температура навколишнього середовища; 2 – температура повітря у макеті теплиці; 3 – температура парафіну в трубках-акумуляторах; 4 – усереднена температура частинок щебеню; 5 – температура води на виході з корпусу теплиці

Кількість тепла, акумульована одним каналом з модифікованим парафіном за період нагрівання, визначалася залежністю:

$$Q = m_p \cdot c \cdot \Delta t_1 + m_p \cdot \lambda + m_p \cdot c_p \cdot \Delta t_2, \quad (1)$$

де m – маса парафіну в каналі, Δt_1 – зміна температури парафіну у твердому стані, Δt_2 – зміна температури парафіну в рідкому стані, λ – питома теплота плавлення, c – питома теплоємність парафіну у твердому стані, c_p – питома теплоємність у рідкому стані. Довжина трубки, що акумулює, з модифікованим парафіном – 1 м, внутрішній ді-

метр – 2 см.

Аналізуючи рис. 3 і перебіг кривих зміни температури парафіну в рідкому та твердому стані, можна зробити висновок, що теплоємність парафіну практично однакова і не залежить від температури в даному температурному діапазоні. Тоді залежність (1) можна подати у такому вигляді:

$$Q = m_p \cdot c \cdot \Delta t + m_p \cdot \lambda, \quad (2)$$

де Δt – зміна температури протягом усього періоду нагрівання.

Маса модифікованого парафіну у каналі дов-

жиною 1 м, діаметром 0,02 м становить 0,283 кг. Його температура підвищилася від 30 до 46 °С за весь період нагрівання, як видно з рис. 3. Період фазового переходу з твердого стану в рідке відбувався при температурі 34 ... 35,5 °С (рис. 3) за короткий проміжок часу, внаслідок чого він не відображається через представлений масштаб на основній кривій 3, однак представлений у збільшеному вигляді зліва.

В результаті розрахунку отримано, що кількість теплоти, акумульована модифікованим парафіном, становить $Q = 48450$ Дж. У розрахунку приймалося, що питома теплоємність парафіну 2200 Дж/кг. На дні макета теплиці було встановлено 6 каналів, відповідно, акумульована ними теплота становить $Q = 290700$ Дж. Питома кількість теплоти $Q_{\text{пит}} = 171200$ Дж/кг.

Зіставляючи питому кількість теплоти, акумульоване шаром щебеню і фазоперехідним матеріалом, можна дійти невтішного висновку, що фазоперехідний матеріал у 7,5... 9,3 рази ефективніше накопичує низько потенційну теплоту. При цьому маса використовуваного модифікованого парафіну в 23,6 рази менше маси щебеню. Однак умови розташування теплообмінного каналу з щебенем за межами теплиці є кращими в порівнянні з розташуванням трубок, що акумулюють, з парафіном на ґрунті, так як корисна площа теплиці не зменшується. Крім того, розташування на ґрунті складно здійснити у реальній промисловій теплиці, оскільки зменшується корисна площа, призначена для культивування рослин. Таким чином, встановлення теплообмінних каналів із щебенем має переваги для існуючих теплиць, оскільки не вимагає глобальної перебудови, роботи проводиться на поверхні ґрунту. При цьому для теплиць, що знову будуються, раціонально передбачити установку регенеративного теплообмінника-утилізатора з фазоперехідним матеріалом.

4. Висновки

Створена модульна система автоматизованого збору, зберігання та передачі даних при безперервному моніторингу температури робочих тіл та освітленості демонструє свою практичну цінність для контролю параметрів теплообмінних процесів у системах зберігання теплоти.

Теплообмін між щільним шаром щебеню та потоком води після проходження макета теплиці проходить з високою інтенсивністю – макси-

мальна різниця температур становила 4,5 °С при температурі води 49,5 °С та середній температурі шару 45 °С. Встановлення вертикального теплоізоляованого каналу зі щебенем і подача в його верхню частину води каналом після нагрівання в корпусі теплиці усуває проблему гідравлічного опору щільного шару. Питома (з розрахунку на кілограм щебеню) кількість акумульованої теплоти за умов проведення експерименту становила $Q_{\text{пит}} = 18400...22800$ Дж/кг. Для існуючих теплиць можливе встановлення вертикальних регенеративних теплообмінних каналів із щільним шаром безпосередньо в обсязі теплиці або за її межами.

Модифікований парафін ТЗ як фазоперехідний матеріал у 7,5...9,3 рази ефективніший у порівнянні із щільним шаром щебеню акумулює низькопотенційну теплоту сонячного випромінювання та повітря у теплиці. При цьому маса використовуваного модифікованого парафіну в 23,6 рази менше маси щебеню.

Остаточний вибір системи накопичення теплоти залежить від вартості матеріалу, виготовлення системи САТЕ, простоти конструкції та можливості інтеграції до теплиці.

Особистий внесок авторів CRediТ

Мукмінов І. І.: створення методологічних засад роботи, експериментальні дослідження; **Волгушева Н. В.:** математична обробка результатів експериментів, проведення теплових розрахунків; **Бошкова І. Л.:** методичне забезпечення, планування експерименту; **Писаревський І. О.:** експериментальні дослідження, інформаційний пошук, аналіз даних.

Acknowledgments

Дослідження було виконано завдяки фінансуванню Національного фонду досліджень України в рамках проекту «Вирішення фундаментальних проблем створення нового покоління термоаккумулявальних наноматеріалів для накопичення теплоти сонячної енергії та теплових відходів (теплофізичні властивості, теплообмін)» (реєстраційний номер 2025.07/0417).

Література

1. **Suresh C., Saini R. P.** Thermal performance of sensible and latent heat thermal energy storage sys-

- tems // *International Journal of Energy Research*. – 2020. – Vol. 44, no. 6. – P. 4743-4758. <https://doi.org/10.1002/er.5255>.
2. **A. Bazgaou et al.** Performance assessment of combining rock-bed thermal energy storage and water filled passive solar sleeves for heating Canarian greenhouse // *Solar energy*. – 2020. – Vol. 198. – P. 8-24. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.041>.
 3. **Katekar V. P., Rao A. B., Sardeshpande V. R.** An experimental investigation to optimise pebbles-based sensible heat storage system: An exploration to improve thermal efficiency of solar devices // *Journal of Energy Storage*. – 2023. – Vol. 73. – P. 108964. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108964>.
 4. **P. R. Olivkar et al.** Effect of sensible heat storage materials on the thermal performance of solar air heaters: State-of-the-art review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2022. – Vol. 157. – P. 112085. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112085>.
 5. **M. S. Peer et al.** Nanofluids in Thermal Energy Storage Systems: A Comprehensive Review // *Energies*. – 2025. – Vol. 18, No. 3. – P. 707. <https://doi.org/10.3390/en18030707>.
 6. **P. Schwarzmayer et al.** Standby efficiency and thermocline degradation of a packed bed thermal energy storage: An experimental study // *Applied Energy*. – 2023. – Vol. 337. – P. 120917. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120917>.
 7. **S. Bonachela et al.** Effects of gravel mulch on surface energy balance and soil thermal regime in an unheated plastic greenhouse // *Biosystems Engineering*. – 2020. – Vol. 192. – P. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.01.010>.
 8. **Zhang X., Yang L.** Dense granular flow as heat transfer media: a new type of high power target design // *Principles and applications in nuclear engineering - radiation effects, thermal hydraulics, radionuclide migration in the environment*. – 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.77276>
 9. **E. Cano-Pleite et al.** Thermo-economic optimization of a novel confined thermal energy storage system based on granular material // *Applied Thermal Engineering*. – 2023. – P. 120123. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120123>.
 10. **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. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.022>
 11. **M.A Aderibigbe A.E Airoboman.** A review on packed bed of rock as thermal energy storage for concentrated solar power plant // *American Journal of Engineering Research (AJER)*. – 2019. – Vol. 8(5). – P. 121-130.
 12. **Mastouri H., Benhamou B., Hamdi H.** Pebbles Bed Thermal Storage for Heating and Cooling of Buildings // *Energy Procedia*. – 2013. – Vol. 42. – P. 761-764. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.11.079>
 13. **K. Faraj et al.** A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications // *Journal of Energy Storage*. – 2021. – Vol. 33. – P. 101913. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101913>.
 14. **Mitali J., Dhinakaran S., Mohamad A.A.** Energy storage systems: a review // *Energy storage and saving*. – 2022. – Vol. 1, Is. 3. – P. 166-216. <https://doi.org/10.1016/j.jenss.2022.07.002>.
 15. **I. Sarbu, C. Sebarchievici.** A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage // *Sustainability*. – 2018. – Vol. 10, No. 2. – P. 191. <https://doi.org/10.3390/su10010191>.
 16. **Y. Zhang et al.** New Advances in Materials, Applications, and Design Optimization of Thermocline Heat Storage: Comprehensive Review // *Energies*. – 2024. – Vol. 17, No. 10. – P. 2403. <https://doi.org/10.3390/en17102403>.
 17. **Anandan S. S., Sundarababu J.** A comprehensive review on mobilized thermal energy storage // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. – 2021. – P. 1-24. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1942331>.
 18. **Mao Q., Wang Y.** Recent development of thermal heat storage technology coupling with phase change material // *Journal of Energy Storage*. – 2025. – Vol. 139. – P. 118739. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.118739>.
 19. **M. Velasco-Carrasco et al.** Experimental Evaluation of Thermal Energy Storage (TES) with Phase Change Materials (PCM) for Ceiling Tile Applications // *Future Cities and Environment*. – 2020. – Vol. 6, No. 1. <https://doi.org/10.5334/fce.101>
 20. **Rathore P. K. S., Sikarwar B. S.** Thermal energy storage using phase change material for solar thermal technologies: A sustainable and efficient approach // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2024. – Vol. 277. – P. 113134. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.113134>.
 21. **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. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/985/1/012013>.

22. **M. Hazami et al.** Thermal Performance of a Solar Heat Storage Accumulator Used For Greenhouses Conditioning // American Journal of Environmental Sciences. – 2005. – Vol. 1, No. 4. – P. 270-277. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2005.270.277>.
23. **S. Bouadila et al.** Assessment of the greenhouse climate with a new packed-bed solar air heater at night, in Tunisia // Renewable and sustainable energy reviews. – 2014. – Vol. 35. – P.31-41. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.051>.
24. **Avezov R.R.** Natural heat accumulation in large enclosures of premises with an insulation passive solar heating system // Applied solar energy. – 2016. Vol. 52, No.3. – P. 226-230. URL:<https://doi.org/10.3103/s0003701x16030038>.
25. **A. Solodka et al.** Investigation of heat exchange in a blown dense layer of granular materials // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 5, No. 8 (89). – P. 58-64. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112217>.
26. **I. Boshkova et al.** Development of a soil regenerator with a granular nozzle for greenhouses // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – Vol. 4, No. 8 (106). – P. 14-20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.210684>.
27. **M. Soussi et al.** Comprehensive Review on Climate Control and Cooling Systems in Greenhouses under Hot and Arid Conditions // Agronomy. – 2022. – Vol. 12, No. 3. – P. 626. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030626>.

Отримана в редакції 12.02.2026, прийнята до друку 03.03.2026

Research of solar radiation heat accumulation for greenhouse facilities

Igor Mukminov¹✉, **Natalya Volgusheva**², **Irina Boshkova**³, **Igor Pysarevskyi**⁴

¹⁻⁴Odesa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odessa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: ¹fatalrew@gmail.com

ORCID: ¹<http://orcid.org/0000-0002-3674-9289>; ²<http://orcid.org/0000-0002-9984-6502>;

³<http://orcid.org/0009-0009-5599-2709>; ⁴<http://orcid.org/0009-0007-3920-9601>

Technologies for thermal energy storage in sensible form (capacity-type storage units) and in latent form during phase transitions (melting and solidification) are analyzed. It is emphasized that the main problem hindering the full realization of the potential of solar thermal technologies is related to the intermittent nature of the energy source, and its efficient utilization depends on the availability of effective and high-performance energy storage systems. Based on the analysis of literature data, it has been established that greenhouse production is the most energy-intensive and costly sector of agriculture; therefore, increasing attention is being paid to the search for design solutions aimed at creating environmentally friendly and energy-efficient greenhouses. A schematic diagram of an experimental setup developed to investigate the accumulation of solar radiation heat by capacity-type and phase-change storage elements is presented. The paper describes a modular system for automated data acquisition, storage, and transmission developed in this study, which is used for continuous monitoring of temperature and illuminance. An analysis of temperature variation curves is provided for the ambient environment, the air inside the greenhouse model, modified paraffin T3 in accumulator tubes, the average temperature of crushed stone particles, and the water temperature at the greenhouse outlet. The experiment duration was 48 hours, and temperature data were recorded at 10-second intervals. The results of calculating the amount of heat accumulated by a dense crushed stone layer in a sensible heat storage system and the amount of heat accumulated by a phase-change material in a latent heat storage system are presented. It was determined that the specific amount of heat absorbed by the phase-change material is 7–9 times greater compared to the dense crushed stone layer; however, the use of a latent heat storage system is associated with the problem of installing storage units within the greenhouse volume. The final selection of a latent or sensible heat storage system depends on material cost, system manufacturing, design simplicity, and the possibility of integration into the greenhouse structure.

Keywords: Thermal energy storage; Dense layer; Paraffin; Phase transition; Temperature; Experiment; Energy efficiency

References

1. 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.
2. Bazgaou, A. et al. (2020) Performance assessment of combining rock-bed thermal energy storage and water filled passive solar sleeves for heating Canarian greenhouse. *Solar energy*, 198, 8-24.
3. Katekar, V. P., Rao, A. B., & Sardeshpande, 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.
4. 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.
5. Peer, M. S., Cascetta, M., Migliari, L., & Prollese, M. (2025). Nanofluids in Thermal Energy Storage Systems: A Comprehensive Review. *Energies*, 18(3), 707.
6. Schwarzmayer, P., Birkelbach, F., Walter, H., & Hofmann, R. (2023). Standby efficiency and thermocline degradation of a packed bed thermal energy storage: An experimental study. *Applied Energy*, 337, 120917.
7. Bonachela, S., López, J. C., Granados, 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 greenhouse. *Biosystems Engineering*, 192, 1-13.
8. Zhang, X., & Yang, L. (2018). Dense granular flow as heat transfer media: A new type of high power target design. *Principles and applications in nuclear engineering - radiation effects, thermal hydraulics, radionuclide migration in the environment*.
9. 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.
10. Singh, H., Saini, R. P., & Saini, J. S. (2010). A review on packed bed solar energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 1059-1069.
11. Aderibigbe, M.A., Aioboman, A.E. (2019). A Review on Packed Bed of Rock as Thermal Energy Storage for Concentrated Solar Power Plant. *American journal of engineering research (AJER)*, 8(5), 121-130.
12. Mastouri, H., Benhamou, B., & Hamdi, H. (2013). Pebbles Bed Thermal Storage for Heating and Cooling of Buildings. *Energy Procedia*, 42, 761-764.
13. 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.
14. Mitali, J., Dhinakaran, S., & Mohamad, A. A. (2022). Energy storage systems: A review. *Energy Storage and Saving*, 1, 3, 166-216
15. Sarbu, I., Sebarchievici, C. (2018). A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. *Sustainability*, 10(2), 191.
16. 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.
17. Anandan, S. S., & Sundarababu, J. (2021). A comprehensive review on mobilized thermal energy storage. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-24.
18. Mao, Q., & Wang, Y. (2025). Recent development of thermal heat storage technology coupling with phase change material. *Journal of Energy Storage*, 139, 118739.
19. Velasco-Carrasco, M., Chen, Z., Aguilar-Santana, J. L., & Riffat, S. (2020). Experimental Evaluation of Thermal Energy Storage (TES) with Phase Change Materials (PCM) for Ceiling Tile Applications. *Future Cities and Environment*, 6(1).
20. Rathore, P. K. S., & Sikarwar, B. S. (2024). Thermal energy storage using phase change material for solar thermal technologies: A sustainable and efficient approach. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 277, 113134.
21. Savvitskiy M., Danishevskyy V., Bordun M. (2020). Accumulation of solar energy to heat greenhouses. *IOP conference series: materials science and engineering*, 985, 012013.
22. Hazami, M., Kooli, S., Lazaar, M., Farhat, A., & Belghith, A. (2005). Thermal performance of a solar heat storage accumulator used for greenhouses conditioning. *American journal of environmental sciences*, 1(4), 270-277.
23. Bouadila, S., Lazaar, M., Skouri, S., Kooli, S., & Farhat, A. (2014). Assessment of the greenhouse climate with a new packed-bed solar air heater at night, in Tunisia. *Renewable and Sustainable Energy*

Reviews, 35, 31-41.

24. **Avezov, R. R.** (2016). Natural heat accumulation in large enclosures of premises with an insulation passive solar heating system. *Applied Solar Energy*, 52(3), 226-230.

25. **Solodka, A., Volgusheva, N., Boshkova, 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.

26. **Boshkova, I., Volgusheva, N., Solodka, A., Mukminov, I., & Bondarenko, O.** (2020). Develop-

ment of a soil regenerator with a granular nozzle for greenhouses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(8 (106)), 14-20.

27. **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.

Received 12 February 2026

Approved 03 March 2026

Available in Internet 31 March 2026