

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 65.6(075.8)

Застосування парафіну як теплоакумлюючого матеріалу в аграрних спорудах

І. О. Писаревський¹, І. І. Мукмінов²✉¹⁻²Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна✉ e-mail: 2fatalrew@gmail.comORCID: [1http://orcid.org/0009-0007-3920-9601](http://orcid.org/0009-0007-3920-9601); [2http://orcid.org/0000-0002-3674-9289](http://orcid.org/0000-0002-3674-9289)

У статті проведено комплексне дослідження можливості застосування парафіну марки ТЗ як фазозмінного матеріалу (Phase Change Material, PCM) для пасивного акумулювання теплової енергії в аграрних будівлях. Проаналізовано термофізичні параметри парафіну, зокрема питому теплоту плавлення, температурний інтервал фазового переходу, теплопровідність та термічну стабільність, а також окреслено їхній вплив на ефективність енергетичних процесів у спорудах з регульованим мікрокліматом. Показано, що парафін ТЗ характеризується високою енергетичною щільністю та хімічною інертністю, що забезпечує його довготривалу експлуатацію без деградації властивостей і з мінімальними ризиками для біологічних об'єктів. На основі теплотехнічних розрахунків оцінено динаміку акумулювання та віддачі тепла парафіновими модулями за різних режимів зовнішнього теплового впливу. Моделювання продемонструвало, що введення РСМ дозволяє згладжувати добові коливання температури, підвищуючи стабільність мікроклімату в теплицях, птахофермах і свинарських комплексах. Розглянуто конструктивні схеми інтеграції парафінових теплоаккумуляторів у будівельні огорожувальні елементи та внутрішні технологічні системи, включно з модульно-блоковими контейнерами, акумулюючими панелями та трубчастими резервуарами зі збільшеною площею теплообміну. Підкреслено, що коректний добір температури фазового переходу та оптимізація теплового заряду є ключовими чинниками підвищення енергоефективності. Отримані результати засвідчують, що використання парафіну ТЗ у системах пасивного теплового захисту здатне суттєво знижувати потребу в активному опаленні в нічні години та під час короткочасних понижень температури. Визначено перспективні напрями подальших досліджень, пов'язані з удосконаленням конструкцій теплоакумлюючих модулів та адаптацією РСМ до специфічних умов аграрної інфраструктури.

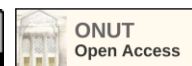
Ключові слова: Парафін ТЗ; Фазозмінні матеріали; Теплоаккумулятор; Аграрні споруди; Теплова енергія; Фазовий перехід; Енергоефективність; Теплиця; Пасивне опалення; РСМ.

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v6i13.3276>

© The Author(s) 2025. 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

У сільському господарстві підтримання стабільної температури всередині таких споруд, як теплиці, свинарники або пташники, є критично важливим. Вночі та взимку температура повітря істотно знижується, що призводить до втрат накопиченого за день тепла й охолодження внутріш-

нього простору. За оцінками, до 85% тепловтрат теплиці відбувається саме в нічний час [1]. Це означає, що більша частина енергії, витраченої на обігрів вдень, розсіюється вночі. У результаті опалення стає однією з найбільш енергоємних статей витрат: у холодному кліматі на обігрів може припадати до 20-25% усіх операційних витрат фермерського господарства [2]. Таким чином, ефек-

тивне накопичення надлишків тепла вдень з подальшим поверненням його вночі здатне істотно знизити витрати на опалення і підвищити рентабельність вирощування рослин і утримання тварин.

Крім економічних витрат, різкі добові коливання температури негативно впливають на ріст рослин і продуктивність тварин. Тепловий стрес від нічного холоду може уповільнювати ріст розсади і знижувати врожайність. У сільськогосподарських тварин переохолодження призводить до зниження імунітету і продуктивності, підвищення витрат кормів на обігрів тіла. Тому вирівнювання температурного режиму – важливе завдання. Традиційні методи включають утеплення (наприклад, багат шарові покриття теплиць, термомокрани або штори на ніч) і активний обігрів (печі, котли, нагрівачі). Однак утеплення лише уповільнює втрати, а активний обігрів дорогий і неекологічний.

Альтернативним рішенням є використання акумуляторів теплової енергії, які накопичують надлишок тепла вдень і повертають його вночі. Простим прикладом слугують бочки з водою в теплиці, що відіграють роль теплового акумулятору. Вода має високу питому теплоємність і здатна віддавати тепло під час охолодження. Однак звичайне явне тепло (пов'язане зі зміною температури без фазового переходу) обмежене: вода віддає близько 4,2 кДж, охолоджуючись на 1 °С кожен кілограм. Більш ефективним підходом є застосування фазового переходу для акумуляування прихованої теплоти. Фазові теплоакумулятори здатні зберігати на порядок більше енергії за тих самих коливань температури за рахунок теплоти фазового перетворення.

2. Фізичні основи теплоакумуляування з фазовим переходом

Коли речовина змінює свій фазовий стан (наприклад, плавиться з твердого на рідину або конденсується з пари на рідину), вона поглинає або виділяє велику кількість енергії, яка називається теплотою фазового переходу (або теплотою плавлення/кристалізації). При цьому сама температура речовини під час фазового переходу залишається практично незмінною. Саме це явище лежить в основі роботи фазових акумуляторів тепла: вони поглинають надлишок тепла під час нагрівання, переходячи з твердого стану в рідкий, а під час оборотного охолодження виділяють теп-

ло, стаючи твердими.

Такий спосіб накопичення енергії дає змогу зберегти значно більший об'єм тепла порівняно з накопиченням за рахунок простого підвищення температури матеріалу. Наприклад, в обраному відповідному матеріалі на фазовий перехід може припадати сотні кілоджоулів енергії на кожен кілограм, тоді як нагрівання тієї ж речовини на одиницю температури акумулює лише десятки кДж/кг. Зокрема, парафінові воски (суміші алканів) мають питому теплоту плавлення близько 180...230 кДж/кг. [1], що еквівалентно охолодженню води майже на 40-55°C на кожен кілограм. Іншими словами, при плавленні парафін здатний акумулювати приблизно в 5 разів більше тепла, ніж вода при охолодженні на ту саму величину температури [2]. Завдяки цьому навіть порівняно невелика маса фазового матеріалу може істотно врівноважити температурні коливання в приміщенні.

Принцип дії фазового теплоакумулятора наступний: вдень, коли температура всередині споруди підвищується (наприклад, під дією сонячного нагріву в теплиці або від життєдіяльності тварин у хліві), матеріал-акумулятор, який знаходиться всередині, нагрівається до температури плавлення і починає плавитися, поглинаючи надлишок тепла. Цей процес запобігає надмірному перегріванню повітря, одночасно запасаючи енергію у вигляді прихованої теплоти плавлення. Потім вночі, коли температура повітря падає і стає нижчою за точку кристалізації матеріалу, акумулятор починає тверднути, виділяючи тепло, що зберігається, і віддаючи його в повітря приміщення. В ідеалі матеріал підтримуватиме температуру повітря біля своєї точки фазового переходу, поки повністю не затвердіє, тобто віддасть максимальну кількість накопиченої енергії. Таким чином домагаються пасивного обігріву: без участі зовнішніх джерел енергії акумулятор автоматично регулює теплообмін, згладжуючи піки температур. Експерименти підтверджують ефективність такого підходу: наприклад, застосування фазового акумулятора в сонячній теплиці дало змогу підвищити нічну температуру повітря на 1-3 °С порівняно з контрольною теплицею [3], а в окремих випадках за достатнього запасу тепла – до 7,5 °С вище, ніж без акумулятора [3]. Це значно покращує умови для рослин і зменшує потребу в догріванні теплиці вночі.

Важливо зазначити, що для максимальної ефек-

тивності матеріал фазового акумулятора повинен мати температуру фазового переходу, близьку до необхідної робочої температури. Наприклад, щоб підтримувати всередині неопалюваної теплиці щонайменше $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$, бажано використовувати матеріал, що плавиться приблизно за $18\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$: тоді під час затвердіння він утримуватиме температуру близько $18\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$, не даючи повітрю охолонути нижче. Існують різноманітні фазові матеріали – від неорганічних гідратів солей (напр. глауберова сіль, що тоне за $\sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$) до органічних сполук (наприклад, жирні кислоти або парафінові воски різного складу). Органічні матеріали, зокрема парафіни, широко застосовуються завдяки своїй оборотності плавлення, хімічній стабільності та відсутності корозійного впливу на навколишні конструкції [1, 3]. У наступному розділі розглянуто властивості парафіну, застосовного в якості акумулятора тепла.

3. Фізичні основи теплообміну в кільцевих каналах з пористим наповнювачем

Кільцевий канал з пористим заповненням являє собою зазор між двома коаксіальними циліндричними стінками, повністю заповнений зернистим матеріалом (наприклад, піском). Коли крізь цей канал проходить гарячий газ, він фільтрується через пори наповнювача, інтенсивно віддаючи йому тепло рахунок розвиненої поверхні контакту. Процес теплообміну в такій системі поєднує: конвективну теплопередачу від газу, що рухається до поверхні частинок, теплопровідність всередині твердого гранульованого шару і стінок каналу, а також акумулювання тепла в об'ємі матеріалу. Важливою відмінністю від гладких каналів є набагато більша поверхня теплообміну та турбулізація потоку в порах, що дозволяє досягти високої інтенсивності тепловіддачі навіть за відносно низьких швидкостей потоку.

Теоретичний опис процесу зазвичай базується на моделях течії в пористих середовищах (рівняння Дарсі-Брінкмана для фільтрації, рівняння енергії для твердої та газової фаз). Розрізняють випадки локальної теплової рівноваги (температура твердих частинок та газу вирівнюється локально) та теплової нерівноваги (газ може мати іншу температуру, ніж частинки, на мікроскопічному рівні). У більшості практично важливих режимів конвекції через досить щільну насадку досягається близький до рівноважного стан, при якому дрібні

частинки швидко відбирають тепло у газу, вирівнюючи температуру. Емпіричні залежності для коефіцієнтів тепловіддачі часто виражають через безрозмірні критерії Нуссельта (Nu) та Рейнольдса (Re) для потоку в порах. Численні експерименти з потоком через зернисті насипи показали, що критерій Нуссельта залежить від швидкості потоку (Re) за степеневим розподілом виду $Nu \sim Re^n$. Для класичних щільних засипок (неупорядкованих кульок) показник ступеня n знаходиться в діапазоні $\sim 0,5\text{--}0,6$ [6]. Наприклад, кореляція Вакао-Кагуї, що широко використовується, для конвективної тепловіддачі в packed-bed насадках пропонує:

$$Nu = 2 + 1,1Re^{0,6} Pr^{1/3}, \quad (1)$$

де Pr – число Прандтля середі [6]. Цей емпіричний закон добре описує дані для газу, що фільтрується через шар сферичних частинок, у діапазоні Re від ~ 10 до кількох тисяч [6]. Фізично показник $n \approx 0,5\text{--}0,6$ відображає формування турбулентних вихорів на рівні міжзернових каналів. Цікаво, що для інших типів пористих структур n може відрізнятися: наприклад, для високопористих спечених пін (консолідована пориста матриця) експерименти показують сильнішу залежність ($n \approx 0,8\text{--}1,0$) через інший характер течії та теплопередачі. Тим не менш, для насипу з піску або гравію величина $n \approx 0,6$ вважається найбільш підходящою.

Коефіцієнт тепловіддачі за такого режиму фільтраційної конвекції може бути досить високим. Наприклад, для повітря при $Re \sim 1000$ через шар піску розміром частинок ~ 5 мм оцінки за наведеною вище кореляцією дають $Nu \sim 60$, що відповідає коефіцієнту тепловіддачі порядку $h \sim 300\text{--}400$ Вт/(м²·К) (порівнянно з інтенсивною турбулентною конвекцією) – це на порядок вище, ніж при ламінарному перебігу в гладкому каналі [6]. Таким чином, пористий наповнювач суттєво інтенсифікує теплообмін. Проте за підвищення тепловіддачі доводиться сплачувати зростанням гідравлічного опору. Потік газу, просочуючись через вузькі міжчасткові канали, втрачає тиск – насадка працює подібно до фільтру. Тиск падає пропорційно приблизно квадрату швидкості (режим Forchheimer), і занадто щільна/дрібна насадка може вимагати великих витрат енергії на прокачування [7]. Отже, при проектуванні необхідно вибирати оптимальний розмір і висоту шару наповнювача: надто дрібні частки – надмірні втрати на тертя, надто

великі – погіршення тепловіддачі через зменшення поверхні та можливість проскакування потоку між зернами [7].

У цілому, теплопередача в кільцевому каналі з пористим заповнювачем відбувається за механізмом регенерації: тверда насадка служить теплоємним проміжним накопичувачем. В одному перерізі каналу газ може нагрівати частинки (віддаючи їм тепло), а нижче по потоку вже охолоджуватися охолоджуватись об раніше нагріті частинки. Під час сталої протитечії гарячого і холодного потоків уздовж насипу формується градієнт температур у твердому матеріалі, і тепло ефективно переноситься від гарячого потоку до холодного через накопичувач. Альтернативно, можливий нестационарний режим: гарячий потік прокачується через канал, одночасно нагріваючи шар, а потім, після перемикавання, через той же нагрітий шар проганяється холодний потік, що відбирає накопичене тепло (класичний регенератор). Подібний принцип реалізується, наприклад, у компактних побутових рекуператорах з керамічним стільниковим осердям, де вентилятор циклічно змінює напрямок потоку кожні ~60 секунд [6]. У системах, що розглядаються, можна використовувати як постійний протиточний режим (при наявності розділяючої стінки між потоками), так і циклічний режим з перемиканням потоків – обидва підходи спираються на високу теплоємність і площу поверхні пористого шару[8].

4. Парафін ТЗ: властивості та придатність у якості РСМ

Одним із доступних і недорогих матеріалів для накопичення тепла є парафін – твердий вуглеводневий віск, що є побічним продуктом нафтоперероблення або отримується з інших джерел. Парафін являє собою суміш насичених алканів (C_nH_{2n+2}) різної молекулярної маси. Від числа атомів вуглецю n залежить температура плавлення і прихована теплота: більш довголанцюжкові вуглеводні мають вищу температуру плавлення і більший тепловий ефект [3]. Суміші парафінів дають змогу підібрати бажану температуру фазового переходу в широкому діапазоні – приблизно від 30 до 90°C [1]. Парафін марки ТЗ – це технічний нафтовий парафін з незначними домішками олій (до ~3%). Згідно зі стандартами, він плавиться приблизно в діапазоні 50...55 °C (не нижче ~50°C). Такий досить високий поріг плавлення означає,

що парафін ТЗ здатний акумулювати тепло під час нагрівання до 50°C і вище, а віддавати – під час охолодження нижче цієї температури. Хоча для прямого використання в теплицях температура фазового переходу 50°C може бути вищою, ніж зазвичай досягається внутрішнім повітрям, парафін ТЗ залишається цікавим завдяки низькій ціні та доступності. Його можна застосовувати в поєднанні з сонячним колектором або в умовах, де температура прогріву досягає необхідних значень.

Термофізичні властивості парафіну ТЗ (і близьких до нього парафінових восків) роблять його чудовим накопичувачем тепла:

Температура плавлення: близько 50...55°C. Це означає, що для повного заряду акумулятора парафін необхідно нагріти приблизно до цієї температури. У процесі плавлення матеріал поглинає велику кількість енергії, залишаючись при ~ сталій температурі.

Питома теплота плавлення: близько 190...200 кДж/кг. Це прихована теплота, що виділяється під час кристалізації парафіну. Для порівняння, це в кілька разів більше, ніж енергія, яку той самий парафін віддасть, просто охолонувши на десяток градусів без фазового переходу [1].

Питома теплоємність: близько 2,1 кДж/(кг·К) [9]. У твердому і рідкому стані парафін здатний накопичувати додатково ~2 кДж тепла на кожен кг у разі підвищення температури на 1 градус.

Теплопровідність: низька, близько 0,15...0,21 Вт/(м·К) [3]. Ця властивість означає, що парафін погано проводить тепло, і процес заряду/розряду тепла всередину його об'єму йде повільно, обмежуючись теплопередачею через поверхню. Цей недолік часто компенсують конструктивно – збільшуючи площу поверхні теплообміну (наприклад, заповнюють парафіном безліч тонких трубок або пакетів) або додаючи теплопровідні вclusions (металеві пластини, графітові наповнювачі тощо) [9, 10].

Густина: ~800 кг/м³ у твердому стані (за кімнатної температури) і ~ 750...770 кг/м³ у нагрітому/розплавленому стані [3]. Парафін під час плавлення трохи розширюється (на кілька відсотків за об'ємом), але це розширення не створює високого тиску – на відміну від, наприклад, води, що розширюється під час замерзання. Завдяки порівняно невеликій густині парафін легший за воду, що спрощує його розміщення (наприклад, плаваючі ємності).

Безпека і стабільність: парафін хімічно інерт-

ний, не корозійний, не реагує з більшістю матеріалів. Він має незначне саморозширення і низький тиск насичених парів навіть у розплавленому вигляді [1], тобто не випаровується активно (до температур > 150 °C). Це означає, що запаяний парафіновий акумулятор не відчуває високого тиску під час нагрівання і довготривалого зберігання тепла. Парафін не токсичний, не має запаху, не викликає подразнення, що важливо під час використання у фермерських приміщеннях (безпечний для рослин і тварин). Також парафінові воски практично не схильні до переохолодження або розшарування під час циклів плавлення/кристалізації – їхні фазові перетворення є добре оборотними і відтворюваними. [3, 11].

Доступність та вартість: технічний парафін ТЗ – дешевий матеріал, який широко застосовується (виготовлення свічок, просочування матеріалів та ін.), завдяки чому він недорогий і широко доступний [1]. Це робить його привабливим для використання у великих об'ємах, необхідних для акумуляторів тепла, без суттєвих витрат.

У сукупності перелічені властивості показують, що парафін ТЗ відповідає багатьом вимогам до ефективного фазового акумулятора тепла: він запасав значну кількість енергії при плавленні, стабільно працює в циклах, не потребує тиску та складних заходів безпеки, і при цьому коштує недорого. Головний його недолік – низька теплопровідність – частково компенсується продуманою конструкцією акумуляторів (про що далі). Загалом парафін відноситься до найбільш вивчених і широко використовуваних органічних РСМ (phase change materials) для вирівнювання температур у будівлях і спорудах [3].

Для ілюстрації можливостей парафінового акумулятора розглянемо простий розрахунок та приклад розміщення таких акумуляторів в умовах теплиці або тваринницького приміщення.

4. Приклад розрахунку теплоакумулятора на основі парафіну ТЗ

Умова задачі: є герметична труба з нейлону завдовжки 1 м і внутрішнім діаметром 2 см, заповнена парафіном ТЗ. Нехай ця труба розміщена всередині приміщення. Потрібно оцінити:

1. Час повного розплавлення парафіну в трубці при підвищенні температури навколишнього середовища до 30 °C.

2. Кількість тепла, яке акумулюється при

цьому в парафіні.

3. На скільки часу цього тепла вистачить, щоб підтримувати температуру навколишнього середовища в діапазоні 15-20 °C у період охолодження.

Геометричні та фізичні параметри: діаметр трубки $d = 0,02$ м (радіус $r = 0,01$ м), довжина $L = 1$ м. Об'єм парафіну в трубці $V = \pi r^2 L = \pi(0,01)^2 \cdot 1 = 3,14 \cdot 10^{-4}$ м³. За густини парафіну ~ 800 кг/м³, маса заряду становить 0,25 кг (250 г). Питома теплота плавлення парафіну ТЗ близько 200 кДж/кг, а питома теплоємність 2 кДж/(кг·К). Припустимо, що парафін затвердів при температурі близько 20°C, а максимальна температура середовища, що досягається вдень, становить 30°C.

Розрахунок акумульованого тепла: при нагріванні парафіну від 20 до 30 °C (не досягаючи плавлення) кожен кілограм поглинає

$$c\Delta T = 2(30 - 20) = 20 \text{ кДж.} \quad (1)$$

Для 0,25 кг це дасть лише ~ 5 кДж накопиченої енергії. Цієї енергії дуже мало для суттєвого обігріву приміщення. Таким чином, якщо температура середовища не перевищує температуру плавлення (~ 50 °C), парафін не розплавиться повністю і його потенціал як фазового акумулятора не використовується. У такому режимі він працює лише як звичайний теплоємний матеріал (накопичення чутливого тепла), а це малий ефект.

Висновок: щоб парафін ТЗ почав плавитися і запасати значно більше тепла, навколишня температура має перевищити ~ 50 °C. У реальності внутрішнє середовище теплиці або хліва рідко нагрівається саме по собі до таких значень. Тому на практиці для заряду парафінових акумуляторів потрібні були б або спеціальні нагрівачі (наприклад, сонячні колектори, що направляють тепло в парафін), або пряме попадання сонячних променів на акумулятор (що може нагріти його вище за температуру повітря).

Припустимо, що вдалося нагріти трубу з парафіном вище за поріг плавлення – наприклад, помістивши її на сонячному світлі, де її поверхня нагрівається до ~ 60 °C (за рахунок поглинання сонця трубкою більш ефективно, ніж повітрям). Тоді парафін всередині почне плавитися при $\sim 50 \dots 53$ °C. У процесі повного розплавлення накопичиться теплота:

$$Q_L = m \cdot L \approx 0,25 \cdot 200 = 50 \text{ кДж.} \quad (2)$$

Крім цього, парафін нагріється від 20 до 50 °С (до початку плавлення) і частково понад 50 °С у рідкому вигляді. Приблизно явне тепло становитиме

$$Q_{\text{явне}} = m \cdot c \Delta T. \quad (3)$$

Якщо $\Delta T \approx 30$ °С (20→50°С), то

$$Q_{\text{явне}} = 0,25 \cdot 2 \cdot 30 = 15 \text{ кДж}. \quad (4)$$

І ще близько 10 кДж при нагріванні рідкого парафіну до 60 °С. Сумарно оціночне повне акумульоване тепло близько

$$Q_{\text{заг}} = 50 + 15 + 10 = 75 \text{ кДж}. \quad (5)$$

Час розплавлення: тепловий потік до труби визначатиметься теплообміном із навколишнім середовищем. Нейлон – поганий провідник, але сама стінка тонка, тому основний опір – конвекція від повітря до поверхні труби. Для грубої оцінки можна взяти коефіцієнт тепловіддачі $h \sim 10$ Вт/(м²·К) (природна конвекція повітря). Площа бічної поверхні трубки

$$A = \pi dL \approx 3,14 \cdot 0,02 \cdot 1 \approx 0,063 \text{ м}^2. \quad (6)$$

За перегріву поверхні труби над повітрям на $\Delta T \sim 10$ °С (наприклад, трубка 60°С, повітря 50°С) тепло буде

$$Q = hA\Delta T \approx 10 \cdot 0,063 \cdot 10 \approx 6,3 \text{ Вт}. \quad (7)$$

Щоб передати ~50 кДж прихованого тепла за такої середньої потужності, знадобиться

$$t = Q_{\text{явне}} / Q \approx 50000 / 6,3 \approx 7900 \text{ с} \quad (8)$$

тобто близько 2,2 годин. Додаючи нагрівання до плавлення, загальний час плавлення близько кількох годин. У реальності, якщо різниця температур менша або коефіцієнт h нижчий (скажімо, 5 Вт/м²·К), час може збільшитися до ~4-5 годин. Таким чином, для повної зарядки парафінового акумулятора в 1 м трубці потрібно кілька годин за умови, що він досить перегрітий відносно повітря. Якщо ж повітря тільки 30 °С, а парафін твердий (50 °С потрібно для плавлення), то, строго кажучи, час розплавлення наближається до нескінченності –

парафін взагалі не розплавиться без додаткового тепла. Це підкреслює важливість правильно підібрати температуру плавлення РСМ під реальні умови експлуатації [12].

Тепловіддача і підтримання температури 15...20°С: припустимо, накопичені ~75 кДж повністю збережені до початку похолодання. Вночі температура повітря падає до ~15°С, і теплий парафін (близько 60°С у нашому сценарії) починає охолоджуватися, віддаючи тепло. Найбільша кількість енергії виділиться під час затвердіння близько 50...53°С, однак оскільки навколишнє повітря є набагато холоднішим, парафін охолоджуватиметься досить швидко. Швидкість віддачі тепла знову ж таки визначається теплообміном: за великої різниці температур (наприклад, парафін 50°С, повітря 15°С, $\Delta T = 35$ °С) теплова потужність на початок віддачі може досягати

$$Q_{\text{max}} = hA\Delta T \approx 5 \cdot 0,063 \cdot 35 \approx 11 \text{ Вт}. \quad (\text{для } h = 5) \quad (9)$$

Із охолодженням парафіну ΔT зменшується, але поки парафін кристалізується, він утримується близько 50°С і може довго віддавати тепло за практично постійної температури (доти, доки не затвердіє весь). Однак повітря приміщення не зможе прогрітися до 50°С завдяки малому джерелу – натомість тепло витратиметься на компенсацію тепловтрат приміщення за нижчих температур повітря.

Можна оцінити тривалість обігріву за енергетичним балансом. Припустимо, щоб підтримувати повітря не нижче 15-20°С, потрібні теплонадходження еквівалентною потужністю приблизно 10 Вт (це залежить від розмірів і утеплення приміщення – ми візьмемо умовно невеликий обсяг із відносно малими втратами). Тоді акумульованих ~75 кДж вистачило б на

$$t = Q_{\text{заг}} / 10 \approx 75000 / 10 \approx 7500 \text{ с. годин обігріву} \quad (10)$$

Якщо втрати менші, наприклад 5 Вт, то час подвоїться – близько ~4,2 години. На практиці ж тепловтрати можуть бути більшими, і однієї трубки вистачить ненадовго – близько 1...3 годин підтримки температури в кращому випадку. Щоб охопити всю холодну ніч (скажімо, 10...12 годин), знадобиться вже кілька таких трубок. Лінійно оцінюючи, для 10 годин за 10 Вт потрібно ~360 кДж; ділимо на 75 кДж однієї трубки – отримуємо приб-

лизно 5 трубок. Тобто зв'язка з 5...6 трубок по 1 м з парафіном сумарно може зберегти близько $0,25 \cdot 6 = 1,5$ кг парафіну, накопичити ~ 450 кДж і віддати їх за ніч, утримуючи еквівалент ~ 10 Вт тепла. Зрозуміло, це оцінка за умови гарної тепловіддачі від трубок у повітря. Розташовуючи трубки рівномірно в просторі (наприклад, вздовж стін або між рослинами), можна досягти більш рівномірного розподілу тепла.

Важливо підкреслити, що ефективність такого акумулятора залежить від теплообміну. Нейлонова трубка обмежує тепловий потік (на відміну металевої). Якщо замінити нейлон на метал (сталь, алюміній) або додати ребристі теплообмінники, парафін заряджатиметься і розряджається швидше, віддаючи теплову потужність інтенсивніше. З іншого боку, ізоляція чи потовщення стінки уповільнить процеси. У розрахунку ми використовували спрощені припущення; насправді потрібно також враховувати тепловтрати назовні (якщо трубка торкається холодних стін) та конвективні потоки повітря.

Незважаючи на вказані обмеження, розрахунок демонструє принципову можливість використання парафіну ТЗ для накопичення тепла. У сценарії, коли парафін зможе отримувати достатньо тепла (або від активного нагрівання, або від концентрованого сонячного світла), він накопичить десятки кДж енергії на метр трубки. Далі при охолодженні ці трубки віддадуть енергію, сприяючи підтримці більш високої температури повітря, ніж без них [11, 12].

5. Застосування парафінових теплоакумуляторів у теплицях і тваринницьких приміщеннях

Практична реалізація систем із фазовим акумулятором тепла в аграрних об'єктах може бути різноманітною. Нижче наведено можливі сценарії розміщення та використання парафіну (або інших РСМ) для опалення без зовнішніх джерел:

Теплиці (парники): у сонячних теплицях можна (рис. 1) розміщувати контейнери або модулі з парафіном там, де вони отримуватимуть максимум сонячної енергії вдень. Наприклад, уздовж південної стіни або по периметру теплиці встановлюються трубки або панелі, пофарбовані в темний колір для кращого поглинання сонця. Вдень сонячне випромінювання нагріває ці модулі, розплавляючи парафін усередині. Вночі вони виді-

ляють тепло назад у теплицю. У практиці також застосовували підвісні пакети з РСМ під дахом або між рослинами. Крім стін, ефективним є укладання акумуляторів уздовж грядок або під шаром ґрунту: вдень вони акумулюють сонячне тепло від нагрітого ґрунту, а вночі обігрівають кореневу зону, запобігаючи переохолодженню рослин. Реалізовано проекти, де північна стіна теплиці (яка зазвичай глуха й утеплена) облицьована панелями з РСМ для поглинання тепла вдень і віддачі вночі [4]. Окремо можна відзначити комбіновані системи: бочки з водою, в які поміщені ємності з парафіном – така комбінація використовує і високу теплоємність води, і латентне тепло парафіну, що дає змогу зберігати більше енергії в тому ж обсязі.



Рисунок 1 [5] – Приклад розміщення модулів з фазовим матеріалом на внутрішній стіні сонячної теплиці. Відбивні пакети, заповнені РСМ (парафіновою сумішшю), акумулюють сонячне тепло вдень і знижують тепловтрати через стіну вночі, підвищуючи нічну температуру повітря

Пташники та свинарники: у приміщеннях для тварин температура зазвичай підтримується вище за 0 °С, а для молодняка потрібно $+15...+25$ °С. Тут фазові матеріали можуть згладжувати добові коливання, зменшуючи витрати на підігрів. Парафінові теплоакумулятори можна монтувати під стелею приміщення або вздовж верхньої частини стін, де вдень накопичується тепле повітря. Нагріваючись від цього повітря (або від сонячного світла через вікна), вони плавитимуться. Вночі теплий парафін буде остигати, віддаючи тепло вниз у зону, де перебувають тварини. Наприклад, у пташниках можна підвищувати касети з парафіном під стелею, які вдень поглинають надлиш-

кове тепло (птахи виділяють багато тепла в активний період), а вночі повільно остигають. У свинарниках можливе розміщення теплоаккумуляторів у підлозі (під настилом), особливо в зонах для поросят, щоб забезпечити підігрів підлоги вночі. Однак у таких випадках краще РСМ з нижчою точкою плавлення ($\sim 25\text{-}30^\circ\text{C}$), щоб вони ефективно заряджалися від температури повітря тваринницького приміщення (зазвичай $\sim 25^\circ\text{C}$ вдень). Якщо ж використовується парафін ТЗ з $t_{\text{пл}} \sim 50^\circ\text{C}$, може знадобитися інтеграція із системою опалення: наприклад, удень за наявності надлишку електроенергії або сонячного тепла парафінові модулі цілеспрямовано підігріваються до плавлення (вбудованими електронагрівачами або сонячними колекторами на даху), а вночі вже пасивно віддають тепло, зменшуючи навантаження на основний обігрівач.

Зерносховища та склади: ще одна потенційна сфера застосування – аграрні сховища, де важливий контроль вологості та температури. Модулі з парафіном, встановлені під дахом, можуть згладжувати піки нагріву вдень (запобігаючи перегріву зерна) і віддавати тепло вночі, не даючи сировині переохолодитися і відволожитися на холоді. Це пасивно економить енергію на вентиляцію і підігрів повітря [13].

Загальним принципом розміщення є забезпечення гарного теплообміну між фазовим матеріалом і повітрям приміщення. Форм-фактор акумуляторів може варіюватися: це можуть бути трубки, панелі, кульки, пакети. Чим більша поверхня контакту з повітрям, тим ефективніший заряд/розряд. У теплицях пакети з парафіном часто роблять плоскими і розвішують як фіранки або укладають по стінах. У пташниках і свинарниках розміщують у захищених коробах, щоб тварини не пошкодили, але з циркуляцією повітря через ці короби.

Переваги застосування парафінових акумуляторів тепла в аграрних спорудах можна підсумувати так:

- Пасивність і автономність: система не потребує керування електронікою або подачі енергії – парафін автоматично поглинає і віддає тепло при зміні температури, діючи за фізичними законами фазового переходу.
- Економія енергії: завдяки використанню безкоштовної сонячної енергії або утилізації надлишкового тепла вдень знижується споживання палива або електроенергії на нічний обігрів. РСМ-

акумулятори допомагають підтримувати мікроклімат більш ефективно, що підтверджено досвідом експлуатації теплиць з РСМ – вони були теплішими на $5\text{...}10^\circ\text{F}$ ($\approx 3\text{...}6^\circ\text{C}$) вночі, порівняно з аналогічними без РСМ [5].

- Вирівнювання температур і кліматичний комфорт: рослини і тварини відчувають менше стресу від перепадів температур. РСМ згладжує піки – у спекотний полудень поглинає зайве тепло (запобігаючи перегріванню до небезпечних значень), а вночі підтримує температуру, запобігаючи різкому охолодженню. Це покращує ріст рослин, знижує ризик захворювань у худоби та птиці.

- Безпека та екологія: парафін інертний і безпечний, не виділяє шкідливих речовин за робочих температур. На відміну від традиційних опалювачів, пасивний акумулятор не спалює кисень, не викидає вуглекислий газ і водяну пару. Термін служби парафінового РСМ вимірюється тисячами циклів плавлення/затвердіння без істотної деградації властивостей [14, 15], що означає роки експлуатації. Утилізація відпрацьованого парафіну не становить складності – це відносно екологічний вуглеводневий віск, який можна переплавити або використовувати повторно.

- Немає тиску та ризику вибуху: системи на основі води вимагають враховувати розширення води під час замерзання (щоб не розірвало трубопроводу) або використовувати тиск для зберігання гарячої води $> 100^\circ\text{C}$. З парафіном таких проблем немає: він плавиться за атмосферного тиску, розширення мінімальне, навіть повністю запаєні контейнери не розриває. Це підвищує надійність і знижує вимоги до міцності резервуарів (наприклад, пластикові або тонкометалеві ємності підходять для парафіну, тоді як для води за 120°C знадобився б важкий сталевий бак).

- Сумісність з наявними конструкціями: завдяки невисокій корозійній активності парафінові акумулятори можна інтегрувати в дерев'яні, пластикові, металеві конструкції без ризику їх пошкодження. Вони спокійно співіснують з гідропонікою, з ґрунтом, з теплоізоляцією тощо. Їх можна додати в уже побудовані об'єкти (наприклад, доповнити діючу теплицю підвісними РСМ-панелями) [14].

Зрештою, застосування парафіну ТЗ як теплоаккумулятивного матеріалу в аграрних спорудах видається перспективним напрямком для енергозбереження. Незважаючи на необхідність забезпечення достатнього нагріву парафіну до плавлення, правильна організація системи (вибір місця,

форми і способу підігріву) дає змогу ефективно використовувати приховану теплоту фазового переходу. Міжнародний досвід і дослідження підтверджують, що фазові акумулятори на основі парафіну та інших РСМ здатні підвищити нічну температуру в теплицях на кілька градусів [3], знизити тепловтрати та енерговитрати, тим самим сприяючи сталому розвитку сільського господарства. Таким чином, використання матеріалів з фазовими переходами, таких як парафін, пропонує науково обґрунтований і практично здійснений спосіб поліпшення терморегуляції в аграрних будівлях, поєднуючи простоту і ефективність пасивних систем [11, 15].

6. Висновки.

В результаті проведеного аналізу встановлено, що парафін Т3 є ефективним фазозмінним матеріалом (PCM) для використання в системах пасивного теплонакопичення в аграрних спорудах. Його висока питома теплота плавлення, хімічна стабільність, екологічна безпечність та доступна вартість дозволяють розглядати парафін як перспективну альтернативу традиційним теплоносіям.

Показано, що застосування парафінових теплоакумуляторів дозволяє зменшити добові коливання температури в теплицях, пташниках та свинарниках, знижуючи витрати на активне опалення та покращуючи умови утримання рослин і тварин. Однак ефективність теплонакопичення суттєво залежить від відповідності температури фазового переходу умовам експлуатації. Зокрема, температура плавлення парафіну Т3 (близько 50...55 °C) перевищує типові значення внутрішнього повітря в аграрних спорудах, що зумовлює потребу у використанні зовнішніх джерел тепла (сонячні колектори, електронагрівачі) для його повноцінного «заряду».

Встановлено, що навіть невелика кількість парафіну, за умов повного фазового переходу, здатна акумулювати значні обсяги теплової енергії. Розрахункові моделі демонструють, що система з кількох модулів парафіну може забезпечити підтримку мікроклімату впродовж критичних нічних годин. Проте низька теплопровідність парафіну потребує врахування при проектуванні теплообмінних елементів, зокрема за рахунок збільшення площі теплового контакту або використання теплопровідних домішок.

Таким чином, застосування парафіну Т3 у якості теплоакумулятивного матеріалу в аграрному секторі є науково обґрунтованим і технологічно здійсненим рішенням для підвищення енергоефективності й сталості виробництва. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оптимізацію геометрії акумуляторів, комбінування з іншими РСМ із нижчою температурою плавлення та інтеграцію з відновлюваними джерелами енергії.

Особистий внесок авторів CRediT

Писаревський І. О.: інформаційний пошук, аналіз даних. **Мукмінов І.І.:** планування роботи; формулювання висновків.

Література

1. **W. Mhike et al.** Thermally conductive phase-change materials for energy storage based on low-density polyethylene, soft Fischer-Tropsch wax and graphite // *Thermochimica acta*. – 2012. – Vol. 527. – P. 75-82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.10.008>.
2. **X. Bi et al.** Application of phase change material on solar-greenhouse back wall and its effects on indoor thermal environment and cucumber production in winter // *Journal of building engineering*. – 2024. – Vol. 93. – P. 109883. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109883>.
3. **Y. Cui et al.** Recent progress of phase change materials and their applications in facility agriculture and related-buildings – a review // *Buildings*. – 2024. – Vol. 14, no. 9. – P. 2999. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14092999>.
4. **Chen W., Zhou G.** Experimental investigation on heating performance of long- and short-term PCM storage in Chinese solar greenhouse // *Journal of energy storage*. – 2024. – Vol. 99. – P. 113466. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113466>.
5. Water barrels vs phase change material. Ceres Greenhouse Solutions. URL: <https://ceresgs.com/water-barrels-vs-phase-change-material/> (дата звернення 07.08.2025).
6. **S. M. Thaler et al.** An innovative heating solution for sustainable agriculture: a feasibility study on the integration of phase change materials as passive heating elements // *Applied sciences*. – 2024. – Vol. 14, no. 16. – P. 7419. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14167419>.

7. **F. Lygerakis et al.** Enhancing building energy efficiency with innovative paraffin-based phase change materials // *Energies*. – 2024. – Vol. 17, no. 16. – P. 4155. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17164155>.
8. **E.-P. Ovadiuc et al.** Integration of phase-change materials in ventilated façades: a review regarding fire safety and future challenges // *Fire*. – 2024. – Vol. 7, no. 7. – P. 244. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire7070244>.
9. **R. Vanaga et al.** Laboratory testing of small scale solar facade module with phase change material and adjustable insulation layer // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, no. 3. – P. 1158. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15031158>.
10. **Hartig J. U., Haller P.** Combustion characteristics and mechanical properties of wood impregnated with a paraffinic phase change material // *European journal of wood and wood products*. – 2023. – Vol. 82. – P. 329-339 DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-023-02016-4>.
11. **M. M. Ismail et al.** Modeling the use of phase change materials on thermal performance of passive solar greenhouses in cold climates // *International journal of thermofluids*. – 2023. – Vol.19. – P. 100380. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100380>.
12. **Klitou A., Klitou T., Fokaides P. A.** Modelling a packed-bed latent heat thermal energy storage unit and studying its performance using different paraffins // *International journal of sustainable energy*. – 2024. – Vol. 43, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786451.2024.2306416>.
13. **J. Emeema et al.** Investigations on paraffin wax/CQD composite phase change material – Improved latent heat and thermal stability // *Journal of energy storage*. – 2024. – Vol. 85. – P. 111056. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111056>.
14. **Amoatey P., Al-Jabri K., Al-Saadi S.** Influence of phase change materials on thermal comfort, greenhouse gas emissions, and potential indoor air quality issues across different climatic regions: a critical review. *International journal of energy research*. – 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.8734>.
15. **M. Vega et al.** Life cycle assessment of the inclusion of phase change materials in lightweight buildings / *Journal of energy storage*. – 2022. – Vol. 56. – P. 105903. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105903>.

Отримана в редакції 07.08.2025, прийнята до друку 29.08.2025

Utilization of paraffin as a phase change heat storage material in agricultural structures

Igor Pysarevskiy¹, Igor Mukminov²✉

¹⁻²Odesa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odessa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: 2fatalrew@gmail.com

ORCID: ¹<http://orcid.org/0009-0007-3920-9601>; ²<http://orcid.org/0000-0002-3674-9289>

The article presents a comprehensive investigation into the feasibility of employing T3-grade paraffin as a phase-change material (PCM) for passive thermal energy storage in agricultural structures. The thermophysical properties of paraffin—including latent heat of fusion, phase-transition temperature range, thermal conductivity, and long-term stability—are examined in detail, with emphasis on their influence on the efficiency of heat-management processes in controlled-environment facilities. T3 paraffin is shown to possess high energy density, chemical inertness, and operational reliability, rendering it suitable for prolonged use without significant degradation and with minimal biological or environmental risk. Thermal-performance calculations were conducted to evaluate the dynamics of heat absorption and release under various external heating-cooling conditions. The modeling indicates that the incorporation of PCM modules effectively mitigates diurnal temperature fluctuations and enhances thermal stability in greenhouses, poultry houses, and pig-production facilities. Several engineering approaches for integrating paraffin-based thermal storage systems into building envelopes and technological infrastructures are discussed, including modular block containers, latent-heat storage panels, and tubular reservoirs optimized for improved heat-exchange area. The study highlights that the appropriate selection of phase-transition temperature and the optimization of thermal charging are critical determinants of overall system effectiveness. The results demonstrate that T3 paraffin can significantly decrease the demand for active heating during nighttime periods and short-term cold spells. Prospective research directions are outlined, focus-

ing on the refinement of PCM module design and the adaptation of material parameters to the specific operational conditions of agricultural infrastructure.

Keywords: Paraffin T3; Phase change material; Heat storage; Agricultural buildings; Thermal energy; Phase transition; Energy efficiency; Greenhouse; Passive heating; PCM.

References

1. **Mhike, W. et al.** (2012) Thermally conductive phase-change materials for energy storage based on low-density polyethylene, soft Fischer–Tropsch wax and graphite. *Thermochimica acta*, 527, 75–82.
2. **Bi, X. et al.** (2024) Application of phase change material on solar-greenhouse back wall and its effects on indoor thermal environment and cucumber production in winter. *Journal of building engineering*, 93, 109883.
3. **Cui, Y. et al.** (2024) Recent progress of phase change materials and their applications in facility agriculture and related-buildings—a review. *Buildings*, 14, 9, 2999.
4. **Chen, W., Zhou, G.** (2024) Experimental investigation on heating performance of long- and short-term PCM storage in Chinese solar greenhouse. *Journal of energy storage*, 99, 113466.
5. Water barrels vs phase change material. Ceres Greenhouse Solutions. Retrieved 07 August 2025 from <https://ceresgs.com/water-barrels-vs-phase-change-material/>.
6. **Thaler, S. M. et al.** (2024) An innovative heating solution for sustainable agriculture: a feasibility study on the integration of phase change materials as passive heating elements. *Applied sciences*, 14, 16, 7419.
7. **Lygerakis, F. et al.** (2024) Enhancing building energy efficiency with innovative paraffin-based phase change materials. *Energies*, 17, 16, 4155.
8. **Ovadiuc, E.-P. et al.** (2024) Integration of phase-change materials in ventilated façades: a review regarding fire safety and future challenges. *Fire*, 7, 7, 244.
9. **Vanaga, R. et al.** (2022) Laboratory testing of small scale solar facade module with phase change material and adjustable insulation layer. *Energies*, 15, 3, 1158.
10. **Hartig, J. U., Haller, P.** (2023) Combustion characteristics and mechanical properties of wood impregnated with a paraffinic phase change material. *European journal of wood and wood products*.
11. **Ismail, M. M. et al.** (2023) Modeling the use of phase change materials on thermal performance of passive solar greenhouses in cold climates. *International journal of thermofluids*, 19, 100380.
12. **Klitou, A., Klitou, T., Fokaides, P. A.** (2024) Modelling a packed-bed latent heat thermal energy storage unit and studying its performance using different paraffins. *International journal of sustainable energy*, 43, 1.
13. **Emeema, J. et al.** (2024) Investigations on paraffin wax/CQD composite phase change material - Improved latent heat and thermal stability. *Journal of energy storage*, 85, 111056.
14. **Amoatey, P., Al-Jabri, K., Al-Saadi, S.** (2022) Influence of phase change materials on thermal comfort, greenhouse gas emissions, and potential indoor air quality issues across different climatic regions: a critical review. *International journal of energy research*, 2022.
15. **Vega, M. et al.** (2022) Life cycle assessment of the inclusion of phase change materials in lightweight buildings. *Journal of energy storage*, 56, 105903.

Received 07 August 2025

Approved 29 August 2025

Available in Internet 30 September 2025