

Бошкова І.Л.

<https://orcid.org/0009-0009-5599-2709>

Одеський національний технологічний університет

Волгушева Н.В.

<https://orcid.org/0000-0002-9984-6502>

Одеський національний технологічний університет

Мукмінов І.І.

<https://orcid.org/0000-0002-3674-9289>

Одеський національний технологічний університет

Писаревський І.О.

<https://orcid.org/0009-0007-3920-9601>

Одеський національний технологічний університет

Гречановський А.П.

<https://orcid.org/0000-0002-8257-5769>

Одеський національний технологічний університет

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ АКУМУЛЯТОРІВ ТЕПЛОТИ НИЗЬКОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ДЛЯ ТЕПЛИЦЬ

Розглядається питання підвищення ефективності акумуляції тепла низького температурного потенціалу з метою підтримки мікроклімату теплиці. Наголошується, що вирішення цієї проблеми потребує оптимізації акумулювальних матеріалів, конструктивного розміщення акумуляторів та систем керування тепловими потоками, що створює основу для розробки енергоефективних та стійких тепличних комплексів. Аналізується використання теплових акумуляторів сонячної енергії в теплицях як перспективний напрямок підвищення енергоефективності та зниження залежності від традиційних джерел тепла. Підкреслюється, що використання фазоперехідних матеріалів забезпечують більш рівномірну віддачу теплоти в заданому температурному діапазоні, проте їх практичне застосування ускладнюється високою вартістю, обмеженою довговічністю і складністю підбору оптимальної температури фазового переходу для конкретних кліматичних умов. На підставі аналізу літературних джерел встановлено, що проблема застосування теплових акумуляторів сонячної енергії в теплицях носить комплексний характер і пов'язана з фізичними обмеженнями сонячного ресурсу, властивостями матеріалів, що акумулюють, конструктивними та економічними факторами. Вирішення цієї проблеми вимагає оптимізації параметрів теплових акумуляторів, вибору ефективних матеріалів, що акумулюють, і розробки адаптивних систем управління тепловим режимом теплиць. Наведені схемні рішення систем акумулювання теплової енергії для теплиць. Розробка схем здійснювалась для теплових акумуляторів явного та прихованого типу, де основним елементом теплового акумулятора явного типу був теплообмінний канал, заповнений щільним шаром гранульованого матеріалу. Запропонований ґрунтовий кожухотрубний регенератор з фазоперехідним матеріалом, який передбачає акумулювання надлишкової теплоти повітря у внутрішньому об'ємі теплиці з можливістю її використання при зниженні температури повітря у нічні часи. Наголошується, що остаточний вибір системи накопичення теплоти залежить від вартості матеріалу та виготовлення, простоти конструкції та можливості інтеграції в об'єм теплиці.

Ключові слова: сонячна енергія, акумулятори теплової енергії, фазоперехідні матеріали, гранульовані матеріали, схемні рішення.



Постановка проблеми. Енергоефективність тепличних господарств залишається одним із ключових завдань сучасного агропромислового комплексу [1]. Значна частина споживаної енергії витрачається на підтримку оптимального мікроклімату для вирощування рослин, особливо в холодні та перехідні періоди року [2]. При цьому сонячна енергія є найбільш доступним та екологічно чистим джерелом тепла, проте її використання обмежене через нерегулярне надходження та низький температурний потенціал. Низькотемпературні теплові потоки, характерні для сонячного випромінювання та накопиченої у тепличних конструкціях енергії, важко використовувати безпосередньо для обігріву без ефективних систем акумулювання. Існуючі методи накопичення тепла часто характеризуються обмеженою ємністю, значними тепловими втратами та великогабаритністю акумулювальних пристроїв, що знижує їхню практичну ефективність в умовах обмеженого простору теплиці. Внаслідок цього виникає актуальна науково-технічна проблема: підвищення ефективності акумуляції тепла низького температурного потенціалу з метою стабільної підтримки мікроклімату теплиці за мінімального споживання традиційних енергоносіїв. Вирішення цієї проблеми потребує оптимізації акумулювальних матеріалів, конструктивного розміщення акумуляторів та систем керування тепловими потоками, що створює основу для розробки енергоефективних та стійких тепличних комплексів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки виник підвищений інтерес до пошуку шляхів утилізації низькопотенційної теплової енергії [3]. Одним із найбільш перспективних напрямків є застосування теплових акумуляторів сонячної енергії, що дозволяють згладити нерівномірність теплонадходжень та забезпечити більш стабільний тепловий режим у теплицях. [4]. Аналіз літературних джерел показує, що найпоширенішим підходом є інтеграція сонячних теплових систем з акумулювальними пристроями короткострокової та сезонної дії [5 – 7]. Використання теплових акумуляторів сонячної енергії в теплицях розглядається як перспективний напрямок підвищення енергоефективності та зниження залежності від традиційних джерел тепла [8, 9]. Проте практичне впровадження таких систем супроводжується низкою технічних, економічних та експлуатаційних проблем.

У ряді робіт розглядаються системи, в яких надмірна сонячна теплота, що отримується в ден-

ний час, акумулюється і використовується в нічний час, що дозволяє суттєво знизити споживання традиційних енергоносіїв [10, 11]. Істотна увага у дослідженнях приділяється вибору акумулювальних матеріалів [12]. Традиційні акумулювальні матеріали (вода, камінь, бетон) мають обмежену питому теплоємність, що збільшує габарити акумуляторів [14, 15]. У сучасних дослідженнях активно вивчаються матеріали з фазовим переходом, які мають високу щільність теплової енергії, що акумулюється, і дозволяють зменшити габарити акумуляторів [16 – 18]. Підкреслюється, що такі матеріали забезпечують більш рівномірну віддачу теплоти в заданому температурному діапазоні, проте їх практичне застосування ускладнюється високою вартістю, обмеженою довговічністю і складністю підбору оптимальної температури фазового переходу для конкретних кліматичних умов [19], а також загальний енергетичний ефект системи знижують недостатня теплопровідність акумуляторів. Особлива увага приділяється питанням конструктивної інтеграції теплових акумуляторів до тепличних споруд [21 – 23]. Зазначається, що нераціональне розміщення пристроїв, що акумулюють, може призводити до погіршення світлового режиму і зниження корисної площі вирощування рослин [24]. Технологія накопичення теплової енергії у поєднанні з матеріалами з фазовим переходом – ефективне рішення, що дозволяє накопичувати енергію у процесі виробництва сонячної енергії та вивільняти її за необхідності [25]. Такий підхід має незаперечну перевагу у вирішенні проблеми періодичності сонячної енергії.

Основною проблемою використання теплових акумуляторів сонячної енергії в теплицях є нерівномірність надходження сонячної енергії протягом доби та сезону [26, 27]. Технологія накопичення енергії може зменшувати піки та заповнювати спади, оптимізуючи моделі споживання енергії та підвищуючи енергоефективність. У огляді [28] систематично розглянуті новітні дослідження в технології накопичення тепла з фазовим переходом та приділено особливу увагу активним методам з використанням зовнішніх польових збурень та гібридним підходам для покращення теплопередачі з ФПМ.

Таким чином, проблема застосування теплових акумуляторів сонячної енергії в теплицях носить комплексний характер і пов'язана з фізичними обмеженнями сонячного ресурсу, властивостями матеріалів, що акумулюють, конструктивними та економічними факторами. Вирішення цієї про-

блеми вимагає оптимізації параметрів теплових акумуляторів, вибору ефективних матеріалів, що акумулюють, і розробки адаптивних систем управління тепловим режимом теплиць.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка схемних рішень акумуляторів явної теплоти на основі щільних шарів гранульованих матеріалів та прихованої теплоти на основі фазоперехідних матеріалів рідина – тверде тіло, інтегрованих у тепличне господарство.

Виклад основного матеріалу. Схемні рішення систем акумулювання теплової енергії для теплиць. Встановлено, що розміщення теплових акумуляторів у теплицях обмежено доступним обсягом та вимогами до освітленості рослин. Великогабаритні акумулятори можуть знижувати корисну площу вирощування та погіршувати світловий режим, що негативно впливає на врожайність. Висока початкова вартість теплових акумуляторів, особливо під час використання сучасних матеріалів, збільшує термін окупності системи. Для малих та середніх тепличних господарств це часто є визначальним фактором відмови від впровадження сонячних теплових акумуляторів. Внаслідок цього постало завдання розробки ефективних схемних рішень для теплових акумуляторів, інтегрованих у тепличне господарство. Дослідження проводилися для двох типів теплових акумуляторів: явного та прихованого типу. Основним елементом теплового акумулятора явного типу був теплообмінний канал, заповнений щільним шаром гранульованого матеріалу, наприклад, щебенем. При інтенсивному сонячному випромінюванні теплота поглиналася водою, що проходить під дахом теплиці, яка потім подавалася на вхід теплообмінного каналу. При теплообміні між потоком води та поверхнею частинок відбувається акумуляція теплоти шаром твердих частинок. Вертикальне розташування каналу дозволило вирішити проблему гідравлічного опору шару і дає можливість вибору насоса малої потужності, необхідної для прокачування води каналами замкнутого контуру. Схема установки представлена на рис. 1.

На виході з теплообмінного каналу встановлений насос, який подає охолоджену воду до каналів під дах теплиці, де вона знову нагрівається. Умови розташування теплообмінного каналу із щебенем за межами теплиці є кращими, оскільки корисна площа теплиці не зменшується. Раніше авторами пропонувалося встановлювати в теплиці ґрунтовий регенератор [29], недоліком якого виявилася складність продування щільного шару щебеню

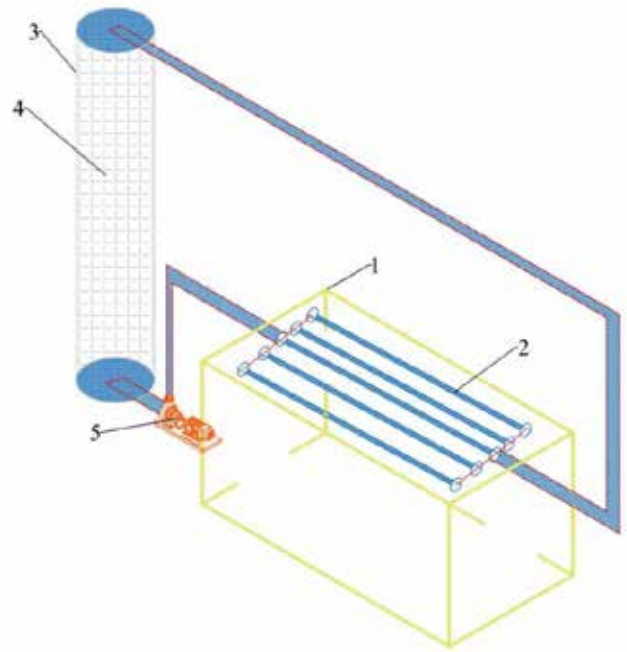


Рис. 1. Система акумуляції низькопотенційної теплоти сонячного випромінювання явного типу
 1 – корпус теплиці; 2 – циркуляційний нагрівальний контур з водою; 3 – теплообмінний канал; 4 – щільний шар щебеню; 5 – рідинний насос.

повітрям. Для усунення цього недоліку та використання переваг використання фазоперехідних матеріалів пропонується встановити ґрунтовий регенератор

Алгоритм функціонування ґрунтового регенератора полягає в наступному. При досягненні температури повітря в теплиці 30-35 °С на день з інтенсивним сонячним випромінюванням включається каналний вентилятор, розташований у вихідному повітропроводі, після чого тепле повітря по повітропроводу надходить у теплообмінний канал, в якому здійснюється теплообмін між потоком повітря і пучком труб із фазоперехідним матеріалом. Волога, що конденсується в нічний час на пучку труб, стікає через перфорований сегмент теплообмінного каналу дренажний канал трикутного перерізу. На виході з каналу конденсат через трубку, з'єднану зі збіркою конденсату, при включенні насоса сконденсована вода відкачується в ємність. При досягненні температури в теплиці заданого рівня сигнали з датчиків температури надходять в систему автоматики, яка керує заслінок, та вони закриваються після закінчення періоду нагрівання фазоперехідного матеріалу. При зниженні температури повітря в теплиці нижче допустимого рівня, включається вентилятор в теплиці і повітря, проходячи через трубний

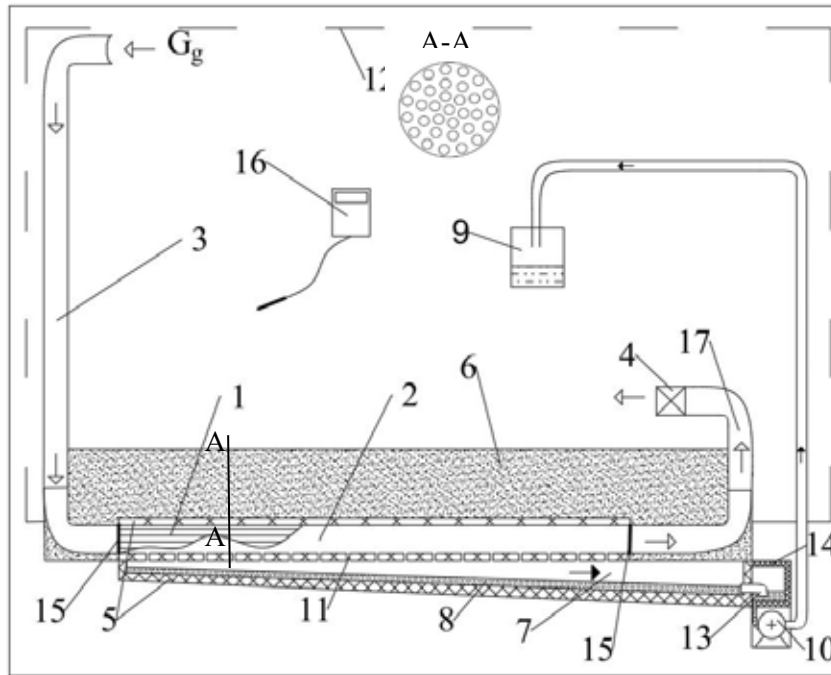


Рис 2. Схема установки грунтового регенератора кожухотрубного типу з фазоперехідним матеріалом у теплиці

1 – пучок труб з фазоперехідним матеріалом, 2 – теплообмінний канал, 3 – повітропровід, 4 – каналний вентилятор, 5 – теплоізоляція, 6 – ґрунт теплиці, 7 – дренажний канал, 8 – конденсат, 9 – ємність для збору конденсату, 10 – насос, 11 – теплиці, 13 – дренажна трубка, 14 – збірка конденсату, 15 – теплоізольовані заслінки, 16 – датчики температури, 17 – вихідний повітропровід

пучок, нагрівається від теплоти фазового переходу та надходить у внутрішній простір теплиці і температура підвищується. Встановлені теплоаккумуляційні канали в трубному пучку пропонуються заповнювати модифікованим парафіном або іншою речовиною, температура фазового переходу якого корелюється з допустимою температурою повітря в теплиці.

Висновки. Установка теплообмінних каналів із щебенем має перевагу для існуючих теплиць, оскільки не потребує глобальної перебудови теплиці. Для теплиць, що знову будуються, раціонально передбачити встановлення регенеративного теплообмінника-утилізатора з фазоперехідним матеріалом, що вимагає додаткової конструкторської розробки.

Незважаючи на прогрес у теорії та випробуванні пілотних установок, залишаються питання, які ще не отримали універсального вирішення:

оптимізація зарядки та віддачі тепла: важливо забезпечити ефективний теплопередавальний інтерфейс між акумулятором та внутрішнім простором теплиці, а також адаптивне керування режимами для різних кліматичних умов; економічна привабливість: вартість матеріалів та установки залишається високою для широкого комерційного розповсюдження, особливо у невеликих господарствах. Ці питання потребують уважного розгляду у подальших дослідженнях.

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

Список літератури:

1. 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: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/985/1/012013>
2. Castro R. P., Dinho da Silva P., Pires L. C. C. Advances in Solutions to Improve the Energy Performance of Agricultural Greenhouses: A Comprehensive Review. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 14. P. 6158. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14146158>

3. Low-grade thermal energy utilization: Technologies and applications / D. Ji et al. *Applied Thermal Engineering*. 2024. P. 122618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122618>
4. Jobir Axadov, Sevinch Muzafarova, Jurabek Kamolov. Use of heat accumulators in greenhouse type passive solar heating systems. *International Journal of Science and Research Archive*. 2025. Vol. 14, no. 3. P. 1174–1178. DOI: <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2025.14.3.0787>
5. Ding D. Integration of Active Solar Thermal Technologies in Greenhouses: A Mini Review. *Frontiers in Energy Research*. 2021. Vol. 9. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.757553>
6. 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: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/985/1/012013>
7. The Advancements in Agricultural Greenhouse Technologies: An Energy Management Perspective / S. Nagarsheth et al. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, no. 8. P. 3407. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17083407>
8. Thermal Performance of a Solar Heat Storage Accumulator Used For Greenhouses Conditioning / M. Hazami et al. *American Journal of Environmental Sciences*. 2005. Vol. 1, no. 4. P. 270–277. DOI: <https://doi.org/10.3844/ajessp.2005.270.277>
9. Assessment of the greenhouse climate with a new packed-bed solar air heater at night, in Tunisia/S. Bouadila et al. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2014. Vol.35. P. 31–41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.051>
10. Thermal Performance of a Solar Heat Storage Accumulator Used For Greenhouses Conditioning / M. Hazami et al. *American Journal of Environmental Sciences*. 2005. Vol. 1, no. 4. P. 270–277. DOI: <https://doi.org/10.3844/ajessp.2005.270.277>
11. Advances in thermal energy storage: Fundamentals and applications / H. M. Ali et al. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2024. Vol. 100. P. 101109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2023.101109>
12. A critical review on thermal energy storage materials and systems for solar applications / D. M. Reddy Prasad et al. *AIMS Energy*. 2019. Vol. 7, no. 4. P. 507–526. DOI: <https://doi.org/10.3934/energy.2019.4.507>
13. Performance assessment of combining rock-bed thermal energy storage and water filled passive solar sleeves for heating Canarian greenhouse / A. Bazgaou et al. *Solar energy*. 2020. Vol. 198. P. 8–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.041>
14. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108964>
15. Effect of sensible heat storage materials on the thermal performance of solar air heaters: State-of-the-art review / P. R. Olivkar et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 157. P. 112085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112085>
16. Venkateswarlu K., Ramakrishna K. Recent advances in phase change materials for thermal energy storage-a review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2021. Vol. 44, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03308-7>
17. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.113134>
18. A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications / K. Faraj et al. *Journal of Energy Storage*. 2021. Vol. 33. P. 101913. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101913>
19. Calborean A., Máthé L., Bruj O. Phase Change Materials for Thermal Management in Lithium-Ion Battery Packs: A Review. *Batteries*. 2025. Vol. 11, no. 12. P. 432. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries11120432>
20. Nanofluids in Thermal Energy Storage Systems: A Comprehensive Review / M. S. Peer et al. *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 3. P. 707. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18030707>
21. Barriers and Opportunities Regarding the Implementation of Rooftop Eco.Greenhouses (RTEG) in Mediterranean Cities of Europe / I. Cerón-Palma et al. *Journal of Urban Technology*. 2012. Vol. 19, no. 4. P. 87–103. DOI: <https://doi.org/10.1080/10630732.2012.717685>
22. Ding D. Integration of Active Solar Thermal Technologies in Greenhouses: A Mini Review. *Frontiers in Energy Research*. 2021. Vol. 9. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.757553>
23. Castro R. P., Dinho da Silva P., Pires L. C. C. Advances in Solutions to Improve the Energy Performance of Agricultural Greenhouses: A Comprehensive Review. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 14. P. 6158. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14146158>
24. Solar radiation distribution inside a greenhouse with south-oriented photovoltaic roofs and effects on crop productivity / M. Cossu et al. *Applied Energy*. 2014. Vol. 133. P. 89–100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.070>

25. Osibodu S. J., Adeyinka A. M., Mbelu O. V. Phase change material integration in concrete for thermal energy storage: techniques and applications in sustainable building. *Sustainable Energy Research*. 2024. Vol. 11, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40807-024-00138-8>
26. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.118739>
27. Experimental Evaluation of Thermal Energy Storage (TES) with Phase Change Materials (PCM) for Ceiling Tile Applications / M. Velasco-Carrasco et al. *Future Cities and Environment*. 2020. Vol. 6, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.5334/fce.101>
28. Phase change thermal energy storage: Materials and heat transfer enhancement methods / X. Zhai et al. *Journal of Energy Storage*. 2025. Vol. 123. P. 116778. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116778>
29. Mukminov, I., Volgusheva, N., Georgiesh, C., & Boshkova, I. Experimental study of a pilot unit of a ground regenerator for greenhouses. *ScienceRise*, 2022, vol. 2, pp. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2022.002411>

Boshkova I.L., Volgusheva N.V., Mukminov I.I., Pysarevskiy I.I., Hrechanovskiy A.P. PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF LOW-TEMPERATURE THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS FOR GREENHOUSES

The paper addresses the issue of improving the efficiency of low-temperature thermal energy accumulation in order to maintain the greenhouse microclimate. It is emphasized that solving this problem requires optimization of heat storage materials, structural placement of thermal accumulators, and thermal flow control systems, which forms the basis for the development of energy-efficient and sustainable greenhouse complexes. The use of solar thermal energy storage systems in greenhouses is analyzed as a promising approach to increasing energy efficiency and reducing dependence on conventional heat sources. It is noted that the use of phase change materials ensures a more uniform heat release within a specified temperature range; however, their practical application is constrained by high cost, limited durability, and the complexity of selecting an optimal phase transition temperature for specific climatic conditions. Based on an analysis of the literature, it has been established that the application of solar thermal energy storage systems in greenhouses is a complex problem associated with physical limitations of the solar resource, properties of storage materials, as well as structural and economic factors. Addressing this issue requires optimization of thermal accumulator parameters, selection of efficient storage materials, and development of adaptive control systems for greenhouse thermal regimes. Schematic solutions of thermal energy storage systems for greenhouses are presented. The system designs were developed for both sensible and latent heat storage systems, where the main element of the sensible heat storage unit is a heat exchange channel filled with a dense layer of granular material. A soil-based shell-and-tube regenerator with a phase change material is proposed, which enables the accumulation of excess heat from the air inside the greenhouse with the possibility of its utilization during nighttime temperature drops. It is emphasized that the final selection of a thermal energy storage system depends on material and manufacturing costs, simplicity of design, and the feasibility of integration into the greenhouse volume.

Keywords: solar energy, thermal energy storage, phase change materials, granular materials, schematic solutions.

Дата першого надходження статті до видання: 30.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026