

УДК 697.329

старший викладач **Степан Мисак**,
stepan.y.mysak@lpnu.ua, ORCID: 0000-0003-2064-7015,
професор **Степан Шаповал**,
stepan.p.shapoval@lpnu.ua, ORCID: 0000-0003-4985-0930,
доцентка **Галина Матіко**,
halyna.f.matiko@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-5482-2307
Національний університет «Львівська політехніка»

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА СИСТЕМА СОНЯЧНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ГІБРИДНОГО ГЕЛІОКОЛЕКТОРА

Анотація. Відповідно до зобов'язань, взятих на себе в рамках Паризької кліматичної угоди, наукова спільнота ініціювала стратегічне нарощування частки відновлюваних джерел енергії з одночасним поетапним скороченням залежності від традиційних вуглецевих палив. Пріоритет надається прискоренню розвитку фотовольтаїчної галузі, яка демонструє постійне нарощування потужностей протягом останніх десятиліть. Відповідно до енергетичних та кліматичних стратегій Європейського Союзу, планується суттєве збільшення обсягів генерації енергії за рахунок сонячних джерел. Тому стаття присвячена розробленню системи сонячного теплопостачання на основі гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора із вдосконаленою конструкцією та аналізу основних характеристик її роботи із застосуванням комп'ютерного моделювання. Застосовуючи програмний комплекс SolidWorks, автори розробили комп'ютерну 3D модель запропонованої гібридної системи з сонячним колектором. Проаналізовано зміну температури теплоносія у гібридному теплому фотоелектричному геліоколекторі (ГТФГК) при сталому сонячному випромінюванні. Досліджено також зміну температури теплоносія в теплому акумуляторі системи. Результати моделювання теплових процесів виявили ключові закономірності підвищення температури протягом комп'ютерного експерименту, як у ГТФГК, так і в теплому акумуляторі. Проаналізовано зміну миттєвої питомої теплової потужності розробленого геліоколектора, оцінено його середній коефіцієнт корисної дії. Визначено тенденції зміни теплової ефективності розробленої системи теплопостачання впродовж комп'ютерного експерименту.

Ключові слова: енергопостачання; теплопостачання; відновлювальні джерела енергії; фотоелектричний геліоколектор, тепловий акумулятор.

Вступ. Ескалація цін на первинні енергоресурси, конфлікти, що виникають на цьому ґрунті, а також несприятлива екологічна ситуація у світі актуалізують потребу в широкому застосуванні альтернативних джерел енергії. У цьому контексті стає важливим постійне вдосконалення наявних технологій та розроблення інноваційних рішень для ефективного використання різноманітних нетрадиційних джерел енергії, таких як енергія сонця, вітру, біомаси, біопалива та відходів, геотермальної енергії тощо [1, 2].

Одним із перспективних екологічно чистих джерел енергії є енергія сонця. Перевагами сонячної енергії є те, що вона доступна практично в будь-якому місці, де є сонячне світло, не генерує шкідливих викидів, не вичерпається впродовж мільйонів років. Сонячні системи мають порівняно невеликий термін окупності 5...7 років та можуть використовуватися для опалення, гарячого водопостачання, кондиціонування повітря та інших потреб. Обсяги застосування сонячної енергії значно зросли впродовж останніх десятиліть. Очікується подальше подвоєння впровадження таких систем до 2030 року [1-5].

На сучасному етапі розвитку технологій існують численні пристрої для перетворення сонячної енергії на теплову або електричну. Особливої уваги заслуговують гібридні сонячні системи, які дозволяють одночасно з одного джерела отримувати теплову й електричну енергію [6-10].

Аналіз літературних джерел. На сьогодні розроблено багато систем сонячного енергопостачання, які відрізняються конструкцією та ефективністю [6-12], методами тестування та техніко-економічного аналізу [7, 13, 14]. У [15] наведено огляд методологій проектування систем зберігання теплової енергії та факторів, які слід враховувати на різних ієрархічних рівнях для концентрації сонячних електростанцій. У [16] було проведено оцінку й оптимізацію продуктивності та ефективності гібридного плоского сонячного колектора, що поєднується з фазозмінним матеріалом і радіатором. У [17, 18] проаналізовано ефективність сонячної покрівлі в системі теплопостачання з використанням гравітації. Також було запропоновано нові конструкції сонячних колекторів з верхньою частиною з профнастилу для покриття будівель з метою підвищення їх ефективності та тривалості служби [18]. Крім того, у [19] був проведений теоретичний та експериментальний аналіз геліоустановки як складової енергоефективного будинку. У роботі [20] було здійснено аналіз енергетичних характеристик системи комбінованого теплопостачання з використанням геліоколекторів, які вбудовано в захисні покриття будівель, що можливе за використання нових ефективних матеріалів [21].

Велика увага також приділяється питанню підвищення енергоефективності сонячних колекторів [7, 10, 16, 22]. У [23] проведено дослідження різних типів сонячних панелей та їхньої ефективності за допомогою композиційних

фазозмінних матеріалів. У [10] був проведений експериментальний аналіз різних типів сонячних колекторів з метою підвищення їх ефективності. Дослідження [16] пропонує нову методологію для оцінювання оптичної ефективності сонячних колекторів, яку рекомендують застосовувати при проєктуванні сучасних геліосистем.

Однак, незважаючи на переваги, застосування теплових фотоелектричних сонячних систем обмежене недоліками, зокрема нерівномірне охолодження, низька ефективність, висока вартість та складність інтегрування з наявними даховими системами, а також потреба в більшому просторі для окремих систем [8, 9]. Для зменшення недоліків і підвищення ефективності систем сонячного енергопостачання автори пропонують вдосконалити конструкцію гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора та використовувати програмні комплекси для моделювання його роботи.

Таким чином, **метою цього дослідження** є розроблення системи теплопостачання з гібридним фотоелектричним геліоколектором з удосконаленою конструкцією та аналіз основних характеристик її роботи із застосуванням комп'ютерного моделювання. Основні завдання дослідження охоплюють:

- аналіз наявних технологій оптимізації сонячних колекторів для одночасного отримання теплоти та електроенергії;
- удосконалення конструкції системи теплопостачання з гібридним геліоколектором;
- створення комп'ютерної 3D моделі запропонованої гібридної системи та аналіз її теплових характеристик.

Об'єктом дослідження є система теплопостачання з гібридним тепловим фотоелектричним колектором, а предметом дослідження є теплові процеси, що відбуваються в цій системі.

Методи досліджень. Для планування багатofакторного експерименту та обробки отриманих даних використовують методи комп'ютерного моделювання, які реалізовані за допомогою програмного комплексу для моделювання та комп'ютерних досліджень SolidWorks. Отримані результати узгоджуються із сучасними науковими знаннями. Висновки та рекомендації, сформульовані на основі комп'ютерного моделювання, підтверджуються через аналіз, узагальнення та систематизацію.

Основна частина. У роботі запропонована вдосконалена система теплопостачання на основі гібридного сонячного колектора, яка має два основні компоненти: тепловий і фотоелектричний, які розташовані послідовно (рис. 1). Фотоелектрична частина обладнана кремнієвими фотоелементами, а тепла частина має трубопроводи для передачі теплоносія, виготовлені з міді і

концентратори параболічної форми з алюмінієвим поліруванням. Тепловий акумулятор складається зі сталевого корпусу, ізоляції та виконаний по типу «без теплообмінника». Відсутність теплообмінника дозволяє тепловій системі працювати в більш сприятливому режимі, усуває його вплив на характеристики теплового акумулятора та дає змогу уникнути спотворення результатів експерименту, спричинених додатковими тепловими потоками і втратами.

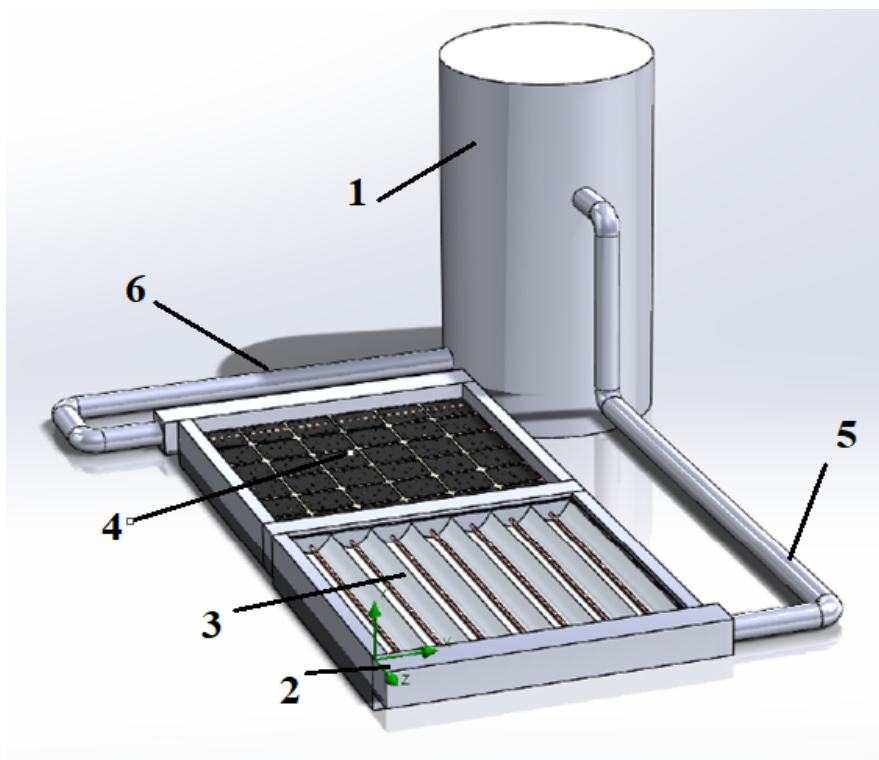


Рис. 1. Комп'ютерна модель запропонованої конструкції гібридного фотоелектричного геліоколектора із тепловим акумулятором: 1– тепловий акумулятор (ТА); 2 – розподільча гребінка; 3 – тепла частина гібридного теплофотоелектричного геліоколектора (ГТФГК);

4 – теплофотоелектрична частина ГТФГК; 5 – трубопровід руху нагрітого теплоносія від ГТФГК у ТА; 6 – трубопровід руху теплоносія від ТА до ГТФГК

З метою аналізу роботи запропонованої системи теплопостачання було розроблено комп'ютерну 3D модель гібридного теплофотоелектричного геліоколектора (ГТФГК) з теплоакумулятором (ТА) за допомогою програмного забезпечення для моделювання та візуалізації SolidWorks, яка наведена на рис. 1. Запропонована комп'ютерна 3D модель геліоколектора враховує особливості його конструкції, а саме послідовне розташування теплових і фотоелектричних елементів, відсутність прозорого покриття та теплообмінника в тепловому акумуляторі.

Комп'ютерне моделювання проводилося за таких умов:

- витрата рідини становила близько 30 г/с;
- діаметр внутрішніх труб – 25 мм;
- діаметр труб колектора – 10 мм;
- сонячне випромінювання з інтенсивністю 900 Вт/м² спрямовується під прямим кутом до поверхні колектора;
- температура навколишнього середовища та початкова температура елементів ГТФГК становить 15°C;
- потік рідини має ламінарний та турбулентний характер у співвідношенні 98% до 2%, відповідно;
- атмосферний тиск – 101325 Па;
- прискорення вільного падіння вздовж осі ординат – 9.81 м/с²;
- моделювання проводилося в режимі реального часу із загальною тривалістю комп'ютерного експерименту 5400 с (15 год);
- дані фіксувалися щосекунди.

Тривалість моделювання розраховано з умови досягнення стаціонарного стану системи, що є ключовим для аналізу її довгострокової теплової продуктивності.

З метою оцінювання теплової ефективності розробленого гібридного сонячного колектора авторами проведено аналіз результатів термодинамічної симуляції. З рис. 2 бачимо, що максимальні значення температури перевищують 48 °С. Це свідчить про інтенсивне теплосприйняття в області абсорбера із фотоелементами, що є позитивним аспектом з точки зору передачі теплоти. Проте це є негативним явищем для роботи фотопанелей – основних елементів геліоколектора – наприкінці комп'ютерного експерименту.

Крім того, зміна теплових характеристик геліоколектора за даними комп'ютерного моделювання відповідає рис. 3. Отримані результати показують, що при постійній температурі навколишнього повітря 15 °С, температурний профіль теплоносія в ГТФГК свідчить про інтенсивний теплообмін та ефективне поглинання сонячної радіації.

Зростання температури на виході з колектора від 15°C до 24°C за перші 10 хвилин моделювання відображає здатність системи до швидкого нагрівання. Такий результат є позитивним для початкового етапу роботи системи теплопостачання. Це відповідає 60 % збільшення температури теплоносія. Таким чином, маємо високу тепловіддачу абсорбційної поверхні колектора. Далі, протягом наступних 25 хвилин спостерігається стабілізація процесу теплопередачі, що свідчить про досягнення балансу між тепловиділенням фотоелектричних елементів та теплоабсорбцією теплоносія.

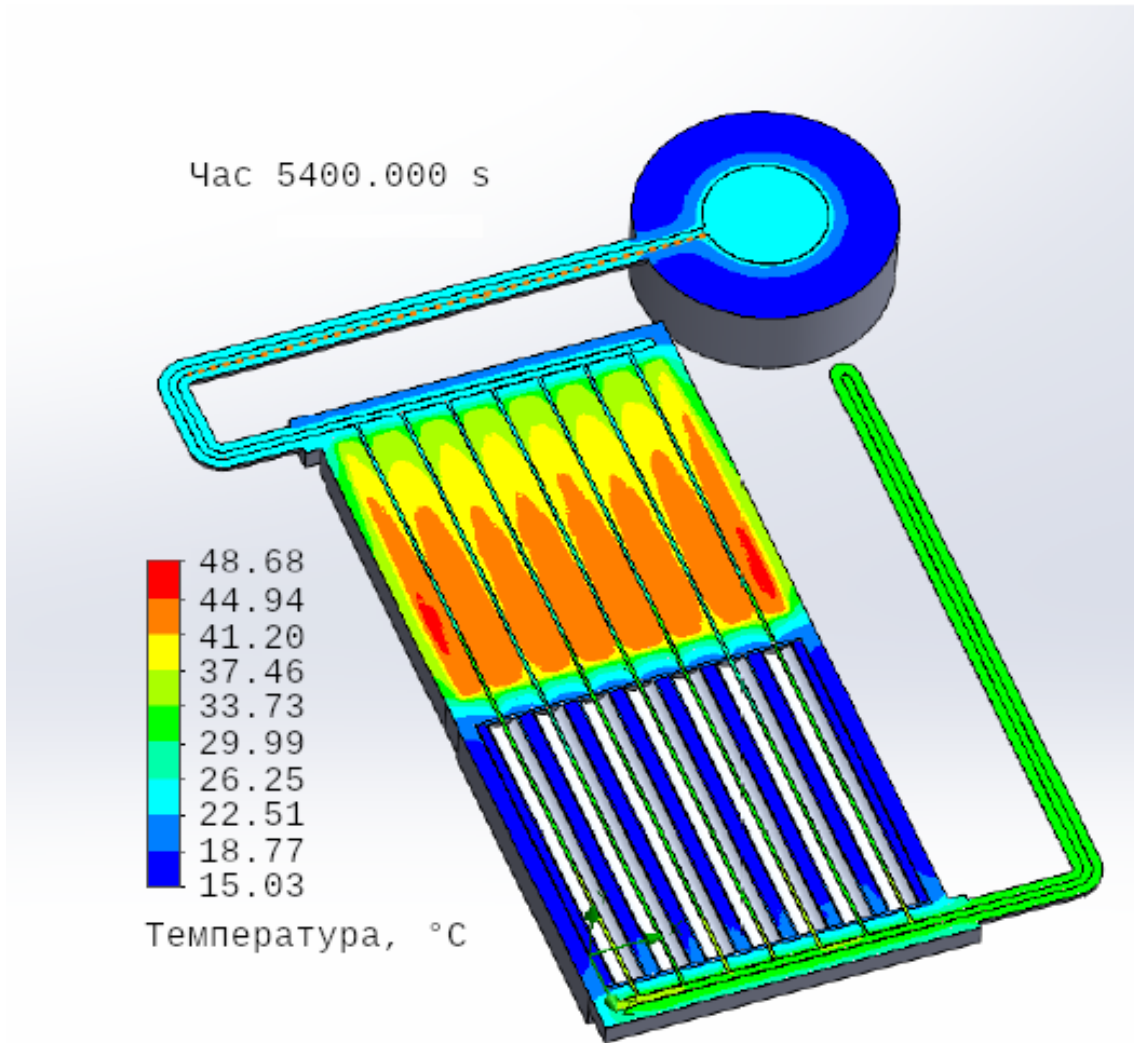


Рис. 2. Розподіл температур в досліджуваному гібридному геліоколекторі наприкінці комп'ютерного експерименту

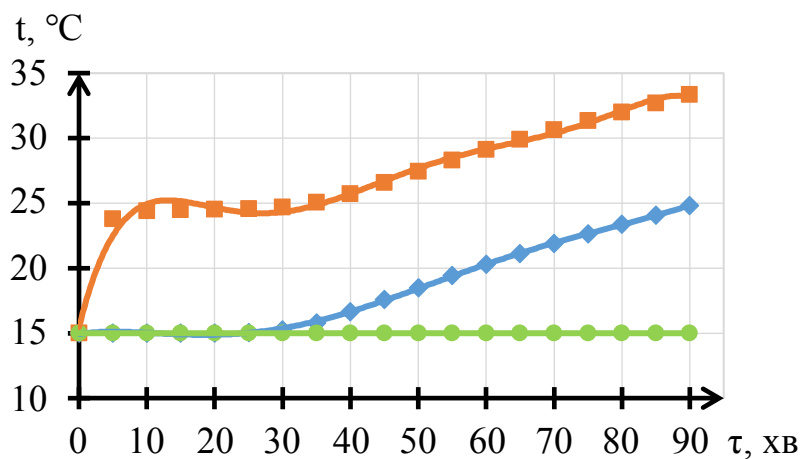


Рис. 3. Зміна температури теплоносія у трубопроводі на вході $t_{вх}, ^\circ\text{C}$ (◆) та на виході $t_{вих}, ^\circ\text{C}$ (■) з ГТФГК та температури навколишнього середовища $t_{н.с.}, ^\circ\text{C}$ (●)

Подальше зростання температури на виході до 33 °С, що становить 120 % від початкової температури, вказує на стабільну роботу системи та ефективний теплообмін протягом усього періоду сонячного опромінення.

З іншого боку, зростання температури теплоносія на вході в колектор, яке починається після 25 хвилин та досягає значення 24,8°С в кінці експерименту, свідчить про незначне затримання тепловіддачі в системі. Таке поступове зростання на 65,3 % може бути пов'язане із тепловою інерцією колектора або з акумуляцією теплоти в теплоносії, що циркулює по системі.

Відповідно до рис. 4, при протіканні теплоносія згори донизу теплообмінного апарата його температури у середньому шарі t_{TA_2} та у верхньому шарі t_{TA_3} відрізняються незначно. Досягається постійна різниця 1 °С після 40 хв експерименту. Це означає, що теплові процеси в системі теплопостачання із ГТФГК стабілізуються. Наприкінці комп'ютерного експерименту температури, відповідно, становлять 28,7 °С і 29,7 °С. Температура в нижньому шарі теплоносія в ТА t_{TA_1} за рахунок інерції прогрівання починає зростати через 25 хв проведення замірів і досягає кінцевого значення 25,3 °С. Середня температура теплоносія в ТА t_{TA_c} починає зростати після п'ятої хвилини і наприкінці моделювання становить 27,9 °С.

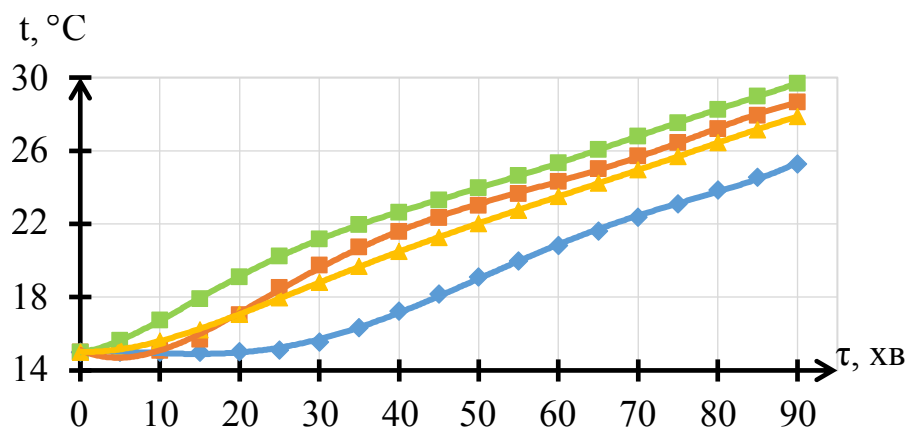


Рис. 4. Зміна температури теплоносія по висоті теплового акумулятора t_{TA} , °С: \blacklozenge – у нижньому шарі t_{TA_1} ; \blacksquare – у середньому шарі t_{TA_2} ; \blacksquare – у верхньому шарі t_{TA_3} ; \blacktriangle – середня t_{TA_c}

Наступним етапом було оцінювання ефективності роботи розробленої системи теплопостачання із ГТФГК, а саме розрахунок миттєвих значень питомої теплової потужності (рис. 5) та теплової ефективності (рис. 6) ГТФГК. З рис. 5 помітно, що через 10 хв від початку комп'ютерного експерименту миттєва питома теплова потужність ГТФГК $Q_{ГТФГК}$ стабілізується на рівні 590 Вт/м², далі поступово зменшується і наприкінці дослідів становить 537 Вт/м².

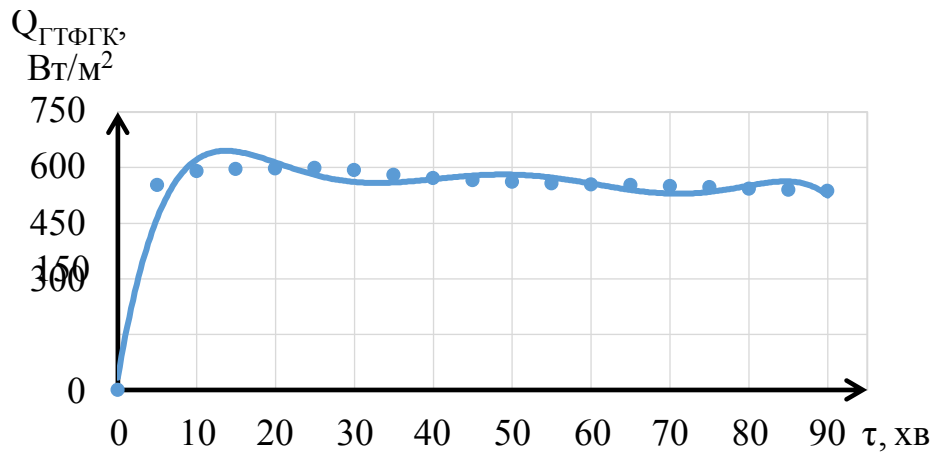


Рис. 5. Миттєва питома тепла потужність ГТФГК

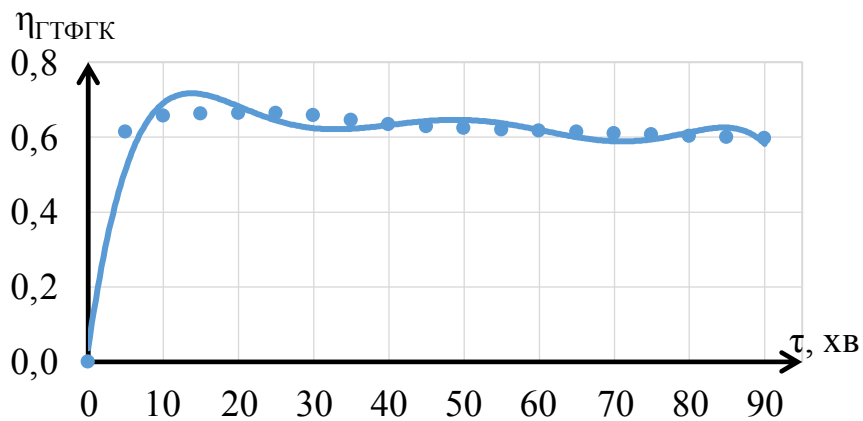


Рис. 6. Теплова ефективність ГТФГК

Теплова ефективність ГТФГК досягає свого максимального значення близько 0,66 % приблизно через 10-30 хв після початку експерименту. Після цього часу ефективність поступово знижується і до кінця експерименту досягає значення біля 0,6.

Такий змінний характер теплової ефективності може бути пов'язаний з різними факторами, що впливають на роботу системи. Це – теплові втрати через елементи системи, зміна температури джерела теплоти тощо. Аналіз впливових факторів може допомогти вдосконалити проектування та роботу таких систем теплопостачання для досягнення кращої теплової ефективності протягом тривалого періоду часу.

Висновки. Поступове зростання температури теплоносія в трубопроводі на вході та на виході геліоколектора під дією сонячної енергії, отримане в результаті комп'ютерного моделювання, свідчить про його ефективність в акумулюванні та передаванні теплоти. Зростання температур у верхньому та середньому шарах теплового акумулятора також показує здатність системи зберігати отриману енергію для подальшого використання. Отримані результати свідчать про потенціал використання гібридних сонячних систем у виробництві

теплової та електричної енергії та підтриманні сталого розвитку.

Новизна дослідження полягає в тому, що вдосконалено конструкцію гібридного теплофотоелектричного геліоеолектора, розроблено його 3D комп'ютерну модель та отримано основні теплові характеристики розробленої системи теплопостачання при сталому сонячному випромінюванні, що сприятиме в перспективі розробленню методики розрахунку таких систем теплопостачання з гібридними геліоколекторами.

Практичне значення виявляється у можливості впровадження досліджуваних систем на різноманітних побутових та промислових об'єктах з метою їх забезпечення електричною та тепловою енергією.

References

1. Paris Agreement. United Nations. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement_publication.pdf. Accessed 06 March 2024.
2. Stec M., Grzebyk M. "Statistical Analysis of the Level of Development of Renewable Energy Sources in the Countries of the European Union." *Energies*, vol. 15, 2022, pp.1-18. <https://doi.org/10.3390/en15218278>
3. Cantarero M.M.V. "Of renewable energy, energy democracy, and sustainable development: a roadmap to accelerate the energy transition in developing countries." *Energy Res. Social Sci.* vol. 70, 2020, pp.1-15. DOI:10.1016/j.erss.2020.101716
4. Shapoval, S., Mysak, S., Shapoval, P., Matiko, H. "Analysis of Current Use of Renewable and Alternative Energy Sources by European Countries." *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 438, 2024, pp. 381–391. DOI: 10.1007/978-3-031-44955-0_38
5. Pluta Z. *Sloneczne instalacje energetyczne*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2007. (In Polish)
6. Gautam A., Saini R. "A review on sensible heat based packed bed solar thermal energy storage system for low temperature applications." *Solar Energy*, vol. 207, 2020, pp. 937–956. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.027>
7. Algarni S. "Evaluation and optimization of the performance and efficiency of a hybrid flat plate solar collector integrated with phase change material and heat sink." *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 45, 2023, pp. 1-10 <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102892>
8. Hamdan M. A., Abdelhafez E., Ahmad R., Aboushi A. R. "Solar Thermal Hybrid Heating System." *Conference: Energy Sustainability and Water Resource Management for Food Security in the Arab Middle East*, December 2014, Beirut, Lebanon, 2014, pp.1-11.
9. Abdelhafez E. A., Hamdan M. A., and Al Aboushi A. R. "Simulation of Solar Thermal Hybrid Heating System Using Neural Artificial Network." *Conference: 8th*

International Ege Energy Symposium and Exhibition (IEESE-8), May 2016, Afyonkarahisar, Turkey, 2016, pp. 1-6.

10. Kareem M.W., Habib K., Pasha A.A., Irshad K., Afolabi L.O., Saha B.B. “Experimental study of multi-pass solar air thermal collector system assisted with sensible energy-storing matrix.” *Energy*, vol. 245, 2022, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123153>.

11. Duffie J.A. and Beckman W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2nd Edition, Madison, New York; John Wiley & Sons, Hoboken, 2013. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>

12. Beckman W.A., Klein S.A., Duffie J.A. *A design procedure for solar heating systems*. New York: John Wiley & Sons, 1982.

13. Obstawski P., Bakon T., Czekalski D. “Comparison of solar collector testing methods – theory and practice.” *Processes*, vol. 8, 2020, pp. 1-29. <https://doi.org/10.3390/pr8111340>.

14. Hassan A., Nikbakht A. M., Fawzia S., Yarlagada P.K.D.V., Karim A. “Transient analysis and techno-economic assessment of thermal energy storage integrated with solar air heater for energy management in drying.” *Solar Energy*, vol. 264, 2023, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112043>

15. Kuravi S., Trahan J., Goswami D.Y., Rahman M.M., Stefanakos E.K. “Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants.” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 39(4), 2013, pp. 285-319. DOI:10.1016/j.pecs.2013.02.001

16. Francesconi M., Antonelli M., Desideri U. “Assessment of the optical efficiency in solar collectors: Experimental method for a concentrating solar power.” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 40, 2023, pp. 1-20, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101740>

17. Shapoval, S., Spodyniuk, N., Zhelykh, V., Shepichak, V., Shapoval, P. “Application of rooftop solar panels with coolant natural circulation.” *Pollack Periodica*, vol. 16(1), 2021, pp. 132-137. <https://doi.org/10.1556/606.2020.00218>

18. Pona O.M., Voznyak O.T. “Efficiency of helio roofing in the gravity system of heat supply.” *Construction, materials science, mechanical engineering*, vol. 76, 2014, pp. 231-235. (In Ukrainian)

19. Shapoval S., Zhelykh V., Venhryn I., Kozak K., Krygul R. “Theoretical and experimental analysis of solar enclosure as part of energy-efficient house.” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2(8-98), 2019, pp. 38–45. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160882>

20. Marushchak U., Sydor N., Braichenko S. and Hohol M. “Effect of Dry–Wet Cycles on Properties of High Strength Fiber-Reinforced Concrete.” *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 438, 2024, pp. 265-272. <https://doi.org/10.1007/978-3-031->

44955-0_27

21. Guminilovych R., Shapoval P., Yatchyshyn I., Shapoval S. “Modeling of chemical surface deposition (CSD) of CdS and CdSe semiconductor thin films.” Chemistry and Chemical Technology, vol. 9(3), 2015, pp. 287-292. <https://doi.org/10.23939/chcht09.03.287>

22. Aitola K., Sonai G. G., Markkanen M., Kaschuk J. J., Hou X., Miettunen K., Lund P. D. “Encapsulation of commercial and emerging solar cells with focus on perovskite solar cells.” Solar Energy, vol. 237, 2022, pp. 264-283. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.060>

23. Govindasamy D., Kumar A. “Experimental analysis of solar panel efficiency improvement with composite phase change materials.” Renewable Energy, vol. 212, 2023, pp. 175-184. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.05.028>

UDC 697.329

Seniour Lecturer **Stepan Mysak**,
stepan.y.mysak@lpnu.ua, ORCID: 0000-0003-2064-7015,
Professor **Stepan Shapoval**,
stepan.p.shapoval@lpnu.ua, ORCID: 0000-0003-4985-0930,
Associate Professor **Halyna Matiko**,
halyna.f.matiko@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-5482-2307
Lviv Polytechnic National University

ENERGY-EFFICIENT SOLAR HEAT SUPPLY SYSTEM BASED ON HYBRID PHOTOVOLTAIC COLLECTOR

Abstract. *Following the commitments made under the Paris Climate Agreement, the scientific community has initiated a strategic increase in the share of renewable energy sources while gradually reducing dependence on traditional carbon fuels. Priority is given to the acceleration of the development of the photovoltaic industry, which has shown a constant increase in capacity over the past decades. According to the energy and climate strategies of the European Union, a significant increase in the amount of energy generation due to solar sources is planned. Therefore, the article is devoted to the development of a solar heat supply system based on a hybrid thermal photovoltaic solar collector with an improved design and analysis of the main characteristics of its operation using computer modeling. The authors have developed a 3D computer model of the proposed hybrid system with a solar collector by using SolidWorks software. The change in the temperature of the heat carrier in the hybrid thermal photovoltaic solar collector under constant solar radiation was analyzed. The temperature change of the coolant in the thermal accumulator of the system was also investigated. The results of the simulation of thermal processes*

revealed the key regularities of the temperature increase during the computer experiment, both in the hybrid thermal photovoltaic solar collector and in the thermal accumulator. The change in the instantaneous specific heat capacity of the developed solar collector was analyzed, and its average efficiency was estimated. The trends of changes in the thermal efficiency of the developed heat supply system during the computer experiment were determined. The novelty of the study is that the design of the hybrid thermophotovoltaic solar collector has been improved, its 3D computer model has been developed, and the main thermal characteristics of the developed heat supply system with constant solar radiation have been obtained, which will contribute to the development of calculation methods for such heat supply systems with hybrid solar collectors in the future.

Keywords: energy supply; heat supply; renewable energy sources; photovoltaic solar collector; heat accumulator.