

УДК 004.942:697

професор Степан Шаповал,
stepan.p.shapoval@lpnu.ua, ORCID: 0000-0003-4985-0930
аспірант, Юрій Пришляк,
yurii.v.pryshliak@lpnu.ua, ORCID: 0009-0001-0511-2568
доцентка Олена Савченко,
olena.o.savchenko@lpnu.ua, ORCID: 0000-0003-3767-380X,

Національний Університет «Львівська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГІБРИДНОГО СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРА ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Анотація. У сучасних умовах погіршення екологічної ситуації та виснаження природних ресурсів постає необхідність у розвитку та впровадженні технологій з використання відновлюваних джерел енергії. Викопні джерела забруднюють довкілля та сприяють зміні клімату, що робить питання екологічно чистих технологій дедалі актуальнішим. Одним із перспективних рішень є використання сонячних колекторів, які дозволяють перетворювати сонячне випромінювання в електричну та теплову енергію. Гібридні сонячні колектори, що поєднують обидві функції, можуть суттєво підвищити ефективність використання сонячної енергії. Комп'ютерне моделювання є важливим інструментом аналізу теплових характеристик таких систем. За його допомогою можна дослідити процеси теплопередачі, виявити оптимальні конструктивні параметри та умови роботи колектора, що дозволить підвищити його ефективність. Моделювання також дає можливість передбачити поведінку системи в різних кліматичних умовах та за різних навантажень, що є важливим етапом проектування та оптимізації таких пристроїв. Авторами розроблено модель гібридного теплового сонячного колектора, що є одночасно прозорим захищенням будівлі та геліоколектором. За допомогою програмного комплексу Solid Works здійснено моделювання теплових процесів отримання сонячної енергії розробленої конструкції геліоколектора та проаналізовано зміну температурних показників в геліоколекторі та баку-акумуляторі при постійній сонячній інтенсивності. Визначено основні принципи зростання температури в системі впродовж експерименту. На основі результатів проведеного моделювання одержано зміну миттєвої питомої теплової потужності запропонованої конструкції гібридного геліоколектора, а також здійснено аналіз його коефіцієнта корисної дії. Результати дослідження показали, що можна досягти значного підвищення продуктивності гібридних колекторів. Проаналізовано вплив

параметрів на теплову ефективність, а також необхідність визначення найкращих конструктивних рішень для їх подальшого впровадження. Це відкриває можливості для подальшого розвитку більш ефективних гібридних сонячних колекторів, що сприятимуть розширенню використання відновлюваної енергії у світовій енергетичній системі.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, гібридні сонячні колектори, моделювання, теплові процеси, бак-акумулятор

Вступ. Ефективне використання відновлюваних джерел енергії є одним із пріоритетних напрямів розвитку сучасної енергетики. Сонячна енергія, як невичерпне джерело, відіграє ключову роль у зменшенні залежності від традиційних енергетичних ресурсів та мінімізації їх впливу на навколишнє середовище.

Гібридні сонячні колектори, що поєднують у собі можливості виробництва теплової та електричної енергії, є перспективним рішенням для підвищення ефективності використання сонячної енергії. Однак, для дослідження їх роботи необхідне детальне вивчення основних теплових характеристик, що дозволить вдосконалити конструкцію та підвищити їх продуктивність. Комп'ютерне моделювання є ефективним інструментом для аналізу та дослідження таких характеристик, оскільки дозволяє отримати достовірні дані без необхідності проведення дорогих експериментів.

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження гібридних теплових-фотоелектричних сонячних колекторів зумовлена глобальними екологічними та енергетичними викликами, а також зростаючою необхідністю у підвищенні ефективності використання відновлюваних джерел енергії. Оскільки гібридні сонячні колектори дозволяють одночасно генерувати теплову та електричну енергію з однієї установки, то це робить їх більш ефективними в порівнянні з окремими тепловими або фотоелектричними системами. Така інтеграція підвищує коефіцієнт корисної дії та забезпечує кращу окупність інвестицій, що є особливо важливим. Розробка і вдосконалення гібридних сонячних колекторів має значний потенціал у вирішенні завдань енергоефективності та сталого розвитку, що підкреслює важливість дослідження і впровадження цих технологій у сучасних енергетичних системах.

Останні дослідження та публікації. Огляд останніх досліджень та публікацій охоплює багато аспектів застосування гібридних геліоколекторів в контексті вивчення їх теплових характеристик та демонструє широкий підхід до аналізу ефективності, інноваційних конструкцій та методів підвищення тепловіддачі. Особливий акцент зроблено на математичному моделюванні, яке дозволяє точно аналізувати функціонування систем сонячного теплопостачання

та їх енергоефективність.

У роботі [1] показано дослідження низькопотенційної енергетики, як важливого напрямку для використання альтернативних джерел енергії, особливо для об'єктів із низькою тепловою потребою. Ці дослідження використовують для проектування сучасних гібридних геліосистем, де пріоритетом є мінімізація впливу на екологію завдяки використанню чистої енергії сонця. У дослідженнях [2] наведені методи підвищення ефективності теплоутилізаційних установок, які знайшли практичне застосування у встановленні сонячних систем енергозабезпечення, інтегрованих у конструкції споруд. Детальний аналіз геліосистем, які комбіновані з елементами будівель наведено в роботі [3], де дослідники показують основні методи пасивного використання сонячної енергії через архітектурні форми, які ведуть до підвищення енергоефективності таких будівель.

У роботі [4] показано розрахунок системи теплопостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем, використання якого дозволяє збільшити ефективність та запобігти тепловим втратам у такій системі. У дослідженнях [5] визначено частку теплового навантаження, яку можливо замінити енергією сонця та вітру, які є важливими складовими гібридних систем в умовах зміни клімату. Подібні системи можуть ефективно працювати у пасивних режимах, що робить їх перспективними для будівель зі світлопрозорими фасадами [6, 7].

Також є дослідження окремих елементів сонячних систем, які наведені в літературі [8], де наведено огляд нанофлюїдів на водяній основі, використання яких суттєво покращує тепловіддачу в низькотемпературних сонячних колекторах. Також застосування подібних матеріалів у гібридних системах відкриває нові можливості для підвищення ефективності теплообміну.

У роботі [9] розглянуто можливість підвищення ефективності екологічної системи теплопостачання, використовуючи сонячні покриття на будівлях. Дослідники наголосили на значному внеску екологічних технологій у зменшення впливу на довкілля та поліпшення енергоефективності. Автори детально аналізують застосування сонячних покриттів, що одночасно служать геліоколекторами та покрівельними матеріалами, тим самим оптимізуючи простір та скорочуючи енергоспоживання будівель завдяки локальному виробництву тепла.

Дослідження, наведені в літературі [10], показують методи запобігання перегріву та покращенні продуктивності фотоелектричних систем за рахунок зміни їх конструкції. Автори застосували інноваційні рішення, які запобігають надмірному нагріванню модулів і забезпечують стабільність роботи навіть при інтенсивному сонячному випромінюванні.

У роботі [11] наведено результати моделювання гібридної геліосистеми, в якій основним елементом є масив мікротеплових трубок (МНРА-PV/T). Автори продемонстрували, що поєднання фотоелектричних елементів з мікротепловими трубками, дозволяє досягти кращої ефективності роботи системи, зменшуючи втрати тепла і збільшуючи стабільність генерації електроенергії.

Автори в [12] запропонували свою математичну модель для оцінки корисної енергії, що виробляється середньорозмірними геліоколекторами. Дані дослідження можуть застосовуватись для побудови прогнозів продуктивності гібридних сонячних систем. Розроблена в [13] двовісна модель теплового балансу для геліоколектора дозволяє точніше оцінити динаміку теплообміну в умовах змінної інтенсивності сонячного випромінювання. Також дана модель враховує вплив кута випромінювання, що дозволяє легко адаптувати систему тепlopостачання до умов оточуючого середовища. Автори детально проаналізували особливості функціонування геліоколектора, приділяючи увагу дослідженню теплових втрат, та довели, що двовісна модель покращує точність прогнозування енергетичної ефективності сонячних систем. Ці дослідження підкреслюють важливість експериментів для вдосконалення конструкції сонячних колекторів для збільшення їх ефективності, особливо для регіонів з високою мінливістю кліматичних умов.

У роботі [14] дослідники представили методи математичного та комп'ютерного моделювання систем тепlopостачання на основі сонячних плівкових колекторів, які працюють в парі з тепловими насосами. У своїй праці автори звертають увагу на ефективність таких систем, демонструючи їхню адаптивність і стабільність в умовах постійної зміни кліматичних параметрів. Результати досліджень показують, що з використанням плівкових колекторів можна досягти суттєвої економії енергії, особливо на об'єктах, що потребують постійного тепlopостачання. Автори детально описують модель, яка враховує змінну інтенсивність сонячного випромінювання та відповідні характеристики теплового насоса. Така модель дозволяє оптимізувати процес генерації та накопичення теплової енергії.

Дослідження [15] зосереджено на моделюванні теплової ефективності гібридних геліоколекторів у системі з тепловим акумулятором. Автори аналізують можливість використання таких систем для стабілізації тепlopостачання в періоди низької сонячної активності, підвищуючи загальну ефективність системи. Результати дослідження демонструють важливість акумуляції тепла, що дозволяє забезпечити зростання температури та знизити витрати на опалення. Автори звертають увагу на важливість вибору правильної конструкції геліоколекторів та акумуляторів, а також на оптимальні умови

їхньої роботи для максимального збереження енергії.

Огляд літератури свідчить про активний розвиток гібридних геліосистем як ефективного способу виробництва теплової та електричної енергії одночасно. Основні напрямки досліджень зосереджені на підвищенні ефективності гібридних сонячних колекторів завдяки застосуванню нових матеріалів та оптимізації їх конструкції за допомогою математичного моделювання. Це дозволяє підвищити продуктивність і сприяти інтеграції таких геліосистем із сучасними архітектурними рішеннями для побудови енергоефективних будівель.

Метою дослідження є вивчення теплових процесів перетворення сонячної енергії запропонованою конструкцією гібридного сонячного колектора за допомогою програмного забезпечення SolidWorks.

Виклад основного матеріалу. Для вирішення поставленого завдання, в галузі енергоефективного будівництва, запропоновано конструкцію гібридного геліоколектора, який являє собою комбінацію елементів сонячного колектора та вікна (рис. 1).



Рис. 1. Модель експериментальної установки

1 – корпус гібридного сонячного колектора, 2 – оребрений теплообмінник,
3 – бак-аккумулятор, 4 – місце встановлення вузла циркуляції, 5 – трубопроводи,
6 – прозоре захищення теплообмінника

На рис.2 а спостерігається збільшення температури до 23,4 °С в бокових та верхній частині рами. Крім того видно, що відсутні конвективні потоки навколо конструкції вікна, що зумовлене наявністю прозорого захищення Також видно накопичення тепла у верхній частині корпусу і збільшення температури до 22,8 °С (рис.2 б).

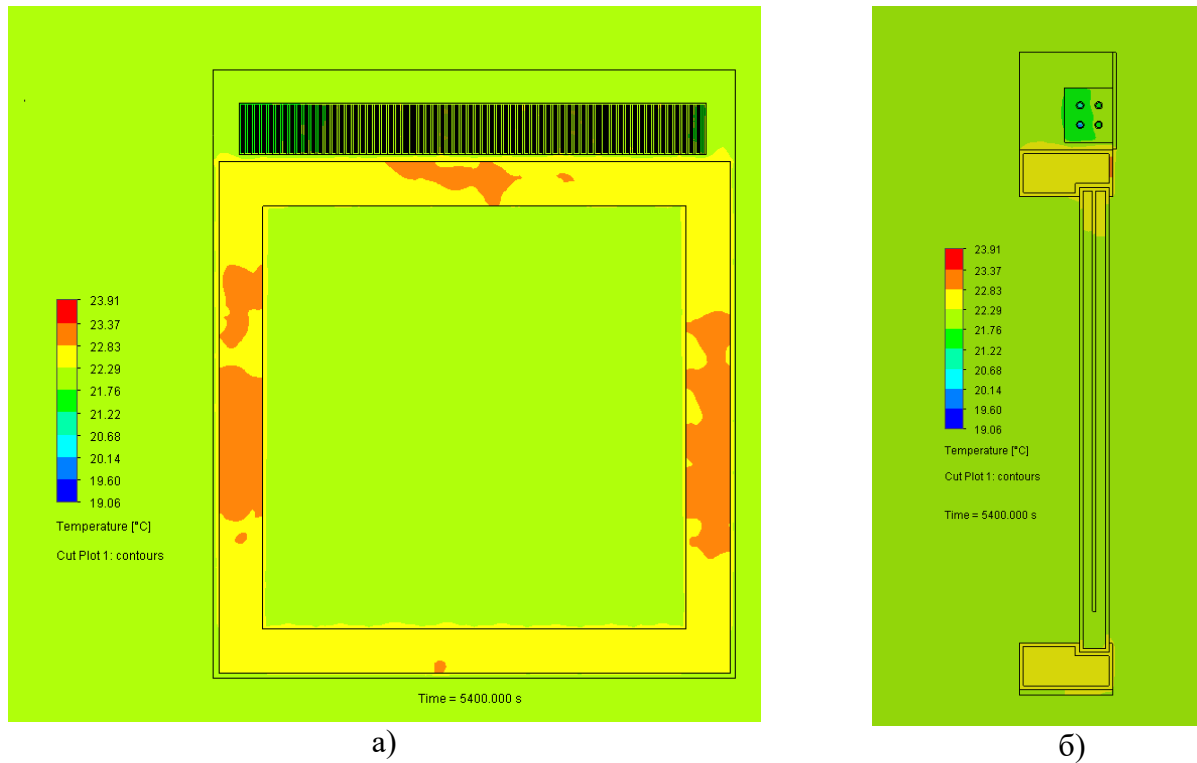


Рис. 2. Розподіл температур

На рис. 3 спостерігається, що упродовж дослід з 10-ї до 90-ї хвилини моделювання теплових процесів у ГГК верхня частина бака-акумулятора прогрілась від 19 до 22°C та поява більш характерної стратифікації теплоносія.

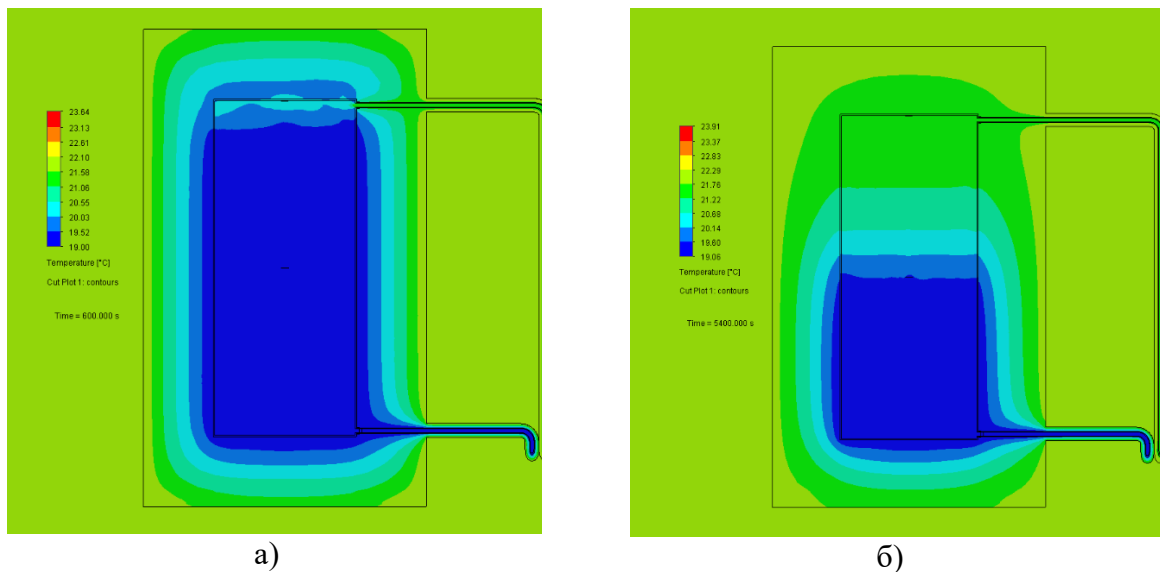


Рис. 3. Зміна температури в теплоаккумуляторі на початку а) та в кінці експерименту б).

На рис. 4 можна побачити, що температура на виході з геліоколектора зростала з 19°C до $21,6^{\circ}\text{C}$ з 5-ї до 40-ї хвилини, а далі зміни температури були не значними.

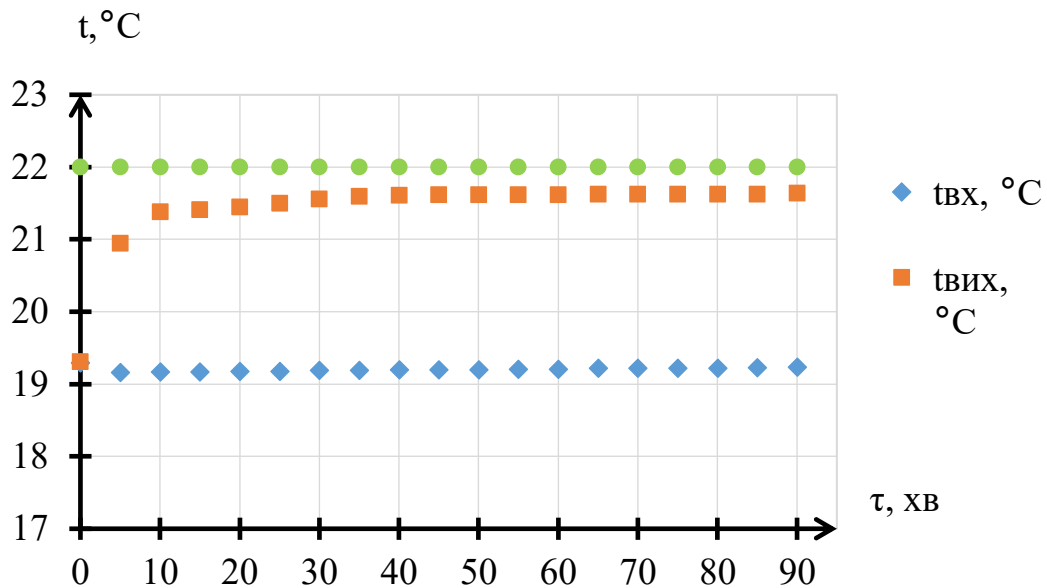


Рис. 4. Зміна температур на вході ($t_{\text{вх}}$), на виході ($t_{\text{вих}}$) та оточуючого середовища ($t_{\text{о.с.}}$) впродовж експерименту

Під час моделювання миттєва теплова потужність (рис. 5) сонячного колектора $Q_{\text{ск}}$ зростала протягом першої половини експерименту, а далі стабілізувалася.

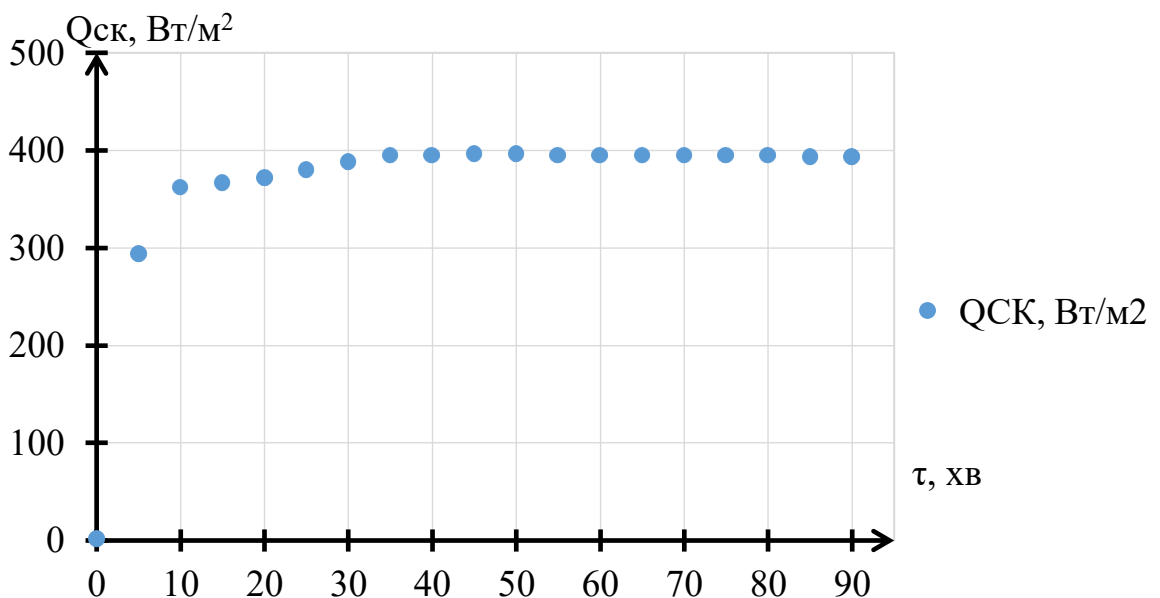


Рис.5. Зміна миттєвої теплової потужності $Q_{\text{ск}}$ впродовж експерименту

На рисунку 6 можна спостерігати, що ККД гібридного геліовікна зростає від 42% на 5-ій хвилині до 0,66 % на 50-ій хвилині, а далі змінювався незначно. Загалом середній ККД досліджуваного геліоколектора становив 0,60.

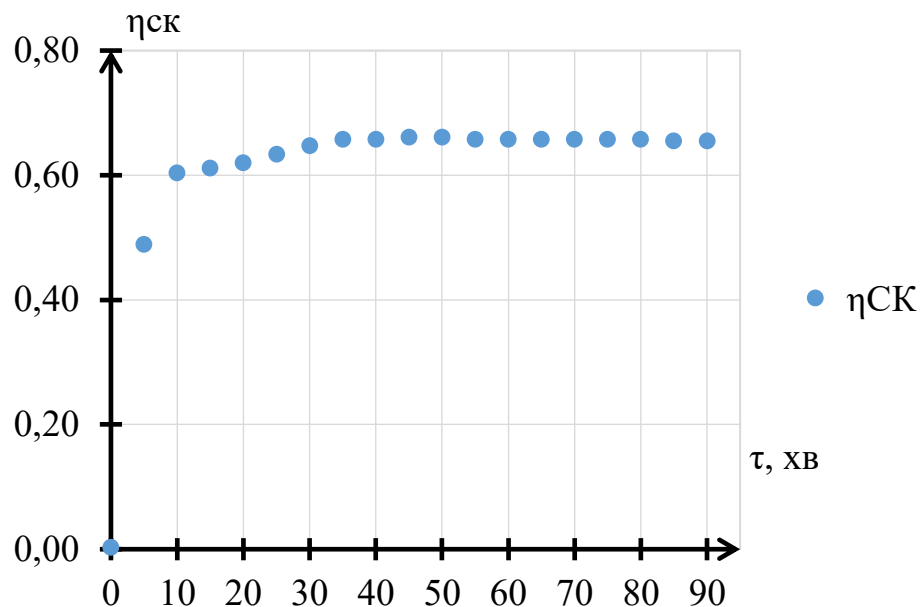


Рис.6. Зміна коефіцієнта корисної дії (ККД)

Висновки. Результати проведеного дослідження гібридного сонячного колектора за допомогою комп'ютерного моделювання показали його достатню теплову ефективність. Застосування програмного забезпечення SolidWorks дозволило змодельовати теплові процеси у системі з гібридним геліоколектором та акумулятором тепла, що дало змогу передбачити її функціонування в умовах дії сонячного випромінювання. Модель продемонструвала, що правильний вибір конструктивних параметрів може значно зменшити теплові втрати і підвищити ефективність теплопередачі.

Аналіз температурних коливань у теплоакумуляторі довів, що використання ребристого теплообмінника забезпечує більш рівномірне нагрівання теплоносія в системі. Також моделювання показало, що середня температура теплоносія на виході з гібридного сонячного колектора становила близько 21,5 °С, а максимальна – 21,64 °С. У теплоакумуляторі ж середня температура була 19,41°С, а у верхній частині – 20,05°С. Щодо миттєвої потужності, то вона становила 389 Вт/м². Середній ККД становив 0,60, а максимальний впродовж експерименту – 0,66.

Дослідження підтвердило, що розробка та впровадження математичних і комп'ютерних моделей є важливим етапом у проектуванні сонячних колекторів, оскільки дозволяє проводити детальний аналіз і визначати оптимальні

параметри без необхідності проведення дорогих експериментів. Це відкриває можливості для розробки нових рішень у сфері відновлюваної енергетики, зокрема для зниження споживання традиційних енергоресурсів та зменшення викидів парникових газів.

References

1. Redko, A. O., Bezrodnyi, M. N., Zahoruchenko, M. V., Redko, O. F., Ratushniak, H. S., i Khmelniuk, M. I. *Nyzkopotentsiialna enerhetyka*. Kharkiv: TOV "Drukarnia Madrid", 2016. (in Ukrainian).
2. Redko, A. O., Kompan, A. I., Pavlovskyi, S. V., Redko, O. F., i Povolochko, V. B. "Pidvyshchennia efektyvnosti teploutylizatsiinykh enerhetychnykh ustanovok." *Visnyk Natsionalnoho Universytetu "Lvivska politekhnikha". Teoriia i praktyka budivnytstva*, vol. 755, 2013, pp. 350-356. (in Ukrainian).
3. Davydenko, Ye. P. "Pasyvne vykorystannia soniachnoi enerhii v arkhitekturnykh formakh." *Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi*, no. 8, 2016, pp. 107–112. (in Ukrainian).
4. Pasichnyk, P. O. *Systema teplopostachannia z kombiinovanyim soniachno-elektrychnym povitropidihriuvachem*. Dys. kand. tekhn. nauk, Kyivskyi Natsionalnyi Universytet budivnytstva i arkhitektury, 2016. (in Ukrainian).
5. Pryimak, O. V., Pasichnyk, P. O., Bilan, R. V., i Nahornyi, S. O. "Vyznachennia chastky teplovoho navantazhennia, shcho zamishchuietsia enerhiieiu sontsia ta vitru dlia systemy teplopostachannia z kombiinovanyim soniachno-elektrychnym povitropidihriuvachem." *Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi*, no. 8, 2016, pp. 292-296. (in Ukrainian).
6. Kuzyk, M. P., i Zayats, M. F. "Pasyvna systema soniachnoho teplopostachannia." *Scientific Bulletin of UNFU*, vol. 29, no. 5, 2019, pp. 111-114. <https://doi.org/10.15421/40290522>.
7. Venhryn, I. "Doslidzhennia soniachnykh kolektoriv, intehrovanykh v konstruktsiiu sklianoho fasadu budivli/sporudy: neobkhidnist ta osoblyvosti." *Theory and Building Practice*, vol. 1, no. 1, 2019, pp. 38-46. <https://doi.org/10.23939/jtbp2019.01.038>.
8. Fazlay Rubbi, Likhan Das, Khairul Habib, Navid Aslfattahi, R. Saidur, i Md Tauhidur Rahman. "State-of-the-art review on water-based nanofluids for low temperature solar thermal collector application." *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 230, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111220>.
9. Voznyak, O., Spodynuk, N., Antypov, I., Dudkiewicz, E., Kasynets, M., Savchenko, O., i Tarasenko, S. "Efficiency Improvement of Eco-Friendly Solar Heat Supply System as a Building Coating." *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 3, 2023, Article No. 2831. <http://www.mdpi.com/journal/sustainability/> DOI:

10.3390/su15032831.

10. Jun, Y.-J., Park, K.-S., i Song, Y.-H. "A study on the structure of Solar/Photovoltaic Hybrid system for the purpose of preventing overheat and improving the system performance." *Solar Energy*, vol. 230, 2021, pp. 470-484. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.019>.

11. Hou, Longshu, Quan, Zhenhua, Zhao, Yaohua, Wang, Lincheng, i Wang, Gang. "An experimental and simulative study on a novel photovoltaic-thermal collector with micro heat pipe array (MHPA-PV/T)." *Energy and Buildings*, vol. 124, 2016, pp. 60-69. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.056>.

12. Zukowski, M., i Jezierski, W. "New Deterministic Mathematical Model for Estimating the Useful Energy Output of a Medium-Sized Solar Domestic Hot Water System." *Energies*, vol. 14, 2021, p. 2753. <https://doi.org/10.3390/en14102753>.

13. Minakova, K., i Zaitsev, R. "Dvohisna model teplovoho balansu soniachnoho kolektora." *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriia: Novi rishennia u suchasnykh tekhnolohiiakh*, no. 3(13), 2022, pp. 30-11. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2022.03.05>.

14. Chyrin, D. A., i Irodov, V. F. "Matematychni ta kompiuterni modeliuvannia systemy teplopостачання vid soniachnykh plivkovykh kolektoriv z teplovym nasosom." *Vcheni zapysky TNU im. V. I. Vernadskoho*, no. 31 (70), 2020, pp. 135-139. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.5/22>.

15. Mysak, S. Y., Shapoval, S. P., i Hyvliud, A. M. "Modeliuvannia teplovoi efektyvnosti hibrydnogo heliokolektora v systemi iz teplovym akumuliatorom." *Scientific Bulletin of UNFU*, vol. 34, no. 3, 2024, pp. 96-102. <https://doi.org/10.36930/40340312>.

UDC 004.942:697

Professor **Stepan Shapoval**,
stepan.p.shapoval@lpnu.ua, ORCID: 0000-0003-4985-0930
postgraduate, **Yurii Pryshliak**,
yurii.v.pryshliak@lpnu.ua, ORCID: 0009-0001-0511-2568
Associate Professor **Olena Savchenko**,
olena.o.savchenko@lpnu.ua, ORCID: 0000-0003-3767-380X
Lviv Polytechnic National University

STUDY OF THERMAL CHARACTERISTICS OF A HYBRID SOLAR COLLECTOR USING COMPUTER MODELING

In the current context of worsening environmental conditions and depletion of natural resources, there is an urgent need for the development and implementation of technologies that utilize renewable energy sources. Traditional sources pollute the environment and contribute to climate change, which makes the issue of eco-friendly technologies increasingly relevant. Therefore, one of the promising solutions to these challenges is the use of solar collectors, which convert solar radiation into electrical and thermal energy. Hybrid solar collectors, which combine both of these functions, can significantly improve the efficiency of solar energy utilization. Computer modeling is an essential tool for analyzing the thermal characteristics of such systems. It allows for the study of heat transfer processes, the identification of optimal design parameters, and the operating conditions of the collector, which can improve its efficiency. Modeling also provides the opportunity to predict the system's behavior in various climatic conditions and under different loads, an important step in the design and optimization of such devices. The authors developed a model of a hybrid thermal solar collector that simultaneously acts as a transparent building shield and a solar collector. Using the SolidWorks software suite, the thermal processes of solar energy collection in the developed collector design were simulated, and the temperature variations in the collector and accumulator tank were analyzed under constant solar intensity. The main principles of temperature increase in the system throughout the experiment were determined. Based on the modeling results, the change in the instantaneous specific thermal power of the proposed hybrid solar collector design was obtained, as well as an analysis of its efficiency coefficient. The research results showed that a significant increase in the performance of hybrid collectors is achievable. The impact of parameters on thermal efficiency was analyzed, along with the need to identify optimal design solutions for further implementation. This opens up opportunities for further development of more efficient hybrid solar collectors, which will contribute to the expansion of renewable energy use within the global energy system.

Keywords: renewable energy sources, hybrid solar collectors, modeling, thermal processes, storage tank