



С. Й. Мисак, С. П. Шаповал, А. М. Гивлюд

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

## МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ГІБРИДНОГО ГЕЛІОКОЛЕКТОРА В СИСТЕМІ ІЗ ТЕПЛОВИМ АКУМУЛЯТОРОМ

Розроблено підхід до моделювання теплової ефективності гібридного геліоколектора у системі з тепловим акумулятором, що дало змогу запропонувати нову гібридну систему теплопостачання. З'ясовано, що наукова спільнота пропонує істотно збільшити використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), поступово відмінюючи використання традиційних вуглецевих палив. Встановлено, що особливу увагу приділяють розвитку сонячної енергетики, обсяги якої значно зросли за останні десятиліття. Тому передбачено, що згідно з європейськими енергетичними та кліматичними стратегіями, обсяги енергії, отриманої від сонячних джерел, планують істотно збільшити. Тому розроблено модель системи із гібридним сонячним колектором, що може одночасно виробляти теплову й електричну енергію. Отримано залежності зміни температур теплоносія в гібридному тепловому фотоелектричному геліоколекторі від часу опромінення його сонячною радіацією та охарактеризовано закономірності зміни їх у часі. А також, відповідно, вивчено зміну температури теплоносія у тепловому акумуляторі, як середню, так і в трьох умовних рівних частинах, за його висотою. Встановлено основні закономірності приросту температури, як у гібридному тепловому фотоелектричному геліоколекторі НТПС (англ. *Home Theater Personal Computer*), так і в тепловому акумуляторі за час проведення дослідів. Охарактеризовано зміну миттєвої теплової потужності досліджуваного геліоколектора залежно від обраних чинників впливу. З'ясовано величину середнього коефіцієнта корисної дії та зміну його в часі під час проведення дослідів. Встановлено зміну миттєвої питомої теплової потужності досліджуваної системи із НТПС. Охарактеризовано закономірності зміни теплової ефективності цілої системи із НТПС упродовж експерименту та з'ясовано ефективність цілої системи за нагромадженням теплової енергії в тепловому акумуляторі. Досліджено отримані основні теплофізичні параметри розробленої системи з гібридним тепловим фотоелектричним геліоколектором для подальшого використання у створенні методики розрахунку цієї системи. А опрацьовані результати досліджень системи з гібридним тепловим фотоелектричним геліоколектором дадуть можливість впроваджувати ці системи в реальних умовах для забезпечення енергією різних об'єктів.

**Ключові слова:** енергопостачання; геліоколектор; альтернативні джерела енергії; теплопостачання; фотоелектричний сонячний колектор.

### Вступ / Introduction

Збільшення вартості традиційних джерел енергії, боротьба за їх поклади та війни, екологічне забруднення довкілля, спонукають до дедалі ширшого використання нетрадиційних джерел енергії. Тому наразі актуальним є вдосконалення наявних і розроблення нових систем, що здатні отримувати енергію із альтернативних джерел. Основним завданням дослідження є розроблення вдосконаленого гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора та дослідження його теплофізичних характеристик за допомогою моделювання.

У світовій науковій літературі проблему моделювання теплової ефективності гібридних геліоколекторів та їх інтеграції з тепловими акумуляторами частково досліджено. Вивчено різні особливості забезпечення ефективності та методів оптимізації геліотермічних

систем з використанням теплових акумуляторів. Однак досі не приділено достатньої уваги моделюванню теплової ефективності гібридних геліоколекторів з тепловими акумуляторами. Тому це дослідження актуальне, оскільки спрямоване на заповнення цієї прогалини в наукових розробках, а також на визначення оптимальних параметрів роботи системи теплопостачання з гібридними геліоколекторами для підвищення її теплової ефективності.

*Об'єкт дослідження* – теплопередача у гібридному тепловому фотоелектричному геліоколекторі.

*Предмет дослідження* – методи і засоби моделювання теплових процесів у системі з гібридним тепловим фотоелектричним геліоколектором.

*Мета роботи* – розробити систему моделювання теплової ефективності із гібридним тепловим фотоелек-

### Інформація про авторів:

**Мисак Степан Йосифович**, канд. техн. наук, ст. викладач, кафедра теплоенергетики, теплових та атомних електричних станцій.

Email: [stepan.y.mysak@lpnu.ua](mailto:stepan.y.mysak@lpnu.ua); <https://orcid.org/0000-0003-2064-7015>

**Шаповал Степан Петрович**, д-р техн. наук, професор, кафедра теплогазопостачання і вентиляції.

Email: [shapovalstepan@gmail.com](mailto:shapovalstepan@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-4985-0930>

**Гивлюд Анна Миколаївна**, канд. техн. наук, доцент, кафедра екологічної безпеки та природоохоронної діяльності.

Email: [anna.m.hyvliud@lpnu.ua](mailto:anna.m.hyvliud@lpnu.ua); <https://orcid.org/0000-0002-0122-882X>

**Цитування за ДСТУ:** Мисак С. Й., Шаповал С. П., Гивлюд А. М. Моделювання теплової ефективності гібридного геліоколектора в системі із тепловим акумулятором. Науковий вісник НЛТУ України. 2024, т. 34, № 3. С. 96–102.

**Citation APA:** Mysak, S. Yo., Shapoval, S. P., & Hyvliud, A. M. (2024). Research on a combined system with a hybrid solar collector. *Scientific Bulletin of UNFU*, 34(3), 96–102. <https://doi.org/10.36930/40340312>

тричним сонячним геліоколектором.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- здійснити критичний літературний аналіз шляхів удосконалення геліоколекторів для отримання теплової та електричної енергії з однієї установки;
- розробити модель запропонованого гібридного геліоколектора, що забезпечить оптимальне використання сонячної енергії та гелевого акумулятора для ефективного збирання та збереження енергії з метою забезпечення постійного електропостачання за умов піку виробництва та недостатньої сонячної активності;
- дослідити теплотехнічні характеристики запропонованої конструкції ГТФГК, які допоможуть визначити ефективність передачі тепла з колектора до гелевого акумулятора, оптимальні параметри і режими роботи, а також максимально можливу енергетичну потужність і тривалість роботи системи без перегріву чи перезарядки, забезпечуючи стабільну та ефективну роботу в різних умовах.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** З'ясувавши, що екологічні проблеми стали надзвичайно актуальними, наукова спільнота в межах Паризької угоди рекомендує істотно збільшити використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) і поступово відмовитися від традиційного вугільного палива. Особливу увагу приділяють розвитку сонячної енергетики, кількість енергії від якої істотно зросла за останні десятиліття та очікується подальше збільшення в середньому вдвічі до 2030 р. [8, 23, 30]. Тому важливим наразі є вдосконалення та розроблення нових систем сонячного енергопостачання.

Серед найпоширеніших типів сонячних колекторів є плоскі пластинчасті, вакуумно-трубчасті та гібридні фотоелектрично-теплові сонячні колекторні системи. Вони відрізняються за конструкцією, ефективністю та методами тестування, які розглянуто у роботі [22]. Наприклад, плоскі сонячні колектори мають низьку швидкість теплопередачі через малий коефіцієнт конвективної теплопередачі між робочою рідиною та поверхнею абсорбера. Їхню ефективність можна підвищити внаслідок збільшення площі теплообміну, використання матеріалу з високою теплопровідністю, збільшення часу подорожі повітря, індукції турбулентності та зміни руху рідини [3, 22].

Оцінювання та методи оптимізації продуктивності та ефективності гібридного плоского сонячного колектора, що поєднується з фазоперемінним матеріалом і радіатором, здійснено в роботі [10]. Дослідження показали, що такі колектори, оснащені фазоперемінним матеріалом і радіатором, виробляють гарячу воду впродовж тривалішого часу ввечері та мають нижчу вихідну температуру вранці.

У роботі [18] подано огляд методологій проектування систем зберігання теплової енергії та чинників, які потрібно враховувати на різних ієрархічних рівнях для концентрації сонячних електростанцій. Досліджено теплову та ексергетичну ефективність різних систем нагромадження теплової енергії, інтегрованих в електростанцію.

У роботі [15] автори проаналізували перехідні процеси і здійснили техніко-економічну оцінку накопичувача теплової енергії, інтегрованого із сонячним нагрівачем повітря для управління енергією під час сушіння. Робота [11] містить огляд системи нагромадження сонячної теплової енергії з наповненим шаром тепла для застосування за низьких температур.

Багато дослідників активно вивчають використання сонячної енергії для отримання теплової енергії для систем теплопостачання. У роботі [25] визначено ефективність сонячної покрівлі у гравітаційній системі теплопостачання. Також були запропоновані нові конструкції сонячних колекторів з верхньою кришкою з профнастилу для покрівлі будівлі з метою підвищення їхньої ефективності та тривалості експлуатації. Окрім цього, у роботі [28] здійснено теоретичний та експериментальний аналіз геліоустановки як частини енерго-ефективного будинку. Також проаналізовано енергетичні показники системи комбінованого теплопостачання з використанням геліоколекторів, інтегрованих у будівельні захищення, що дають змогу виготовляти ефективні нові матеріали [19].

Належну увагу також приділяють питанню підвищення енергоефективності сонячних колекторів [3, 10, 12, 17, 27]. У роботі [12] досліджено різні типи сонячних панелей і їхню ефективність за допомогою композиційних фазоперемінних матеріалів. У роботі [17] експериментально досліджені різні типи сонячного колектора з метою підвищення його ефективності. А в роботі [10] представлено нову методологію оцінювання оптичної ефективності сонячних колекторів, що важливо для сучасних досліджень.

Енергетика провідних країн активно використовує гібридні фотоелектрично-теплові сонячні системи з метою отримання як теплової, так і електричної енергії. У таких системах енергію традиційно створюють дві окремі установки: теплові сонячні колектори та фотоелектричні панелі. Фотоелектрична технологія перетворює сонячне випромінювання на електричну енергію, тоді як теплова сонячна технологія перетворює його на тепло. Гібридна система працює виключно завдяки сонячному випромінюванню. Однак, незважаючи на переваги, застосування фотоелектричних теплових сонячних систем обмежене деякими недоліками, такими, як нерівномірне охолодження, низька ефективність, висока вартість та складність інтеграції з наявними даховими системами, а також потреба у більшому просторі для окремих систем [1, 14].

Для зменшення недоліків і підвищення ефективності фотоелектротеплового колектора автори пропонують використовувати комп'ютерні системи моделювання. Досліджувана установка складається з плоского фотоелектрично-теплового колектора із сонячними елементами, розміщеними на пластині поглинача. Такий підхід дає змогу ефективно зберігати теплову та електричну енергію, що є економічно вигіднішим порівняно з двома окремими системами для кожного типу сонячної енергії [5, 9].

**Матеріали та методи дослідження.** Модель запропонованого гібридного сонячного колектора складалась із двох частин: теплової та фотоелектричної із кремнієвими фотоелементами. Трубопроводи теплоносія виконано із міді, а концентратори теплової частини – із полірованого алюмінію параболічної форми. Тепловий акумулятор виготовлений із сталі та містить мідний теплообмінник.

Застосовано математичні методи планування багатofакторного експерименту та оброблення його даних із використанням програмного комплексу для моделювання та дослідження в середовищі SolidWorks.

Отримані результати не суперечать висновкам відомих наукових положень. Висновки і рекомендації, сформульовані за результатами цих досліджень, підтверджені у спосіб аналізу, узагальнення і систематизації.

## Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Комбіновану систему енергопостачання із гібридним тепловим фотоелектричним геліоколектором без захисного скла та теплообмінником у тепловому акумуляторі зображено на рис. 1. На цьому рисунку введено такі позначення: 1, 4 – трубопроводи на вході та виході з ГТФГК / pipelines at the inlet and outlet of the HTFPC; 2, 7 – розподільчі гребінки теплоносія на вході у фотоелектричну панель та на виході з теплового геліоколектора / distribution combs of the heat transfer fluid at the inlet to the photovoltaic panel and at the outlet of the thermal solar collector; 3 – тепловий акумулятор / thermal accumulator; 5 – фотоелектрична панель / photovoltaic panel; 6 – тепловий розділювач / thermal separator

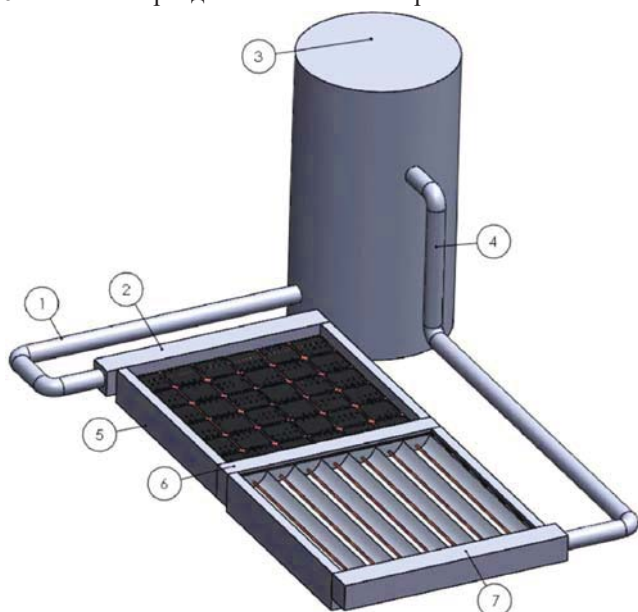


Рис. 1. Схема CESHP з HTFPC з мідним теплообмінником у тепловому акумуляторі / Scheme of a CESHP with HTFPC with a copper heat exchanger into a thermal accumulator

Модель розробленої конструкції CESHP з HTFPC складається з двох окремих блоків – теплового акумулятора 8 і HTFPC, який складається з фотоелектричної панелі та теплового геліоколектора, і призначений для виробництва теплової та електричної енергії. Падаюча сонячна радіація на тепловий геліоколектор фокусується в семи концентраторах, які являють собою розташовані поряд алюмінієві, товщиною  $h$  параболічної форми, пластини, що концентрують відбиті від їх стінок сонячні промені на розміщені вздовж їх осей на відстані  $L = 15$  см одна від одної мідні трубки 21 діаметром  $d = 10$  мм і товщиною стінки 0,5 мм, що простягаються вздовж руху теплоносія.

Нагрітий теплоносій через розподільчу гребінку 23, температура якого вимірюється датчиком 24, протікає у мідному трубопроводі 17 діаметром  $D = 25$  мм і товщиною стінки 0,5 мм у тепловому акумуляторі 8, де віддає тепло через мідний трубчастий теплообмінник 10 довжиною 9,06 м, діаметром  $D = 25$  мм і товщиною стінки 0,5 мм, омиваючи його, теплоносію теплового акумулятора. Тепловий акумулятор є закритий бак циліндрич-

ної форми діаметром 364 мм, довжиною 1004 мм і об'ємом  $V_{TA} = 100$  л, виготовлений зі сталевих листів товщиною 2 мм.

Для вимірювання середньої температури теплоносія в тепловому акумуляторі 8, весь заповнений об'єм баку умовно поділявся на три шари однакової висоти, де в центральній площині кожного шару вимірюється температура дуговим термодатчиком, виготовленим зі скла товщиною 4 мм, який вимірює середнє значення температури у чотирьох точках на корпусі.

Охолоджений теплоносій мідним трубопроводом 14 діаметром  $D = 25$  мм і товщиною стінки 0,5 мм через розподільчу гребінку 16 потрапляє в фотоелектричну панель, де нагрівається від фотоелементів 19 і потрапляє в тепловий геліоколектор.

Рух теплоносія у системі, яким є вода, відбувається за допомогою циркуляційного насоса 13, який забезпечує витрату в контурі 0,03 кг/с.

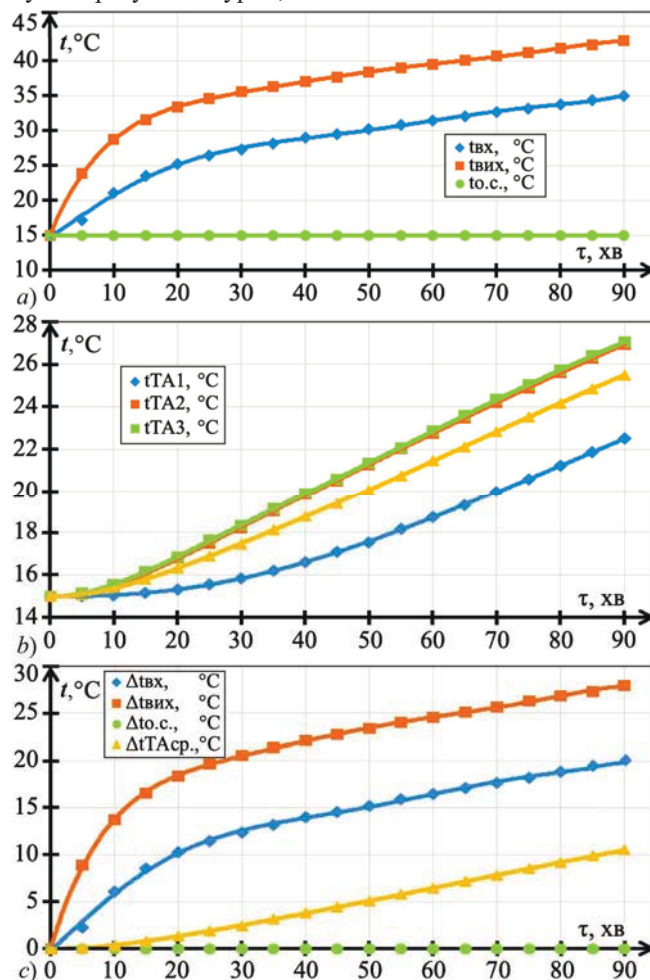


Рис. 2. Температури теплоносія / Coolant temperatures in the pipeline at: a) у трубопроводі / the inlet; b) в тепловому акумуляторі / the thermal accumulator  $t_{TA}$ , °C; c) приріст температур теплоносія у трубопроводі / heat carrier temperature increase in the pipeline at the inlet

Для виробництва електроенергії на мідній пластині фотоелектричної панелі прикріплені 36 кремнієвих фотоелементів розмірами 155×155 мм і товщиною 0,3 мм. Для збільшення ефективності фотоелементів з метою відведення від них тепла мідна пластина фотоелектричної панелі приєднана до мідних трубок контура CESHP.

Дослідження проводили в програмі SolidWorks 2022 за допомогою модуля Flow Simulation за стаціонарних умов: за температури навколишнього середовища  $t_{o.c.} =$

15 °C та інтенсивності сонячної радіації  $I_T = 900 \text{ Вт/м}^2$  із врахуванням кута нахилу НТФРС до горизонту  $\beta = 90$  °C та азимутального кута падіння сонячних променів на площину НТФРС  $\alpha = 90$ .

Згідно з експериментальними дослідженнями, зміни температури теплоносія в НТФРС, залежно від часу проведення експерименту ( $\tau$ , хв): на вході ( $t_{\text{вх}}$ , °C), на виході  $t_{\text{вих}}$ , °C, з НТФРС та навколишнього середовища  $t_{\text{о.с.}}$ , °C (рис. 2,a). Згідно з даними цього рисунку, за постійної температури навколишнього середовища  $t_{\text{о.с.}}$ , що дорівнює 15 °C, температура теплоносія в трубопроводі на виході з НТФРС  $t_{\text{вих}}$  стрімко зростає до 33 °C за перші 20 хв експерименту, а далі збільшувалась рівномірно і досягла кінцевого значення 43 °C. Температура теплоносія на вході в НТФРС  $t_{\text{вх}}$  за перші 20 хв зростала менш інтенсивно, ніж  $t_{\text{вих}}$ , збільшившись до 25 °C, а потім внаслідок рівномірного зростання досягла 35 °C на завершенні експерименту.

Далі досліджували зміни температур теплоносія в тепловому акумуляторі, залежно від часу проведення експерименту ( $\tau$ , хв) (рис. 2,b). Згідно з даними цього рисунку, середні температури у середньому шарі  $t_{\text{ТА2}}$  та у верхньому шарі  $t_{\text{ТА3}}$  об'єму теплоносія в тепловому акумуляторі майже не відрізняються протягом всього часу проведення експерименту, починають зростати через 5 хв після початку вимірювань і досягають 27 °C на завершенні дослідження. Температура у нижньому шарі об'єму теплоносія в тепловому акумуляторі  $t_{\text{ТА1}}$  зростає через 10 хв від початку проведення досліджень і досягає 22,5 °C на завершенні експерименту. Значення середньої температури об'єму теплоносія в тепловому акумуляторі  $t_{\text{ТАср.}}$  тяжіють до значень  $t_{\text{ТА2}}$  і  $t_{\text{ТА3}}$ , бо у верхній частині теплового акумулятора температури вищі та майже однакові, ніж у нижній його частині і досягають максимального значення – 25,5 °C на завершенні експерименту.

Далі визначали прирости температур теплоносія в НТФРС і теплового акумулятора, залежно від часу проведення експерименту ( $\tau$ , хв) (рис. 2,c). На цьому ри-

сунку за незмінної температури навколишнього середовища  $\Delta t_{\text{о.с.}}$  приріст температури теплоносія в трубопроводі на виході з НТФРС  $\Delta t_{\text{вих}}$  стрімко збільшується до 18 °C за перші 20 хв експерименту, а далі, рівномірно зростаючи, досягає 28 °C на завершенні проведеного дослідження. Приріст температури теплоносія на вході в НТФРС  $\Delta t_{\text{вх}}$  за 20 хв від початку вимірювань є меншим за  $\Delta t_{\text{вих}}$ , стрімко збільшується до 10 °C, а за решту часу завдяки рівномірному зростанню досягає 20 °C. У тепловому акумуляторі зростання середньої температури теплоносія в ньому відбувається рівномірно від 5 до 90 хв, тому  $\Delta t_{\text{ТАср.}}$  на завершенні експерименту збільшується на 10,5 °C.

На підставі аналізу результатів моделювання роботи CESHР з НТФРС було розраховано: миттєві значення питомої потужності НТФРС; зміну теплової ефективності НТФРС впродовж експерименту; миттєву питому потужність CESHР з НТФРС; теплову ефективність CESHР з НТФРС впродовж експерименту.

Миттєві значення питомої потужності НТФРС наведено на рис. 3,a. Згідно з його даними, через 15 хв від початку проведення експерименту миттєва питома теплова потужність НТФРС  $Q_{\text{ГТФГК}}$  стабілізується і становить 500 Вт/м<sup>2</sup>. На рис. 3,b наведено графік зміни теплової ефективності НТФРС за час проведення експерименту. Згідно з його даними, теплова ефективність НТФРС набуває постійних значень через 15 хв від початку експерименту і становить 0,55. Дослідження миттєвої питомої потужності CESHР з НТФРС подано на рис. 3,c. Аналізуючи графік зміни питомої теплової потужності CESHР з НТФРС на цьому рисунку,  $Q_{\text{КСЕП із ГТФГК (CESHP with HTFRC)}}$  стабілізується втричі повільніше, ніж  $Q_{\text{ГТФГК}}$  (див. рис. 3,a) і наприкінці експерименту становить 140 Дж/м<sup>2</sup>. Зміни теплової ефективності CESHР з НТФРС впродовж експерименту представлено на рис. 3,d. Отже, теплова ефективність CESHР з НТФРС  $\eta_{\text{КСЕП із ГТФГК (CESHP with HTFRC)}}$  набуває постійних значень через 50 хв від початку експерименту і становить 0,5.

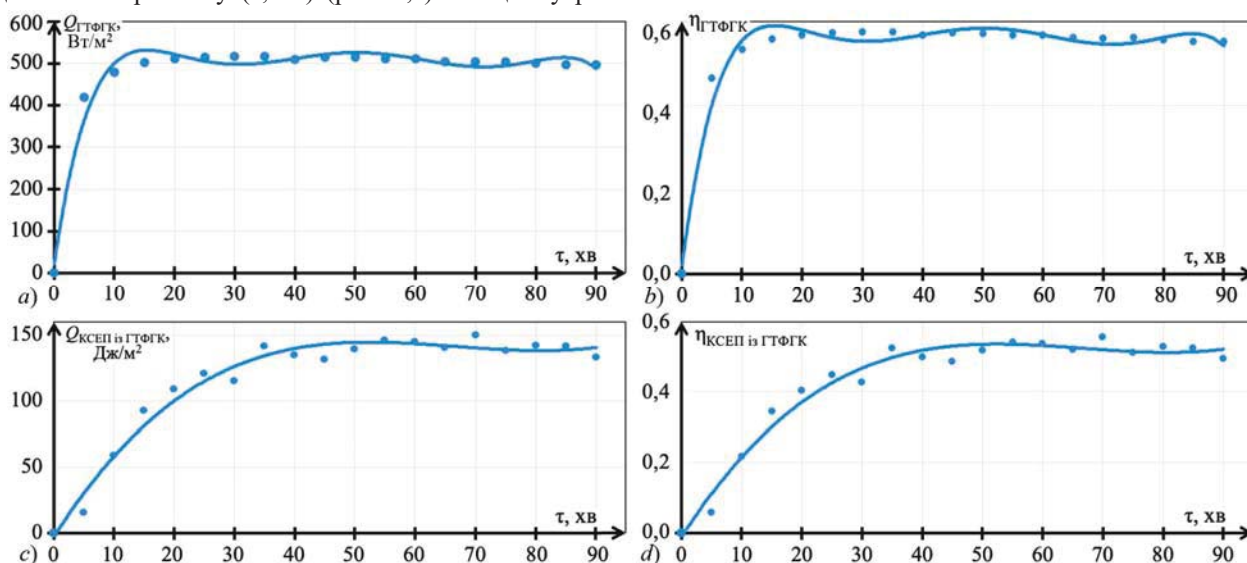


Рис. 3. Миттєва питома теплова потужність / Instantaneous specific heat capacity of: a) НТФРС; c) CESHР with НТФРС  $Q_{\text{НТФРС CESHР with НТФРС}}$ , Дж/м<sup>2</sup>; Теплова ефективність / Thermal efficiency of: b) НТФРС; d) CESHР with НТФРС  $\eta_{\text{НТФРС CESHР with НТФРС}}$

Далі визначали нагромадження теплової енергії теплового акумулятора у CESHР з НТФРС впродовж експерименту, графік якої зображено на рис. 4,a. На цьому рисунку нагромадження питомої теплової енергії в теп-

ловому акумуляторі у CESHР з НТФРС відбувається через 5 хв від початку дослідів, коли середня температура теплоносія в тепловому акумуляторі  $t_{\text{ТАср.}}$  починає зростати внаслідок зміни  $t_{\text{ТА2}}$  і  $t_{\text{ТА3}}$  (див. рис. 2,b). Після 20

хв, коли теплові процеси в системі стабілізуються, теплова енергія в тепловому акумуляторі нагромаджується рівномірно і досягає  $2200 \text{ кДж/м}^2$  впродовж експерименту. Зміни ефективності нагромадження теплової енергії теплового акумулятора у CESHP з HTFPC впродовж експерименту зображено на рис. 4, б.

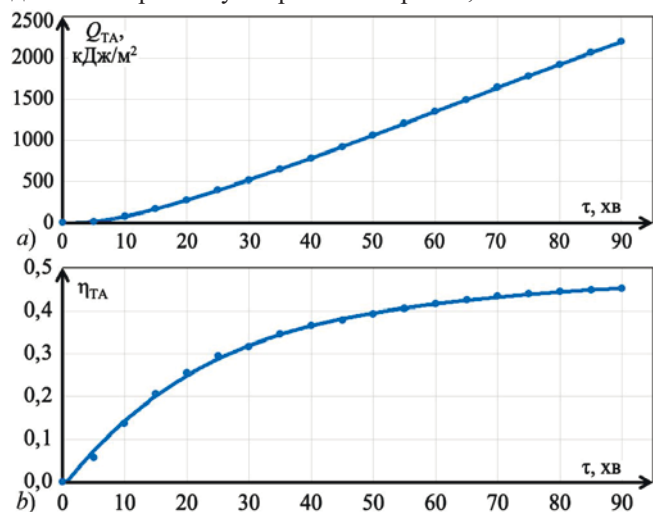


Рис. 4. а) нагромадження питомої теплової енергії тепловим акумулятором у / Accumulation of specific heat energy by a heat accumulator in CESHP with HTFPC  $Q_{TA}$ ,  $\text{kJ/m}^2$ ; б) ефективність нагромадження теплової енергії теплового акумулятора у / Thermal energy storage efficiency of the thermal accumulator in CESHP with HTFPC  $\eta_{TA}$

Отже, ефективність нагромадження теплової енергії теплового акумулятора у CESHP з HTFPC  $\eta_{TA}$  стабілізується тільки наприкінці експерименту і становить 0,45.

**Обговорення результатів дослідження.** Більшість досліджень з моделювання систем енергопостачання, як наприклад роботи [7, 33], проводять математичним методом. Автори водночас застосовують комп'ютерне моделювання з використанням спеціалізованого програмного забезпечення, зокрема в дослідженнях [29]. Проте, на відміну від роботи [6], автори також використовували програмне забезпечення для аналізу і структурування отриманих результатів. За результатами виконаного комп'ютерного моделювання визначено змiну миттєвої питомої теплової потужності системи з гібридним тепловим фотоелектричним геліоколектором, яка після 30 хв виходить на номінальне значення з показником  $140 \text{ Дж/м}^2$ . Як зазначено в роботі [16], тривалість виходу на стабільну роботу колектора становить 30-40 хв залежно від потужності сонячного випромінювання.

Посилаючись на роботи [4, 20, 26], можемо визначити закономірність зміни теплової ефективності системи теплопостачання з гібридним сонячним колектором від багатьох різних чинників, такі як розміщення трубок, кут нахилу колектора, потужність сонячного випромінювання, матеріали конструкції.

Щодо моделювання теплових процесів, то в роботі [32] описано новий гібридний колектор у поєднанні зі системою теплового насосу, що перемикається, для покращення процесу генерування електроенергії фотоелектричними панелями та ефективного використання сонячної теплової енергії, яка може задовольнити потреби в опаленні взимку та охолодженні – влітку. Спочатку було розроблено енергетичну та ексергетичну моделі системи, на підставі яких виконано чисельне моделювання в MATLAB. Потім було досліджено і порівня-

но термодинамічні характеристики системи з різними робочими рідинами. Це дуже цінні дослідження для опрацювання та аналізу отриманих результатів, оскільки автори цієї статті використовували як теплоносії тільки воду і після порівняння з дослідженнями інших науковців, можна стверджувати що в обох моделях енергетична ефективність буде збільшуватись на 5-10 %, завдяки відбиранню тепла з-під кремнієвих елементів, що вказує на актуальність цієї галузі дослідження.

Отже, за результатами виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

*Наукова новизна отриманих результатів дослідження* – розроблено новий гібридний тепловий фотоелектричний геліоколектор, на підставі якого визначено основні теплофізичні характеристики енергосистеми з акумулятором від обраних чинників, що дасть змогу побудувати метод розрахунку даних новітніх систем.

*Практична значущість результатів дослідження* – отримані результати досліджень запропонованої системи із HTFPC дадуть змогу реалізації даних систем у реальних умовах для енергозабезпечення різних об'єктів.

## Висновки / Conclusions

Розроблено систему моделювання теплової ефективності із гібридним тепловим фотоелектричним сонячним геліоколектором, що дало змогу визначити основні теплофізичні характеристики енергосистеми з акумулятором від обраних чинників. За результатами дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Виконано критичний літературний аналіз способів вдосконалення геліоколекторів для отримання теплової та електричної енергії з однієї установки; створено модель розробленого гібридного геліоколектора; здійснено дослідження теплотехнічних характеристик запропонованої конструкції HTFPC.
2. Оскільки світова наукова спільнота рекомендує інтенсифікувати використання відновлювальних джерел енергії та згідно з європейськими енергетичними та кліматичними стратегіями, виробництво енергії із сонячних джерел планується значно збільшити.
3. Здійснено критичний літературний аналіз способів удосконалення геліоколекторів для отримання теплової та електричної енергії з однієї установки.
4. Розроблено модель системи з новим гібридним сонячним колектором, яка може виробляти одночасно теплову та електричну енергію. За допомогою цієї моделі досліджено змiну температур теплоносія у гібридному тепловому фотоелектричному геліоколекторі від часу опромінювання, а також в тепловому акумуляторі.
5. Встановлено основні закономірності приросту температури як у гібридному тепловому фотоелектричному геліоколекторі, так і в тепловому акумуляторі. Досліджено змiну миттєвої теплової потужності геліоколектора залежно від впливу обраних чинників, яка становила  $540 \text{ Вт/м}^2$ .
6. З'ясовано величину середнього коефіцієнта корисної дії (0,6, або 60 %) та його змiну в часі під час експерименту. Також встановлено змiну миттєвої питомої теплової потужності системи з гібридним тепловим фотоелектричним геліоколектором.
7. Досліджено закономірність зміни теплової ефективності всієї системи із гібридним тепловим фотоелектричним геліоколектором, що становила  $450 \text{ Вт/м}^2$ , а також її ефективність за нагромадженням теплової енергії в тепловому акумуляторі, яка становила 0,5 або 50 %.
8. Отримані результати використовують для розроблення методики розрахунку цієї системи та можна застосова-

ти для впровадження системи в реальних умовах для забезпечення енергії різних об'єктів.

## References

1. Abdelhafez, E. A., Hamdan, M. A., & Al Aboushi, A. R. (2016). Simulation of Solar Thermal Hybrid Heating System Using Neural Artificial Network. *Conference: 8th International Ege Energy Symposium and Exhibition (IEESE-8)*, Afyonkarahisar, Turkey, May 2016, 1–6. URL: [https://www.researchgate.net/publication/308348965\\_Simulation\\_of\\_Solar\\_Thermal\\_Hybrid\\_Heating\\_System\\_Using\\_Neural\\_Artificial\\_Network](https://www.researchgate.net/publication/308348965_Simulation_of_Solar_Thermal_Hybrid_Heating_System_Using_Neural_Artificial_Network)
2. Aitola, K., Sonai, G. G., Markkanen, M., Kaschuk, J. J., Hou, X., Miettunen, K., & Lund, P. D. (2022). Encapsulation of commercial and emerging solar cells with focus on perovskite solar cells. *Solar Energy*, 237, 264–283. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.060>
3. Algarni, S. (2023). 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*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102892>
4. Al-Rabeeah, A. Y., Seres, I., & Farkas, I. (2024). Experimental and numerical investigation of parabolic trough solar collector thermal efficiency enhanced by graphene – Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/water hybrid nanofluid. *Results in Engineering*, 21 p. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101887>
5. Beckman, W. A., Klein, S. A., & Duffie, J. A. (1982). A design procedure for solar heating systems. New York: John Wiley & Sons.
6. Boiarchuk, V., Syrotiuk, S., Syrotiuk, V., Ptashnyk, V., Baranovych, S., & Sheremeta, R. (2022). Photoelectric panel modeling in the LabVIEW environment. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Agroengineering Research*, 26, 71–76. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2022.26.071>
7. Bondarchuk, A. S., (2019). Study into predicted efficiency of the application of hybrid solar collectors to supply energy to multi-apartment buildings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 69 p., <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174502>
8. Cantarero, M. M. V. (2020). Of renewable energy, energy democracy, and sustainable development: A roadmap to accelerate the energy transition in developing countries. *Energy Research & Social Science*, 70. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101716>
9. Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2nd Edition, Madison, New York; John Wiley & Sons, Hoboken. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>
10. Francesconi, M., Antonelli, M., & Desideri, U. (2023). Assessment of the optical efficiency in solar collectors: Experimental method for a concentrating solar power. *Thermal Science and Engineering Progress*, 40, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101740>
11. Gautam, A., & Saini, R. (2020). A review on sensible heat based packed bed solar thermal energy storage system for low temperature applications. *Solar Energy*, 207, 937–956. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.027>
12. Govindasamy, D., & Kumar, A. (2023). Experimental analysis of solar panel efficiency improvement with composite phase change materials. *Renewable Energy*, 212, 175–184. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.05.028>
13. Guminilovych, R., Shapoval, P., Yatchyshyn, I., & Shapoval, S. (2015). Modeling of chemical surface deposition (CSD) of CdS and CdSe semiconductor thin films. *Chemistry and Chemical Technology*, 9(3), 287–292. <https://doi.org/10.23939/chcht09.03.287>
14. Hamdan, M. A., Abdelhafez, E., Ahmad, R., & Aboushi, A. R. (2014). Solar Thermal Hybrid Heating System, *Conference: Energy Sustainability and Water Resource Management for Food Security in the Arab Middle East*, December 2014, Beirut, Lebanon, 1–11. <https://doi.org/10.23939/jeccs2023.02.061>
15. Hassan, A., Nikbakht, A. M., Fawzia, S., Yarlagada, P. K. D. V., & Karim, A. (2023). Transient analysis and techno-economic assessment of thermal energy storage integrated with solar air heater for energy management in drying. *Solar Energy*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112043>
16. Herrando, M., Coca-Ortegón, A., Guedea, I., & Fueyo, N. (2023). Experimental validation of a solar system based on hybrid photo-voltaic-thermal collectors and a reversible heat pump for the energy provision in non-residential buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113233>
17. Kareem, M. W., Habib, K., Pasha, A. A., Irshad, K., Afolabi, L. O., & Saha, B. B. (2022). Experimental study of multi-pass solar air thermal collector system assisted with sensible energy-storing matrix, *Energy*, 245, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123153>
18. Kuravi, S., Trahan, J., Goswami, D. Y., Rahman, M. M., & Stefanakos, E. K. (2013). Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39(4), 285–319. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2013.02.001>
19. Marushchak, U., Sydor, N., Braichenko, S., & Hohol, M. (2024). Effect of dry-wet cycles on properties of high strength fiber-reinforced concrete. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 438, 265–272. [https://doi.org/10.1007/978-z-031-44955-0\\_27](https://doi.org/10.1007/978-z-031-44955-0_27)
20. Mausam, K., Singh, S., Ghosh, S. K., Singh, R. P., & Tiwari, A. K. (2024). Experimental analysis of the thermal performance of traditional parallel tube collector (PTC) and cutting-edge spiral tube collector (STC): A comparative study for sustainable solar energy harvesting. *Thermal Science and Engineering Progress*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102295>
21. Ministry of Regional Construction of Ukraine. (2011). DSTU-N B V.1.1-27:2010 Building climatology. Kyiv: Ministry of Regional Construction of Ukraine. [Effective from 01.11.2011]. URL: [https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu\\_b\\_v\\_1\\_1\\_27\\_2010/5-1-0-929](https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_27_2010/5-1-0-929)
22. Obstawski, P., Bakon, T., & Czekalski, D. (2020). Comparison of solar collector testing methods – theory and practice. *Processes*, 8, 1–29. <https://doi.org/10.3390/pr8111340>
23. Paris Agreement. (2024). United Nations. URL: <https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>
24. Pluta, Z. (2007). *Sloneczne instalacje energetyczne*. Warsaw: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. [In Polish]. URL: <https://repo.pw.edu.pl/info/book/WUT287161/>
25. Pona, O. M., & Voznyak, O. T. (2014). Efficiency of helio roofing in the gravity system of heat supply. *Construction, materials science, mechanical engineering*, 76, 231–235. [In Ukrainian].
26. Rosales-Pérez, J. F., Villarruel-Jaramillo, A., Pérez-García, M., Cardemil, J. M., & Escobar, R. (2024). Techno-economic analysis of hybrid solar thermal systems with flat plate and parabolic trough collectors in industrial applications. *Alexandria Engineering Journal*, 86, 98–119. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.11.056>
27. Shapoval, S., Spodynuk, N., Zhelykh, V., Shepichak, V., & Shapoval, P. (2021). Application of rooftop solar panels with coolant natural circulation. *Pollack Periodica*, 16(1), 132–137. <https://doi.org/10.1556/606.2020.00218>
28. Shapoval, S., Zhelykh, V., Venhryn, I., Kozak, K., & Krygul, R. (2019). Theoretical and experimental analysis of solar enclosure as part of energy-efficient house. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(8-98), 38–45. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160882>
29. Sharma, C., & Jain, A. (2014). Solar panel mathematical modeling using Simulink. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 4(5), 67–72. URL: <https://www.slideshare.net/Chandanivinny/j045046772>
30. Stec, M., & Grzebyk, M. (2022). Statistical Analysis of the Level of Development of Renewable Energy Sources in the Countries of the European Union. *Energies*, 15, 1–18. <https://doi.org/10.3390/en15218278>
31. Wisniewski, G., Golebiowski, M., Grzeziuk, et al. (2008). Kolektor słoneczny. Energia słoneczna w mieszkalnictwie, hotelarstwie i drobnym przemyśle. Warszawa: Medium. [In Polish]. URL: <https://www.ceneco.pl/22283791>

32. Yang, H., Wang, X., & Yao, S. (2023). Thermodynamic analysis of a novel solar photovoltaic thermal collector coupled with switchable air source heat pump system. *Applied Thermal Engineering*, 218 p. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119410>
33. Zaitsev, R. V., Kirichenko, M. V., Minakova, K. O., & Styslo, B. O. (2022). Autonomous hybrid photovoltaic power plant with

intelligent power selection system. In: O. M. Dovhalyuk (Ed.). *Energy Efficiency and Energy Security of Power Systems (EEES-2022): Collection of scientific papers from the 6th International Scientific and Technical Conference*, November 20-23, 2022, 44–45. Kharkiv: Madrid Printing House. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/73651>

**S. Yo. Mysak, S. P. Shapoval, A. M. Hyvliud**

*Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine*

## RESEARCH ON A COMBINED SYSTEM WITH A HYBRID SOLAR COLLECTOR

Within the framework of the Paris Agreement, there is a growing emphasis on increasing the utilization of renewable energy sources (RES) while gradually phasing out traditional carbon fuels. Solar energy has received particular attention due to its significant growth in recent decades. Consequently, in line with European energy and climate strategies, there is a planned substantial increase in solar energy utilization. To address this, a computer model of a hybrid solar collector system capable of producing both thermal and electrical energy concurrently has been developed. The study involved investigating the changes in coolant temperature in the hybrid thermal photovoltaic solar collector over time under solar radiation, as well as analyzing the variation in coolant temperature in the thermal accumulator. Key findings include the establishment of temperature increase patterns in both the hybrid collector and the thermal accumulator during the experiment. Moreover, the study characterized the fluctuation in the instantaneous thermal power of the solar collector and determined the average useful efficiency coefficient over time. Furthermore, the research outlined the change in the instantaneous specific thermal power of the system and described the thermal efficiency of the entire system over the course of the experiment. The insights gained from this study will inform the implementation of such systems in real-world settings to power various applications, highlighting the potential for further advancements in renewable energy technologies. This research contributes to the broader goal of transitioning towards sustainable energy solutions, aligning with global efforts to mitigate climate change and reduce dependency on fossil fuels. As a result, it offers valuable insights for policymakers, researchers, and industries involved in the renewable energy sector, paving the way for enhanced efficiency and effectiveness in harnessing solar power. Moreover, the development of a computer model for a hybrid solar collector system provides a valuable tool for future research and optimization of similar renewable energy systems. By understanding the performance and behaviour of such systems under different conditions, stakeholders can make informed decisions regarding their implementation and integration into existing energy infrastructures. Overall, this study underscores the importance of continued research and innovation in renewable energy technologies to address the challenges of climate change and energy sustainability.

**Keywords:** energy supply; solar collector; Alternative Energy Sources; heat supply; photovoltaic solar collector.