

УДК 620.97:697.329

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.224-231](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.224-231)

С. Й. Мисак, доц., канд. техн. наук, С. П. Шаповал, проф., д-р техн. наук,
М. Я. Кузнецова, доц., канд. техн. наук

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

e-mail: stepan.p.shapoval@lpnu.ua

Аналіз ефективності інноваційного гібридного теплового фотоелектричного колектора

Дослідження присвячене розробці та оптимізації гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК), здатного максимально ефективно використовувати сонячне випромінювання. Здійснено експериментальні випробування та аналіз впливу кутів нахилу ГТФГК та інтенсивності падаючого на нього сонячного випромінювання на теплову й електричну ефективність геліосистеми. Результати демонструють перспективи впровадження запропонованої ГТФГК для модернізації енергетичної інфраструктури.

відновлювальні джерела енергії, гібридний тепловий фотоелектричний колектор, сонячне випромінювання, ефективність, концентратор, фотоелемент

Постановка проблеми. Глобальні кліматичні зміни, що набирають все більшого масштабу, разом із прогнозами провідних наукових організацій [1] вказують на невідкладну необхідність радикального зниження шкідливих викидів та поступової відмови від традиційних джерел енергії. Стрімке зростання техногенного впливу на довкілля змушує світове співтовариство активно впроваджувати політику сталого розвитку [2], орієнтовану на впровадження екологічно безпечних технологій та мінімізацію негативного впливу промисловості на природу.

Перехід на відновлювані джерела енергії перестає бути лише перспективним напрямом і стає нагальною необхідністю [3]. Від цього залежить не лише збереження природних ресурсів, а й глобальна енергетична безпека, стабільність економічних процесів та якість життя майбутніх поколінь [4]. Використання сонячної, вітрової та інших відновлюваних видів енергії є ключовим кроком до побудови чистішого, стійкішого та екологічно відповідального світу.

Ключовим завданням є розробка інноваційних конструктивних і технологічних рішень, спрямованих на максимальне поглинання сонячного випромінювання та зниження енергетичних втрат. Це передбачає інтеграцію теплових і фотоелектричних компонентів у єдину, гібридну систему, впровадження новітніх матеріалів з покращеними тепло- і світлопоглинальними властивостями, оптимізацію процесів теплообміну.

Розв'язання цієї проблеми відкриває широкі перспективи для розвитку сонячної енергетики. Завдяки кращій енергоефективності та оптимальній ціні гібридні системи сонячного енергопостачання стануть доступнішими для широкого впровадження в побутовій та промисловій сферах, що сприятиме скороченню викидів вуглекислого газу від викопного палива і масштабному, критично важливому переходу на екологічно чисті джерела енергії [3].

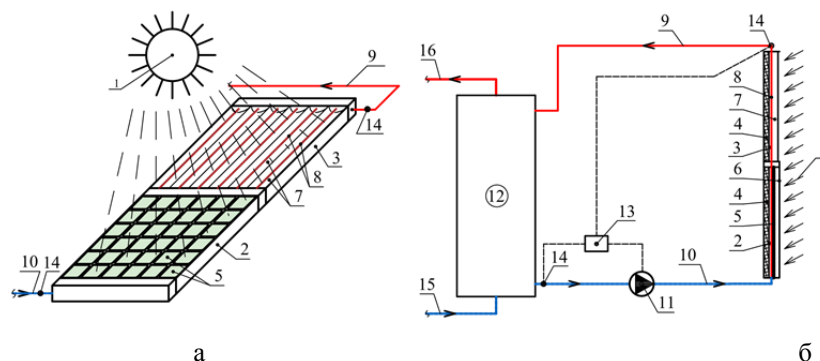
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Глибокий аналіз сучасних наукових публікацій засвідчує важливість комбінування різних типів геліоколекторів задля оптимального використання сонячного випромінювання. Адже важливим недоліком традиційних фотоелектричних панелей є низька ефективність із-за нерівномірного охолодження їх поверхні: із загальної кількості сонячного випромінювання, що потрапляє на їхню поверхню, лише 15 % перетворюється на електроенергію, тоді як близько 10 % використовується у вигляді теплової енергії [5]. Іншими недоліками є висока вартість, технічні труднощі при інтеграції в наявні покрівельні конструкції, а

також потреба у більшому просторі для окремих систем [6]. Плоскі пластинчасті теплові сонячні колектори, які є найбільш поширеними, характеризуються низькою теплопередачею із-за малого коефіцієнта конвективного теплообміну між теплоносієм, що протікає в їх контурі, і поглиначем сонячної енергії. Враховуючи цей факт, для збільшення їх продуктивності, ефективності теплообміну та довговічності, що підтверджується теоретично і експериментально, запропоновано використання концентраторів сонячного випромінювання [7], інноваційних матеріалів, покращення технологічних і конструктивних рішень [8, 9].

Гібридні сонячні колектори стають ключовим елементом сучасних енергетичних систем завдяки їхній компактності та унікальній здатності одночасно виробляти електричну та теплову енергію. Новітні дослідження підтверджують, що такі пристрої демонструють вищу продуктивність порівняно з традиційними фотоелектричними панелями та тепловими геліоколекторами, що робить їх особливо перспективними для широкого використання [10, 11]. Завдяки своїй гнучкості та адаптивності, гібридні геліосистеми здатні ефективно функціонувати в різних кліматичних умовах та відповідати специфічним технічним вимогам. Їхній принцип роботи поєднує характеристики як плоских теплових сонячних колекторів, так і фотоелектричних панелей, що дозволяє значно покращити загальну продуктивність. Проте для повноцінного розкриття їхнього потенціалу необхідно продовжувати оптимізацію теплових та електричних характеристик, а також впроваджувати технології, що збільшують термін експлуатації та покращують енергоефективність [12, 13].

Постановка завдання. Таким чином, метою є дослідження, яке зосереджене на розробці та вдосконаленні гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК) для максимально ефективного використання сонячного випромінювання. Увага приділяється підвищенню його теплової та електричної продуктивності. Оптимізація конструкції та правильне розміщення ГТФГК є ключовими факторами, що сприяють мінімізації теплових втрат та підвищенню ефективності його функціонування. Активне використання такого рішення сприятиме модернізації енергетичної інфраструктури, зміцненню економічної стабільності та створенню умов для сталого розвитку суспільства.

Виклад основного матеріалу. У цьому дослідженні аналізується робота гібридної системи енергопостачання (ГСЕ), що використовує гібридний тепловий і фотоелектричний геліоколектор (ГТФГК). Основна концепція такої системи полягає в одночасному перетворенні сонячної енергії в електричну та теплову, що підвищує її ефективність. Структурну схему цієї інноваційної установки представлено на рисунку 1.



а – вигляд збоку; б – вигляд зверху (1 – сонячне випромінювання; 2, 3 – теплофотоелектричний та тепловий модулі гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК); 4 – утеплення; 5 – фотоелементи; 6 – захисне скло; 7 – концентратори сонячного випромінювання; 8 – теплопоглинальні труби; 9, 10 – трубопроводи нагрітої та охолодженої води; 11 – циркуляційна помпа; 12 – тепловий акумулятор (ТА); 13 – контролер управління ГСЕ; 14 – температурні сенсори; 15, 16 – трубопроводи нагрітої та охолодженої води в системі споживача)

Рисунок 1 – Принципова схема ГСЕ з ГТФГК

Джерело: розроблено авторами

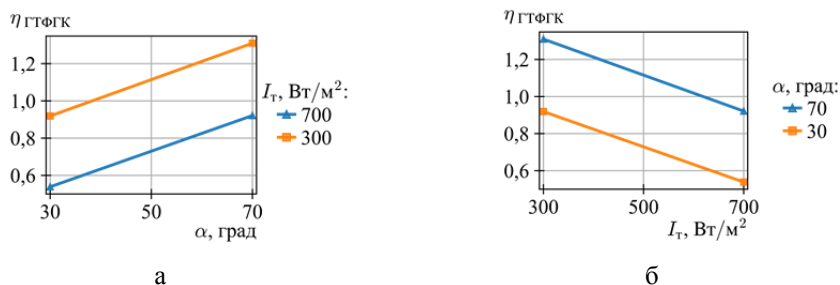
Гібридна система енергопостачання (ГСЕ), що представлена на рисунку 1, поєднує в собі гібридний тепловий фотоелектричний геліоколектор (ГТФГК) та тепловий акумулятор (ТА) 12. Основне завдання ТА— накопичення теплової енергії для споживачів, що утворюється в результаті поглинання сонячного випромінювання 1.

ГТФГК складається з двох основних модулів: теплофотоелектричного 2, який генерує як електроенергію, так і тепло, та окремого теплового модуля 3, що підвищує ефективність утилізації сонячної енергії. Для мінімізації тепловтрат ці модулі оснащені теплоізоляційним шаром 4. Виробництво електроенергії здійснюється завдяки фотоелементам 5, які отримують сонячне випромінювання 1 через захисне скло 6, що зменшує втрати енергії та захищає систему від впливу зовнішніх факторів. Крім того, у теплового модулі ГТФГК використані спеціальні концентратори сонячного випромінювання 7, які фокусують сонячну енергію на теплопоглинальних трубах 8, що дозволяє інтенсивніше нагрівати теплоносії. Передача теплової енергії між ГТФГК і ТА відбувається за допомогою теплоізованих трубопроводів 9 і 10, де нагріта вода за допомогою циркуляційної помпи 11 транспортується до ТА, а охолоджена повертається назад у ГТФГК. Робота циркуляційної помпи координується контролером 13, що аналізує дані температурних сенсорів 14 та автоматично регулює параметри системи для підтримки оптимального теплового режиму. Теплоносії у ТА через циркуляційні трубопроводи 15, 16 поступово віддає накопичене тепло споживачам, забезпечуючи стабільну роботу ГСЕ навіть при зміні інтенсивності сонячного випромінювання.

Для оцінки ефективності ГСЕ з ГТФГК проводилися експериментальні випробування при температурі навколишнього середовища $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. ГТФГК був орієнтований так, щоб його робоча площа залишалася строго перпендикулярною до сонячних променів, що дозволяло максимально ефективно використовувати сонячну енергію. Всі ключові параметри роботи системи реєструвалися з інтервалом у 5 хвилин, при цьому швидкість циркуляції теплоносія залишалася стабільною, що дозволяло отримати об'єктивні результати та оцінити потенціал подальшої оптимізації системи.

У рамках експериментальних досліджень представлено шість випробувань, які проводилися за питомої масової витрати теплоносія G , що циркулював у контурі системи, на рівні $0,01\text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$. А також, перші три дослідження, графічні результати яких наведені на рисунках 2–4, проводилися за умов фіксованого кута нахилу ГТФГК до горизонту $\beta = 30^{\circ}$, а решта, що на рисунках 5–7, – за інтенсивності сонячного випромінювання в його площині $I_T = 300\text{ Вт}/\text{м}^2$.

Графіки теплової ефективності $\eta_{\text{ГТФГК}}$ в залежності від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α , град, та інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T , $\text{Вт}/\text{м}^2$, побудовані на рисунках 2а та 2б.

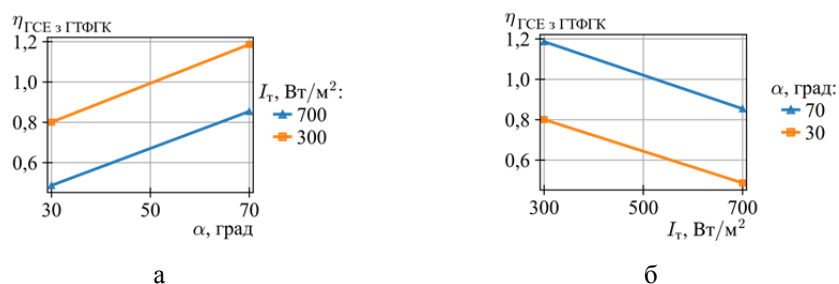


а – залежність від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α та інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T ; б – залежність від інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α

Рисунок 2 – Зміна теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ за постійних $\beta = 30^{\circ}$ та $G = 0,01\text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$
Джерело: розроблено авторами

З рисунка 2а можна зробити висновок, що зі збільшенням азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α на 42 % та на 70 % зростають теплові ефективності $\eta_{\text{ГТФГК}}$ для інтенсивностей сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T відповідно 300 Вт/м² та 700 Вт/м². Тобто зі збільшенням α на кожні 10° $\eta_{\text{ГТФГК}}$ зростає на 0,1.

На основі аналізу експериментальних даних, що наведені на рисунку 2б, зі збільшенням інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T спостерігається зменшення його теплової ефективності $\eta_{\text{ГТФГК}}$ на 29,8 % та 41,3 % для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α зі значеннями 70° та 30° відповідно. Отже, збільшення I_T на кожні 100 Вт/м² зменшує $\eta_{\text{ГТФГК}}$ на 0,1. На рисунках 3а і 3б зображено теплову ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$, яка залежить від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α , град, та інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T , Вт/м².



а – залежність від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α та інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T ; б – залежність від інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α

Рисунок 3 – Зміна теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ при $\beta = 30^\circ$ та $G = 0,01$ кг/(м²·с)
Джерело: розроблено авторами

Згідно з рисунком 3а, зі збільшенням азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α теплова ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ зростає на 48,7 % при інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T рівній 300 Вт/м² та на 73,5 % – при 700 Вт/м². Оскільки прямі ефективностей однаково нахилені, то збільшення α на кожні 10° збільшує $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ на 0,1.

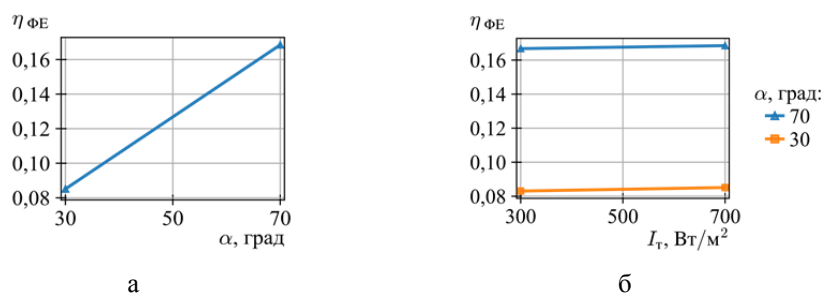
Як показано на рисунку 3б, зі збільшенням інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T спостерігається зменшення теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ на 28,6 % та 38,8 % для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α зі значеннями 70° та 30° відповідно. Отже, при збільшенні I_T на кожні 125 Вт/м² $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ зменшується на 0,1.

На рисунку 4а при інтенсивностях сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T рівних 300 Вт/м² і 700 Вт/м² представлено графік зміни електричної ефективності його фотоелементів $\eta_{\text{ФЕ}}$, який залежать від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α , град, а на рисунку 4б – залежності $\eta_{\text{ФЕ}}$ від I_T та α .

Згідно з рисунком 4а, зі збільшенням азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α електрична ефективність його фотоелементів $\eta_{\text{ФЕ}}$ зростає майже вдвічі. При цьому на неї майже не впливає зміна інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T .

Згідно з аналізом рисунка 4б, електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ не залежить від інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T , її

постійні значення для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α рівному 30° ϵ 0,084, а для 70° – 0,167.

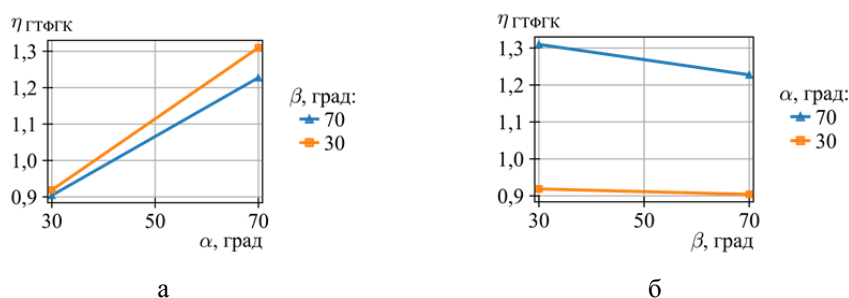


а – залежність від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α при інтенсивностях сонячного випромінювання в його площині I_t рівних $300 W/m^2$ і $700 W/m^2$; б – залежність від інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_t та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α

Рисунок 4 – Електрична ефективність фотоелементів ГТФГК η_{FE} при $\beta = 30^\circ$ та $G = 0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

Джерело: розроблено авторами

На рисунках 5а і 5б побудовані графіки теплової ефективності ГТФГК $\eta_{ГТФГК}$ в залежності від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α , град, та кута нахилу його до горизонту β , град.



а – залежність від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α та кута нахилу його до горизонту β ; б – залежність від кута нахилу його до горизонту β та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α

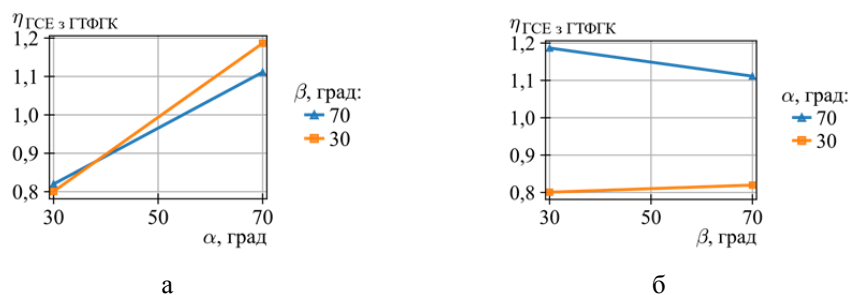
Рисунок 5 – Теплова ефективність ГТФГК $\eta_{ГТФГК}$ при $I_t = 300 W/m^2$ та $G = 0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

Джерело: розроблено авторами

Згідно з рисунком 5а, при збільшенні азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α з 30° до 70° збільшує його теплову ефективність $\eta_{ГТФГК}$ на 36,7 % для кута нахилу ГТФГК до горизонту β рівному 70° та на 42,4 % – для 30° . Водночас зі зростанням β спадає $\eta_{ГТФГК}$.

На основі аналізу експериментальних даних, що наведених на рисунку 5б, теплова ефективність ГТФГК $\eta_{ГТФГК}$ незначно залежить від кута нахилу його до горизонту β , на 2 % зменшившись при азимутальному куті відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α рівному 30° та на 6 % – при 70° . Збільшення α також призводить до зростання $\eta_{ГТФГК}$.

На рисунках 6а і 6б зображено теплову ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{ГСЕ з ГТФГК}$, яка залежить від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α , град, та кута нахилу його до горизонту β , град. Згідно з рисунком 6а, зі збільшенням азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α теплова ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{ГСЕ з ГТФГК}$ зростає на 48,7 % для кута нахилу ГТФГК до горизонту β рівному 30° та 35,4 % – для 70° . При α приблизно рівному 40° $\eta_{ГСЕ з ГТФГК}$ не залежить від β і приблизно дорівнює 0,88.



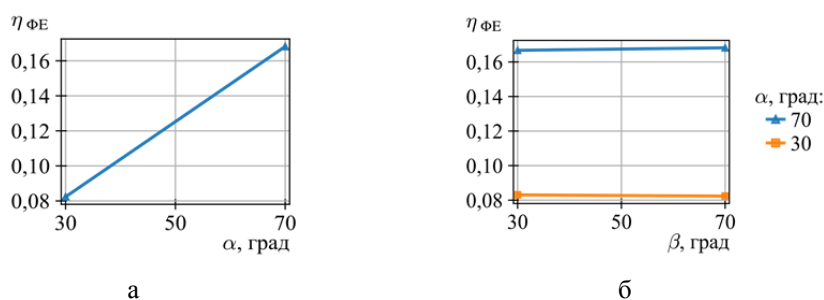
а – залежність від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α та кута нахилу його до горизонту β ; б – залежність від кута нахилу його до горизонту β та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α

Рисунок 6 – Зміна теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ при $I_T = 300 \text{ Вт/м}^2$ та $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$

Джерело: розроблено авторами

Як показано на рисунку 6б, тепла ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ не дуже залежить від кута нахилу ГТФГК до горизонту β , тому лише на 2,5 % збільшується для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α , що дорівнює 30° , та на 6,7 % – для 70° .

На рисунку 7а представлено графіки зміни електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$, які залежать від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α , град, при кутах нахилу його до горизонту β рівних 30° і 70° , а на рисунку 7б – від β та α .



а – залежність від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α при кутах нахилу його до горизонту β рівних 30° і 70° ; б – залежність від кута нахилу його до горизонту β та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α

Рисунок 7 – Зміна електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ за $I_T = 300 \text{ Вт/м}^2$ та $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$

Джерело: розроблено авторами

Згідно з рисунком 7а, зі збільшенням азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α електрична ефективність його фотоелементів $\eta_{\text{ФЕ}}$ не залежить від кута нахилу його до горизонту β і зростає вдвічі з 0,083 до 0,167.

Згідно з аналізом рисунка 7б, електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ не залежить від зростання кута нахилу ГТФГК до горизонту β і становить 0,083 та 0,167 для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α рівному 30° та 70° відповідно.

Висновки. В результаті аналізу одночасного впливу різних факторів на роботу ГТФГК виявлено, що при куті нахилу його до горизонту $\beta = 30^\circ$ та питомій масовій витраті теплоносія $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ збільшення азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α з 30° до 70° сприяє зростанню його теплової ефективності $\eta_{\text{ГТФГК}}$ на 42 % та 70 %, електричної ефективності $\eta_{\text{ФЕ}}$ – майже вдвічі, а також теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ на 48,7 % та 73,5 % для

інтенсивностей сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T , які дорівнюють 300 Вт/м² та 700 Вт/м² відповідно. Зі зміною I_T з 300 Вт/м² до 700 Вт/м² $\eta_{\text{ГТФГК}}$ і $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ зменшуються в середньому на 29 % та 40 %, а $\eta_{\text{ФЕ}}$ залишається постійною при $\beta = 70^\circ$ і $\beta = 30^\circ$ відповідно.

При $I_T = 300$ Вт/м² та $G = 0,01$ кг/(м²·с) зі зростанням α з 30° до 70° ефективності також зростають: $\eta_{\text{ГТФГК}}$ на 36,7 % і 42,4 %, і $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ на 35,4 % і 48,7 %, $\eta_{\text{ФЕ}}$ удвічі для $\beta = 70^\circ$ і $\beta = 30^\circ$ відповідно. При $\alpha = 30^\circ$ збільшення β з 30° до 70° майже не впливає на $\eta_{\text{ГТФГК}}$ і $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$, змінюючи їх лише на 2 %. А при $\alpha = 70^\circ$ це збільшення призводить до зменшення $\eta_{\text{ГТФГК}}$ і $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ в середньому на 6 %. При цьому $\eta_{\text{ФЕ}}$ залишається постійною в обох випадках. Отже, на відміну від β , α значно впливає на теплову та електричну ефективність ГТФГК, які збільшуються при зменшенні I_T .

Проведення цих випробувань дозволило не лише встановити закономірності зміни основних робочих характеристик ГТФГК, а й проаналізувати вплив різних факторів на його продуктивність. Отримані результати слугуватимуть основою для подальшого вдосконалення конструкції та алгоритмів управління гібридною енергетичною системою.

Список літератури

1. Global Warming of 1.5°C. Summary for Policymakers. IPCC 2018. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15_SPM_version_stand_alone_LR.pdf (дата звернення: 10.03.2023).
2. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1. United Nations. URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf> (дата звернення: 10.03.2023).
3. Paris Agreement. United Nations. URL: https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%2006-03%20PM/Ch_XXVII-7-d.pdf (дата звернення: 10.03.2023).
4. The 2030 climate and energy framework. European Commission. URL: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/climate-change/2030-climate-and-energy-framework> (дата звернення: 10.03.2023).
5. Ramos A., Guarracino I., Mellor A., Alonso-Elvarez D., Childs P., Ekins-Daukes N. J., Markides C. N.. Solar-thermal and hybrid photovoltaic-thermal systems for renewable heating. Briefing paper. 2017. Vol. 22. URL: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10473.29280> (date of access: 28.03.2025).
6. Abdelhafez E. A., Hamdan M. A., and Al Aboushi A. R. Simulation of Solar Thermal Hybrid Heating System Using Neural Artificial Network. 8th International Ege Energy Symposium and Exhibition (IEESE-8) : conference, Afyonkarahisar, Turkey, May 2016. P. 1–6.
7. Shapoval S., Spodyniuk N., Zhelykh V., Shepichak V., Shapoval P. Application of rooftop solar panels with coolant natural circulation. Pollack Periodica. 2021. Vol. 16, no 1. P. 132–137.
8. Diwania S., Agrawal S., Siddiqui A. S., Singh S.. Photovoltaic-thermal (PV/T) technology: a comprehensive review on applications and its advancement. International Journal of Energy and Environmental Engineering. 2020. Vol. 11, no. 5. P. 33–54. URL: <https://doi.org/10.1007/s40095-019-00327-y> (date of access: 28.03.2025).
9. Said Z., Alshehhi A. A., Mehmood A. Predictions of UAE's renewable energy mix in 2030. Renewable Energy. 2018. Vol. 118. P. 779–789. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.075> (date of access: 28.03.2025).
10. Mysak S., Shapoval S., Matiko H.. Simulation of Hybrid Solar Collector Operation in Heat Supply System. Energy Engineering and Control Systems. 2023. Vol. 9, no. 2. P. 61–62.
11. Суржик О. М. Теплофізичні характеристики геліоенергетичних модулів з композиційними тепловідводами : дис. ... канд. техн. наук. : 05.14.08. Київ., 2016. 159 с.
12. Venhryn I., Shapoval S., Voznyak O., Datsko O., Gulai B. Modelling of optical characteristics of the Thermal Photovoltaic Hybrid Solar Collector. International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies. 2021. Vol. 1. P. 255–258. URL: <https://doi.org/10.1109/CSIT52700.2021.9648738> (date of access: 28.03.2025).
13. 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. 2023. Vol. 45. URL: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102892> (date of access: 28.03.2025).

References

1. IPCC (2018). Global Warming of 1.5°C. Summary for Policymakers. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15_SPM_version_stand_alone_LR.pdf
2. United Nations. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1. sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf
3. United Nations (2015). Paris Agreement. [https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%2006-](https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%2006-03%20PM/Ch_XXVII-7-d.pdf)

- 03%20PM/ Ch_XXVII-7-d.pdf
4. European Commission. (2019). The 2030 climate and energy framework. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/climate-change/2030-climate-and-energy-framework>
 5. Ramos, A., Guarracino, I., Mellor, A., Alonso-Elvarez, D., Childs, P., Ekins-Daukes, N. J., & Markides, C. N. (2017). *Solar-thermal and hybrid photovoltaic-thermal systems for renewable heating*. Briefing paper, 22. doi: 10.13140/RG.2.2.10473.29280
 6. 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, May 2016. Afyonkarahisar, Turkey, 1-6.
 7. Shapoval, S., Spodyniuk, N., Zhelykh, V., Shepichak, V., & Shapoval, P. (2021). Application of rooftop solar panels with coolant natural circulation. *Pollack Periodica*, 16(1), 132-137. doi: 10.1556/606.2020.00218
 8. Diwania, S., Agrawal, S., Siddiqui, A. S., & Singh, S. (2020). Photovoltaic–thermal (PV/T) technology: a comprehensive review on applications and its advancement. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11, 33-54. doi: 10.1007/s40095-019-00327-y
 9. Said, Z., Alshehhi, A. A., & Mehmood, A. (2018). Predictions of UAE's renewable energy mix in 2030. *Renewable Energy*, 118, 779-789. doi: 10.1016/j.renene.2017.11.075
 10. Mysak, S., Shapoval, S., & Matiko, H. (2023). Simulation of Hybrid Solar Collector Operation in Heat Supply System. *Energy Engineering and Control Systems*, 9(2), 61-62.
 11. Surzhyk, O. M. (2016). *Thermophysical characteristics of solar energy modules with composite heat sinks*. Candidate's thesis. Kyiv: ONTU [in Ukrainian].
 12. Venhryn, I., Shapoval, S., Voznyak, O., Datsko, O., & Gulai, B. (2021). Modelling of optical characteristics of the Thermal Photovoltaic Hybrid Solar Collector. *2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Lviv, Ukraine, 2021, 255d258. doi: 10.1109/CSIT52700.2021.9648738
 13. 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. doi: 10.1016/j.csite.2023.102892

Stepan Mysak, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Stepan Shapoval**, Prof., Dr. tech. sci.,

Marta Kuznetsova, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Analysis of the Efficiency of an Innovative Hybrid Thermal Photovoltaic Collector

The research is devoted to the development and optimization of a hybrid power supply system (HPS) with a hybrid thermal photovoltaic solar collector (HTPSC), capable of using solar radiation as efficiently as possible. The aim of the research is to focus on the development and improvement of HTPSC for the most efficient use of solar radiation. Attention is paid to increasing its thermal and electrical performance. Optimization of the design and correct placement of the HTPSC are key factors that contribute to minimizing heat losses and increasing the efficiency of its operation. The active use of such a solution will contribute to the modernization of the energy infrastructure, strengthening economic stability and creating conditions for sustainable development of society.

The proposed design of the HTPSC consists of two modules: a thermal photovoltaic module, which simultaneously generates thermal and electrical energy (using photovoltaic cells), and a separate thermal module, which produces heat using solar radiation concentrators placed in it. All key parameters of the system were recorded at an interval of 5 minutes, while the coolant circulation rate remained stable. This ensured the objectivity of the results obtained and allowed us to assess the potential for further optimization of the system. Within the framework of experimental studies, six tests were conducted at an ambient temperature of 15 °C and a specific mass flow rate of the coolant in the system circuit $G = 0.01 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$. The first three studies were performed at a fixed angle of inclination of the HTPSC to the horizon $\beta = 30^\circ$, while the azimuthal angle of deviation of the normal to the HTPSC from the local meridian α and the intensity of solar radiation in its plane I_t were changed. The next three tests were carried out at $I_t = 300 \text{ W/m}^2$, with α and β remaining as variable parameters.

As a result of the first three experiments, it was found that increasing α from 30° to 70° contributes to an increase in the thermal efficiency of the HTPSC η_{HTPSC} by 42 % and 70 %, the electrical efficiency of photovoltaic cells η_{PC} by half, and the thermal efficiency of the HPS with HTPSC $\eta_{\text{HPS with HTPSC}}$ by 48.7 % and 73.5 % at I_t equal to 300 W/m^2 and 700 W/m^2 , respectively. With an increase in I_t from 300 W/m^2 to 700 W/m^2 , η_{HTPSC} and $\eta_{\text{HPS with HTPSC}}$ decrease on average by 29 % and 40 %, while η_{PC} remains constant at $\beta = 70^\circ$ and $\beta = 30^\circ$, respectively. In the next three experiments with an increase in α from 30° to 70° , the efficiency also increases: η_{HTPSC} by 36.7 % and 42.4 %, and $\eta_{\text{HPS with HTPSC}}$ by 35.4 % and 48.7 %, η_{PC} doubles for $\beta = 70^\circ$ and $\beta = 30^\circ$, respectively. With a fixed $\alpha = 30^\circ$, increasing the angle β from 30° to 70° has almost no effect on η_{HTPSC} and $\eta_{\text{HPS with HTPSC}}$, changing them by only 2 %. However, with $\alpha = 70^\circ$, the same increase in the angle β leads to a decrease in η_{HTPSC} and $\eta_{\text{HPS with HTPSC}}$ by an average of 6 %. At the same time, η_{PC} remains constant in both cases.

renewable energy sources, hybrid thermal photovoltaic collector, solar radiation, efficiency, concentrator, photovoltaic cell

Одержано (Received) 28.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 03.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 22.04.2025