

Степан Петрович Шаповал¹, Степан Йосифович Мисак²

¹доктор технічних наук, професор кафедри теплогазопостачання та вентиляції
Національний університет "Львівська політехніка" (Львів, Україна)

E-mail: stepan.p.shapoval@lpnu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4985-0930>

²кандидат технічних наук, старший викладач кафедри теплоенергетики, теплових та атомних електричних станцій
Національний університет "Львівська політехніка" (Львів, Україна)

E-mail: stepan.y.mysak@lpnu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2064-7015>

ТЕПЛОВА ЕФЕКТИВНІСТЬ ГІБРИДНОГО ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕЛІОКОЛЕКТОРА ДЛЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ

У статті досліджено ефективність гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК). Встановлено, що його теплова ефективність збільшується на 41 % зі зменшенням інтенсивності сонячного випромінювання до 300 Вт/м², а електрична ефективність зменшується лише на 2,4 %. Доведено мінімальний вплив кута нахилу ГТФГК до горизонту та питомої масової витрати теплоносія в його контурі на ефективність геліосистеми. Застосування конструкції з концентраторами випромінювання забезпечує стабільну та продуктивну роботу ГТФГК в умовах недостатнього освітлення.

Ключові слова: сонячне випромінювання; гібридний геліоколектор; сонячна гібридна система; теплова ефективність; електрична ефективність; фотоелемент; сонячний концентратор.

Рис.: 13. Бібл.: 22.

Актуальність теми дослідження. Сучасний розвиток відновлюваної енергетики сприяє активному впровадженню гібридних сонячних систем, зокрема геліоколекторів, що поєднують у собі функції фотоелектричних та теплових установок. Такі системи дозволяють ефективно використовувати сонячне випромінювання, одночасно генеруючи електроенергію та теплову енергію. Це особливо актуально для територій із обмеженим простором для встановлення традиційних енергетичних систем. Завдяки можливості працювати навіть за умов недостатнього освітлення, таких як похмурі дні або ранкове та вечірнє розсіяне світло, гібридні геліоколектори забезпечують стабільне енергопостачання.

Інтеграція таких технологій у сучасну енергосистему сприяє підвищенню енергетичної незалежності та зменшенню залежності від викопних палив. Це особливо важливо в контексті змін клімату, нестабільності традиційного енергетичного сектору та необхідності скорочення шкідливих викидів. Оскільки гібридні геліоколектори працюють виключно на основі сонячного випромінювання, вони не завдають шкоди довкіллю, сприяючи зменшенню рівня забруднення атмосфери та скороченню викидів CO₂.

Крім екологічних переваг, використання таких систем дозволяє значно знизити витрати на теплопостачання житлових і комерційних об'єктів, що робить їх економічно вигідним рішенням. Завдяки цьому гібридні геліоколектори набувають дедалі більшої популярності серед підприємств, державних установ і приватних споживачів, сприяючи переходу до сталої та екологічно безпечної енергетики.

Постановка проблеми. Зміни клімату, спричинені глобальним потеплінням, вимагають від людства негайних дій для зменшення шкідливих викидів та скорочення використання викопного палива. У зв'язку з цим на міжнародному рівні розроблено численні стратегії сталого розвитку [1], спрямовані на збереження довкілля та забезпечення екологічно безпечного майбутнього.

Одним із ключових документів, що регламентують зниження викидів CO₂, є Паризька угода [2], яка замінила Кіотський протокол. Відповідно до її положень, кожна країна встановлює національні цілі щодо скорочення викидів парникових газів і звітує про досягнення кожні п'ять років.

Згідно з даними звіту Special Report on Global Warming of 1.5 °C [3], прогнозується підвищення середньої температури нашої планети на 1,5 °C у період між 2030 і 2052 роками. Для протидії кліматичним змінам необхідно зменшити рівень енергоспоживання, підвищити енергоефективність у всіх секторах економіки, скоротити використання традиційних джерел енергії та активніше розвивати відновлювані та альтернативні енергетичні технології.

У цьому контексті Європейський Союз запровадив програму European Green Deal [4]. Вона спрямована на створення економіки замкнутого циклу, мінімізацію викидів шкідливих речовин, які забруднюють довкілля, а також на раціональне та енергоефективне використання природних ресурсів. Впровадження цієї програми є важливим кроком на шляху до сталого майбутнього та збереження планети для наступних поколінь. Європейська спільнота ставить за мету суттєве скорочення викидів парникових газів, прагнучи знизити їх обсяг на 95 % до 2050 року в межах ініціативи The 2030 Climate and Energy Framework [5]. Кожна країна ЄС формує власні національні кліматичні плани до 2030 року, які охоплюють питання енергетичної безпеки, диверсифікації енергоресурсів, підвищення енергоефективності та реалізації Паризької угоди.

Пріоритетним напрямком є розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Раніше, згідно з програмою Fit for 55 [6], планувалося підвищити їх частку до 40 % у загальному кінцевому споживанні енергії. Однак після військового вторгнення в Україну 2014 року ЄС прийняв нову ініціативу REPowerEU [7], згідно з якою ця частка має зрости до 45 %. Такий підхід спрямований на посилення енергетичної незалежності та перехід до стійких, екологічно чистих, відновлювальних джерел енергії.

На сьогодні активно розвиваються технології використання відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної енергетики [8,9], а також створюються новітні високоенергоефективні матеріали, що покращують ефективність і довговічність сонячних колекторів [10]. Одним із перспективних напрямів є гібридні сонячні колектори, які поєднують виробництво теплової та електричної енергії. Вони сприяють збільшенню загальної ефективності енергетичних систем і скороченню втрат енергії. Проте ключові технічні виклики включають покращення коефіцієнта корисної дії, мінімізацію теплових втрат, забезпечення стабільності роботи впродовж тривалого часу та розробку інноваційних матеріалів із високою поглинальною здатністю.

Враховуючи ці аспекти, створення вдосконалених гібридних геліоколекторів є важливим кроком у розвитку сонячної енергетики. Інтеграція передових технологій у такі системи дозволяє підвищити продуктивність, забезпечити надійність і зробити відновлювану енергію більш доступною та ефективною для широкого застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження у сфері сонячної енергетики підтверджують, що гібридні сонячні колектори мають значний потенціал завдяки їхній здатності одночасно генерувати електричну та теплову енергію. Аналіз літературних джерел показує, що такі системи демонструють вищу ефективність у порівнянні з окремими фотоелектричними або тепловими колекторами [11; 12]. Новітні дослідження спрямовані на вдосконалення конструкцій, підвищення продуктивності та інтеграцію нових матеріалів для покращення показників роботи [13; 14].

У сучасних наукових публікаціях наголошується на важливості комбінування різних типів колекторів для максимального використання сонячної енергії. Встановлено, що гібридні системи можуть бути ефективно адаптовані під різні кліматичні умови та технологічні потреби, поєднуючи характеристики плоских і фотоелектричних колекторів [15; 16]. Водночас дослідники відзначають необхідність оптимізації теплових та

електричних характеристик таких пристроїв для підвищення їхньої довговічності та ефективності використання ресурсів [17].

Застосування гібридних колекторів у системах енергозабезпечення є перспективним напрямом розвитку зеленої енергетики. Дослідження свідчать, що близько 90 % сонячної енергії поглинається поверхнею фотоелектричних панелей, проте лише 15 % з неї перетворюється на електричну енергію, а ще 10 % використовується у вигляді теплової енергії [18–20]. У зв'язку з цим дослідники запропонували розділити гібридний сонячний колектор на функціональні сегменти для підвищення ефективності обох видів енергії. Крім цього, використання концентраторів дозволяє збільшити тепловий коефіцієнт корисної дії системи, що підтверджується теоретичними та експериментальними дослідженнями [21; 22].

Отже, гібридні сонячні колектори є перспективною технологією, яка має потенціал для широкого впровадження у сфері відновлюваної енергетики, сприяючи підвищенню енергоефективності та зменшенню залежності від традиційних джерел енергії.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Огляд сучасних наукових досліджень свідчить про недостатню вивченість гібридних геліоколекторів, особливо в аспекті їхньої ефективності та теплотехнічних характеристик. Попри зростаючий інтерес до відновлюваних джерел енергії, відсутність комплексних методик розрахунку та стандартизованих підходів до проектування подібних систем ускладнює їх широкомасштабне впровадження. Подальші дослідження мають бути спрямовані на аналіз термодинамічних процесів у таких установках, оптимізацію їх конструктивних параметрів та розробку універсальних алгоритмів для моделювання їх роботи у різних кліматичних умовах.

Метою статті є дослідження спрямоване на оцінку ефективності гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора для максимального використання сонячної енергії. Основна увага приділяється підвищенню теплової продуктивності та електричної генерації, що сприятиме сталому розвитку та зниженню викидів вуглецю. Особливо важливим є оптимізація конструкції, розміщення колектора для покращення його ефективності, зменшення теплових втрат та забезпечення довготривалої стабільної роботи в різних кліматичних умовах. Використання таких технологій відкриває нові можливості для інтеграції відновлюваних джерел енергії в загальну енергетичну систему, сприяючи незалежності від викопного палива та розширенню екологічно чистих рішень.

Виклад основного матеріалу. У статті проаналізовано роботу гібридної системи енергопостачання (ГСЕ), що використовує гібридний тепловий фотоелектричний геліоколектор (ГТФГК). Принципова схема цієї системи представлена на рис. 1.

Запропонована ГСЕ, що поєднує ГТФГК та тепловий акумулятор (ТА). ГТФГК складається з двох частин: теплофотоелектричної 2 та теплової 6, а ТА 12 слугує для накопичення отриманого тепла. Передача теплової енергії між цими компонентами здійснюється за допомогою трубопроводів для нагрітого 10 і охолодженого теплоносія 11.

Циркуляцію теплоносія, яким є вода, забезпечує pompa 13, який перекачує нагріту воду від ГТФГК до ТА, звідки тепло постачається до споживачів. Управління циркуляційною помпою здійснюється автоматично блоком керування 14 на основі показників термодатчиків 9, розміщених на виходах ГТФГК та ТА. Для підвищення ефективності системи та зменшення тепловтрат конструкція ГТФГК включає теплоізоляційний шар 3 та концентратори сонячного випромінювання 7, які фокусують сонячну енергію на теплопоглинальні трубки 8. Генерація електроенергії відбувається завдяки фотоелементам 4, на які потрапляє сонячне світло через прозоре захисне покриття 5.

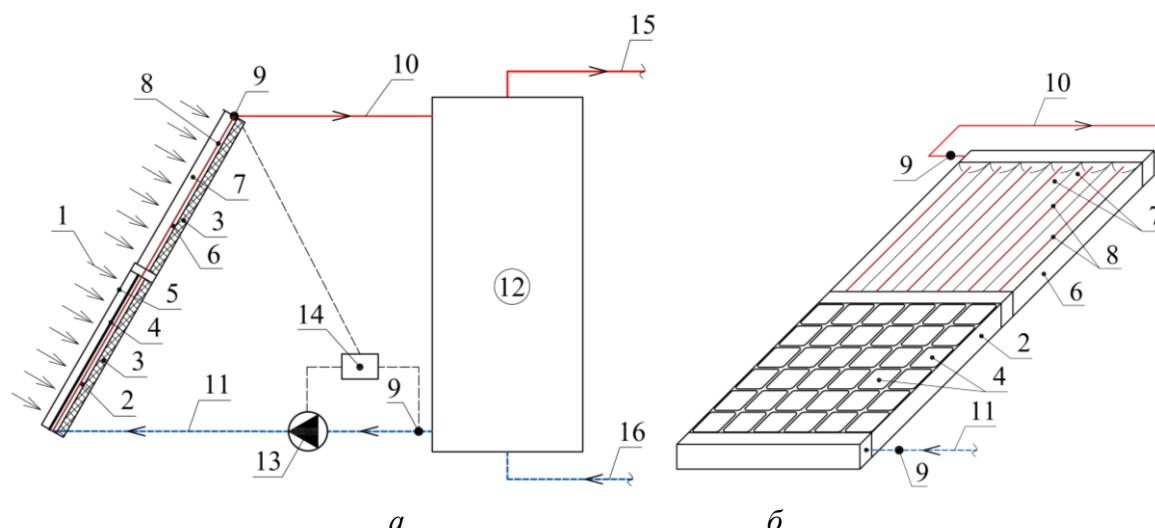


Рис. 1. Принципова схема ГСЕ з ГТФГК:

а – вигляд збоку і б – вигляд зверху:

- 1 – джерело сонячного випромінювання; 2 – теплофотоелектрична частина гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК); 3 – теплоізолятор; 4 – фотоелементи; 5 – світлопрозоре покриття; 6 – теплова частина ГТФГК; 7 – концентратори сонячного випромінювання; 8 – теплопоглинальні трубки; 9 – термодатчики; 10, 11 – трубопроводи нагрітого та охолодженого теплоносія; 12 – тепловий акумулятор (ТА); 13 – циркуляційна помпа; 14 – блок управління; 15, 16 – трубопроводи нагрітого та охолодженого теплоносія в контурі споживача
Джерело: розроблено авторами.

Експериментальні випробування системи проводилися за температури навколишнього середовища $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. ГТФГК був орієнтований строго перпендикулярно до напрямку сонячних променів. Параметри роботи системи фіксувалися кожні 5 хвилин, при цьому масова витрата теплоносія залишалася постійною.

Перші шість експериментів, залежності вихідних параметрів яких представлені на рис. 2–7, здійснювалися за фіксованих азимутального кута нахилу ГТФГК до місцевого меридіана α та його нахилу до горизонту β рівних 30° . А другі шість експериментів, зміни вихідних параметрів яких зображені на рис. 8–13, – за фіксованих $\alpha = 30^{\circ}$ та та інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК $I_T = 300\text{ Вт/м}^2$.

На рис. 2, на основі експериментальних досліджень, зображена зміна теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$, яка залежить від інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T , Вт/м^2 , за питомої масової витрати теплоносія $G = 0,01\text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$.

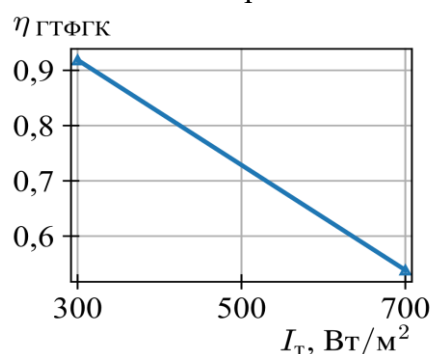


Рис. 2. Залежність теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ від інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_m при $\alpha = 30^{\circ}$, $\beta = 30^{\circ}$, $G = 0,01\text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$
Джерело: розроблено авторами.

Як помітно на рис. 2, теплова ефективність ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ зменшується на 41 % з 0,92 до 0,54 зі зростанням інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T з 300 Вт/м² до 700 Вт/м².

Теплова ефективність ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ в залежності від масової витрати G , кг/с, та інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T , Вт/м², зображена на рис. 3.

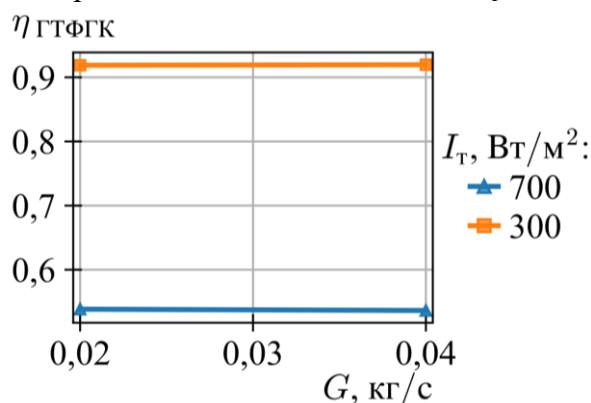


Рис. 3. Залежність теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ від масової витрати G та інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_m при $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 30^\circ$
Джерело: розроблено авторами.

Згідно з рис. 3, теплова ефективність ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ не залежить від масової витрати теплоносія в ньому G , та зменшується на 41 % з 0,92 до 0,54 зі зростанням інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T з 300 Вт/м² до 700 Вт/м².

На рис. 4 зображено залежність зміни теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T , Вт/м², та масової витрати теплоносія в ньому G , кг/с.

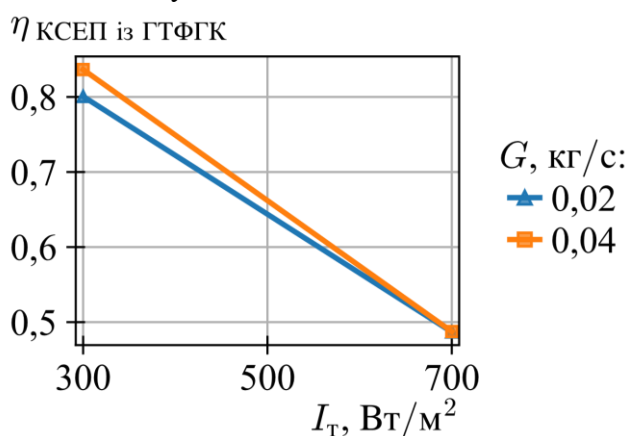


Рис. 4. Залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_m та масової витрати теплоносія в ньому G при $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 30^\circ$
Джерело: розроблено авторами.

Згідно з рис. 4, теплова ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ майже не залежить від питомої масової витрати теплоносія G та зменшується зі зростанням інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T : для 0,01 кг/(м²·с) – з 0,8 до 0,49, тобто на 39 %, а для 0,02 кг/(м²·с) – з 0,84 до 0,49, або на 42 %.

На основі експериментальних даних побудована графічна залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від масової витрати теплоносія G , кг/с, та інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T , Вт/м², та зображена на рис. 5.

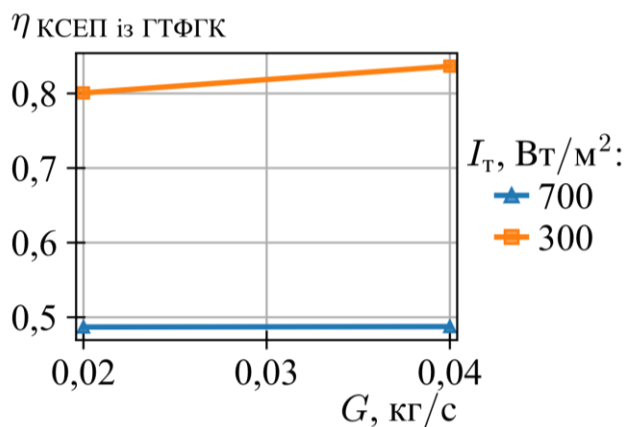


Рис. 5. Залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від масової витрати теплоносія G та інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_m при $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 30^\circ$

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 5 видно, що для інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T рівній 700 Вт/м² тепла ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ не залежить від питомої витрати теплоносія G в системі та становить 0,49, а для I_T рівній 300 Вт/м² – більша в 1,63 раза, на 5 % зростаючи при збільшенні G з 0,01 кг/(м²·с) до 0,02 кг/(м²·с).

Електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$, що залежить від інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T , Вт/м², за питомої масової витрати теплоносія $G = 0,01$ кг/(м²·с), подана на рис. 6.

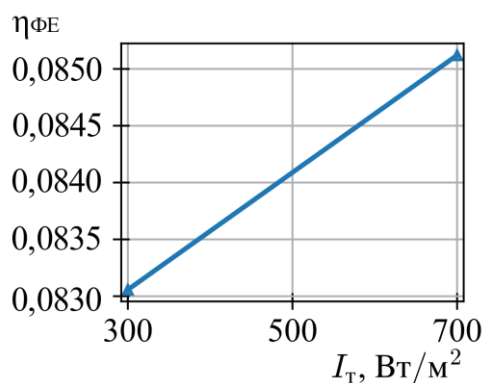


Рис. 6. Залежність електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ від інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_m при $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 30^\circ$, $G = 0,01$ кг/(м²·с)

Джерело: розроблено авторами.

Електрична ефективність фотоелементів $\eta_{\text{ФЕ}}$ на рис. 6 при зростанні інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T з 300 Вт/м² до 700 Вт/м² на 2,4 % збільшується з 0,083 до 0,085.

Зміна ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ від масової витрати теплоносія в ньому G , кг/с, та інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T , Вт/м², побудована на рис. 7.

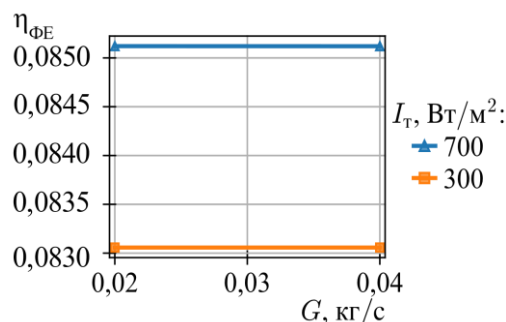


Рис. 7. Залежність електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{ФЕ}$ від масової витрати теплоносія G та інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_m при $\alpha = 30^\circ$ та $\beta = 30^\circ$

Джерело: розроблено авторами.

З рис. 7 випливає, що електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{ФЕ}$ не залежить від масової витрати теплоносія в ньому G та є лише на 2,4 % більшою – з 0,083 до 0,085 – при збільшенні I_T з 300 Вт/м² до 700 Вт/м².

Теплова ефективність ГТФГК $\eta_{т, ГТФГК}$ залежно від масової витрати теплоносія G , кг/с, та кута нахилу його до горизонту β , град, представлена на рис. 8.

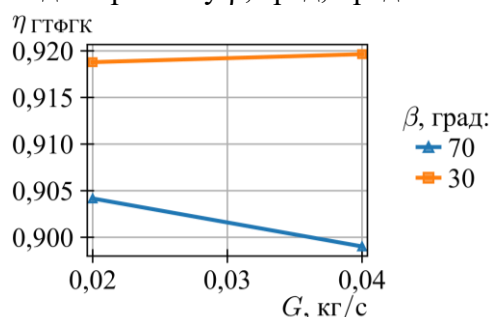


Рис. 8. Залежність теплової ефективності ГТФГК $\eta_{т, ГТФГК}$ від масової витрати теплоносія G та кута нахилу його до горизонту β при $\alpha = 30^\circ$, $I_m = 300$ Вт/м²

Джерело: розроблено авторами.

На основі аналізу експериментальних даних, зображених на рис. 8, виявлено дуже малий (менше за 1 %), але різнонаправлений характер зміни теплової ефективності ГТФГК від збільшення масової витрати теплоносія G , водночас вона на 2 % зменшується при збільшенні кута нахилу ГТФГК до горизонту β з 30° до 70° .

На рис. 9 знаходяться графіки зміни теплової ефективності ГТФГК $\eta_{т, ГТФГК}$ залежно від кута нахилу його до горизонту β , град, та масової витрати теплоносія G , кг/с.

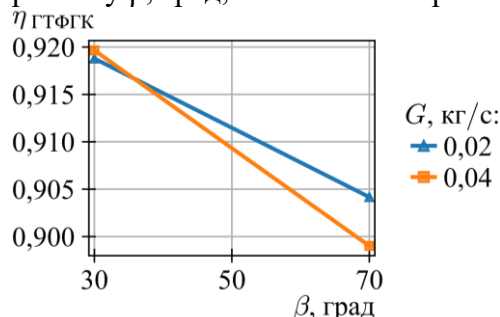


Рис. 9. Теплова ефективність ГТФГК $\eta_{т, ГТФГК}$ залежно від кута нахилу його до горизонту β та масової витрати теплоносія G при $\alpha = 30^\circ$, $I_m = 300$ Вт/м²

Джерело: розроблено авторами.

Як помітно на рис. 9, теплова ефективність ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ зменшується приблизно на 2 % при збільшенні кута нахилу його до горизонту β з 30° до 70° , водночас незначно (менше 1 %) вона залежить від зміни питомої масової витрати теплоносія в ГТФГК з $0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ до $0,02 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

На основі експериментальних даних побудована графічна залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від масової витрати теплоносія G , $\text{кг}/\text{с}$, та кута нахилу ГТФГК до горизонту β , град, та зображена на рис. 10.

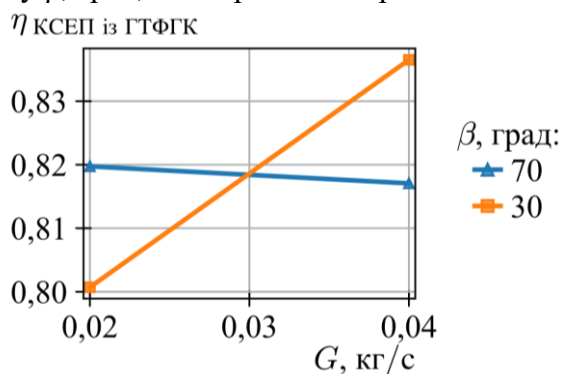


Рис. 10. Теплова ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ залежно від масової витрати теплоносія G та кута нахилу ГТФГК до горизонту β при $\alpha = 30^\circ$, $I_m = 300 \text{ Вт}/\text{м}^2$
Джерело: розроблено авторами.

На рис. 10 помітний різнонаправлений характер зміни теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$. Для $\beta = 30^\circ$ при збільшенні питомої витрати теплоносія G вона на 5 % збільшується, тоді як для $\beta = 70^\circ$ навпаки трохи зменшується, також $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ для G рівній $0,015 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ при різних β однакові, а для $0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ та $0,02 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ на 2,0–2,5 % відрізняються.

Зміна теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від кута нахилу ГТФГК до горизонту β , град, та масової витрати теплоносія в ньому G , $\text{кг}/\text{с}$, представлена на рис. 11.

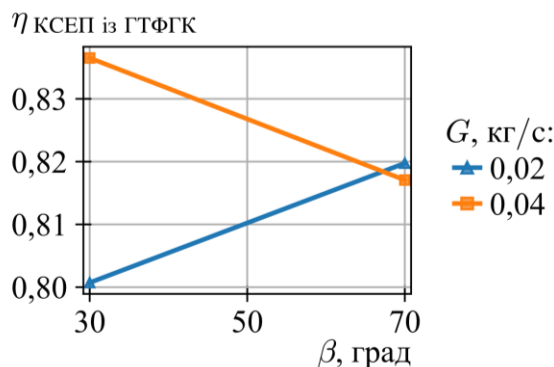


Рис. 11. Залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від кута нахилу ГТФГК до горизонту β та масової витрати теплоносія в ньому G при $\alpha = 30^\circ$, $I_m = 300 \text{ Вт}/\text{м}^2$
Джерело: розроблено авторами.

Згідно рис. 11, теплова ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ для різних питомих масових витрат теплоносія G та кутів нахилу ГТФГК до горизонту β має різнонаправлений характер зміни. Для G рівній $0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ зі збільшенням β з 30° до 70° вона зростає на 2,5 % з 0,8 до 0,82, а для G рівній $0,02 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ – настільки процентів спадає з 0,84

до 0,82. Для кута нахилу ГТФГК до горизонту рівному 30° значення теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК на 5 % відрізняються для різних питомих витрат, а для приблизно 65° – від них не залежать, дорівнюючи 0,82.

Залежність електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ від масової витрати теплоносія в ньому G , кг/с, та кута нахилу ГТФГК до горизонту β , град, побудована на рис. 12.

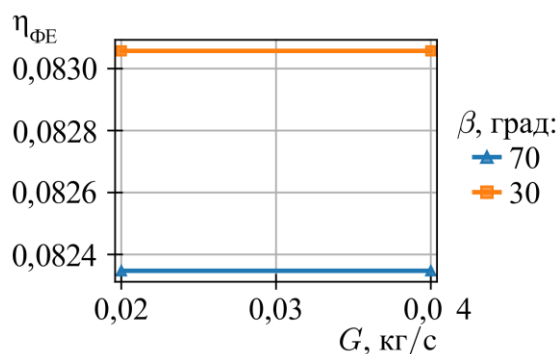


Рис. 12. Електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ залежно від масової витрати теплоносія G та кута його нахилу до горизонту β при $\alpha = 30^\circ$ та $I_m = 300 \text{ Вт/м}^2$

Джерело: розроблено авторами.

З рис. 12 випливає, що електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ не залежить від масової витрати теплоносія в ньому G та майже не залежить від кута нахилу ГТФГК до горизонту β , приблизно знаходячись від 0,082 до 0,083.

Електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$, що залежить від кута нахилу його до горизонту β , град, за питомої масової витрати теплоносія $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$, подана на рис. 13.

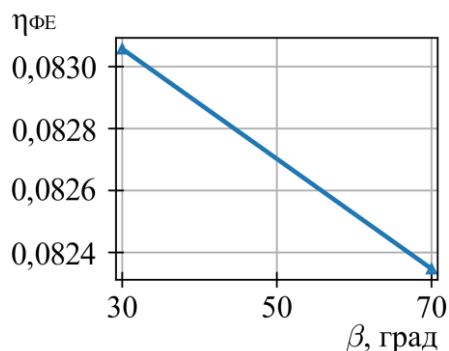


Рис. 13. Залежність електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ від кута нахилу його до горизонту β при $\alpha = 30^\circ$, $I_m = 300 \text{ Вт/м}^2$ та $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$

Джерело: розроблено авторами.

Як видно на рис. 13, електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ майже не залежить від кута нахилу ГТФГК до горизонту β , при зміні якого від 30° до 70° тільки на 1 % спадає.

Висновки. Для азимутального кута відхилення по нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α та кута нахилу ГТФГК до горизонту β рівних 30° , для розглянутих інтенсивностей сонячного випромінювання в його площині I_t зміна масової витрати теплоносія в геліосистемі G з $0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ до $0,02 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ не впливає на зміну теплової ефективності

ГТФГК $\eta_{\text{т, ГТФГК}}$, електричної ефективності його фотоелементів $\eta_{\text{ФЕ}}$ та теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ при $I_{\text{т}} = 700 \text{ Вт/м}^2$ (при $I_{\text{т}} = 300 \text{ Вт/м}^2$ ця ефективність $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ зростає на 5 %). При збільшенні $I_{\text{т}}$ з 300 Вт/м^2 до 700 Вт/м^2 $\eta_{\text{т, ГТФГК}}$ зменшується на 41 %, з 0,92 до 0,54, $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ зменшується на 39 %, з 0,8 до 0,49, для G з $0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ та на 42 %, з 0,84 до 0,49, для G з $0,02 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$. А ефективність $\eta_{\text{ФЕ}}$ при цьому збільшується на 2,4 %, з 0,083 до 0,085. Отже, інтенсивність сонячного випромінювання в площині ГТФГК $I_{\text{т}}$ є домінуючим фактором впливу на $\eta_{\text{т, ГТФГК}}$, $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ та $\eta_{\text{ФЕ}}$.

Для $\alpha = 30^\circ$ та $I_{\text{т}} = 300 \text{ Вт/м}^2$, при кутах нахилу ГТФГК до горизонту β рівних 30° та 70° збільшення G з $0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ до $0,02 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ майже не впливає (в межах 1 %) на зміну $\eta_{\text{т, ГТФГК}}$ та $\eta_{\text{ФЕ}}$. А $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ для $\beta = 30^\circ$ збільшується на 5 %, тоді як для $\beta = 70^\circ$ вона майже однакова. При збільшенні β з 30° до 70° для розглянутих G ефективності $\eta_{\text{т, ГТФГК}}$, $\eta_{\text{ФЕ}}$ зменшуються на 2 % та 1 % відповідно, $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ для $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ зростає на 2,5 %, з 0,8 до 0,82, а для $G = 0,02 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ на 2,5 % спадає, з 0,84 до 0,82. Отже, кут нахилу ГТФГК до горизонту β та питома масова витрата теплоносія в його контурі G незначно впливають на зміну $\eta_{\text{т, ГТФГК}}$, $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ та $\eta_{\text{ФЕ}}$.

Розроблена конструкція ГТФГК з концентраторами сонячного випромінювання незалежно від питомої маси теплоносія в контурі геліосистеми G демонструє пристойну електричну ефективність $\eta_{\text{ФЕ}}$ рівну $0,08 \div 0,09$, не сильно залежну від розглянутих в цій статті факторів, та високу теплову ефективність $\eta_{\text{т, ГТФГК}} = 0,8 \div 0,9$ при зменшенні інтенсивності сонячного випромінювання в його площині $I_{\text{т}}$ до 300 Вт/м^2 або кута нахилу ГТФГК до горизонту β до 30° , що характеризує його ефективну роботу в умовах недостатньої освітленості, включаючи регіони з високими широтами. Для збільшення $\eta_{\text{ФЕ}}$ з метою відведення тепла від фотоелементів необхідно надалі удосконалювати теплофотоелектричну частину ГТФГК та дослідити залежність $\eta_{\text{т, ГТФГК}}$, $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від інших значень (рівнів) факторів впливу на геліосистему в реальних умовах її експлуатації.

Список використаних джерел

1. United Nations. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1. Retrieved from <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>.
2. United Nations (2015). Paris Agreement. https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%2006-03%20PM/Ch_XXVII-7-d.pdf.
3. IPCC (2018). Global Warming of 1.5°C. Summary for Policymakers. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15_SPM_version_stand_alone_LR.pdf.
4. *The European Green Deal*. European Commission. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en.
5. The 2030 climate and energy framework. European Council Council of the European Union <https://www.consilium.europa.eu/en>.
6. Fit for 55. Retrieved from <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition>.
7. *REPowerEU*. (n.d.). European Commission. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en.
8. Venhryn, I., Shapoval, S., Voznyak, O., Datsko, O., & Gulai, B. (2021). Modelling of optical characteristics of the thermal photovoltaic hybrid solar collector. In *2021 IEEE 16th international conference on computer sciences and information technologies (CSIT)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/csit52700.2021.9648738>.

9. Mysak, Y., Pona, O., Shapoval, S., Kuznetsova, M., & Kovalenko, T. (2017). Evaluation of energy efficiency of solar roofing using mathematical and experimental research. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8 (87)), 26–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.103853>.
10. Guminilovych, R., Shapoval, P., Yatchyshyn, I., & Shapoval, S. (2015). Modeling of chemical surface deposition (CSD) of cds and cdse semiconductor thin films. *Chemistry & Chemical Technology*, 9(3), 287–292. <https://doi.org/10.23939/chcht09.03.287>.
11. Amira Lateef Abdullah, Suhaimi Misha, Noreffendy Tamaldin, Mohd Afzanizam Mohd Rosli, & Fadhil Abdulameer Sachit. (2024). Technology Progress on Photovoltaic Thermal (PVT) Systems with Flat-Plate Water Collector Designs: A Review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 59(1), 107–141. https://semarakilmu.com.my/journals/index.php/fluid_mechanics_thermal_sciences/article/view/3217.
12. Zhelykh, V., Venhryn, I., Kozak, K., & Shapoval, S. (2020). Solar collectors integrated into transparent facades. *Production Engineering Archives*, 26(3), 84–87. <https://doi.org/10.30657/pea.2020.26.17>.
13. Said, Z., Alshehhi, A. A., & Mehmood, A. (2018). Predictions of UAE's renewable energy mix in 2030. *Renewable Energy*, 118, 779–789. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.075>.
14. Diwania, S., Agrawal, S., Siddiqui, A. S., & Singh, S. (2019). Photovoltaic–thermal (PV/T) technology: A comprehensive review on applications and its advancement. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11(1), 33–54. <https://doi.org/10.1007/s40095-019-00327-y>.
15. Tripanagnostopoulos, Y. (2007). Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems. *Solar Energy*, 81(9), 1117–1131. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.04.002>.
16. Суржик, О. М. (2016). *Теплофізичні характеристики геліоенергетичних модулів з композиційними тепловідводами* [Неопубл. дис. ... канд. техн. наук]. Інститут Відновлюваної Енергетики.
17. Morteza pour, H., Ghobadian, B., Khoshtaghaza, & M. H., Minaei S. (2012). Performance analysis of a two-way hybrid photovoltaic/thermal solar collector. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14, 767–780.
18. 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. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10473.29280>.
19. Ramos, F., Cardoso, A., & Alcaso, A. (2010). Hybrid Photovoltaic-Thermal Collectors. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 314, 477–484. https://doi.org/10.1007/978-3-642-11628-5_53.
20. Склянюк, А., & Кучер, А. (2011). Дослідження роботи геліоустановки для спільної генерації електричної та теплової енергії. У *Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання* (с. 275). ТНТУ.
21. Mysak, S., Shapoval, S., & Matiko, H. (2023). Simulation of hybrid solar collector operation in heat supply system. *Energy Engineering and Control Systems*, 9(2), 61–68. <https://doi.org/10.23939/jeecs2023.02.061>.
22. 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*, Beirut, Lebanon, 1–11.

References

1. United Nations. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. *A/RES/70/1*. Retrieved from <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>.
2. United Nations (2015). Paris Agreement. Retrieved from https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%2006-03%20PM/Ch_XXVII-7-d.pdf.
3. IPCC (2018). Global Warming of 1.5°C. Summary for Policymakers. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15_SPM_version_stand_alone_LR.pdf.
4. European Commission. (2019). The European Green Deal: Striving to be the first climate-neutral continent. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en.

5. The 2030 climate and energy framework. Retrieved from <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/climate-change/2030-climate-and-energy-framework>.
6. Fit for 55. Retrieved from <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition>.
7. REPowerEU. (n.d.). *European Commission*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en.
8. 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, 255–258. <https://doi.org/10.1109/CSIT52700.2021.9648738>
9. Mysak, Y., Pona, O., Shapoval, S., Kuznetsova, M., Kovalenko, T. (2017) Evaluation of energy efficiency of solar roofing using mathematical and experimental research. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8-87), 26–32. doi: 10.15587/1729-4061.2017.103853.
10. 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.
11. Abdullah, A. L., Misha, S., Tamaldin, N., Rosli, M. A. M., Sachit, F. I. A. (2019). Technology Progress on Photovoltaic Thermal (PVT) Systems with Flat-Plate Water Collector Designs: A Review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 59(1), 107–141.
12. Zhelykh, V., Venhryn, I., Kozak, K., Shapoval, S. (2020). Solar collectors integrated into transparent facades. *Production Engineering Archives*, 26(3), 84–87. <https://doi.org/10.30657/pea.2020.26.17>. ISSN: 2353-5156.
13. 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
14. 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.
15. Tripanagnostopoulos, Y. (2007). Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems. *Solar Energy*, 81(9), 1117–1131. doi: 10.1016/j.solener.2007.04.002
16. Surzhyk, O. M. (2016). Teplofizychni kharakterystyky helioenergetychnykh moduliv z kompozytsiinymy teplovidvodamy [Heat physical characteristics of a solar power module with composite heat sink]. *Instytut Vidnovliuvanoi Enerhetyky Institute of Renewable Energy*, Kyiv
17. Morteza pour, H., Ghobadian, B., Khoshtaghaza, M. H., Minaei S. (2012). Performance analysis of a two-way hybrid photovoltaic/thermal solar collector. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14, 767–780.
18. 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
19. Ramos, F., Cardoso, A., Alcaso, A. (2010). Hybrid Photovoltaic-Thermal Collectors. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 314, 477–484. doi: 10.1007/978-3-642-11628-5_53.
20. Sklianko A., Kucher A. (2011) Doslidzhennia roboty helioustanovky dlia spilnoi heneratsii elektrichnoi ta teplovoi enerhii [Research on the operation of a solar installation for the combined generation of electricity and heat energy]. *U Pryrodnychi ta humanitarni nauky. Aktualni pytannia TNTU In Environmental and Humanitarian Sciences – Urgent issues* (p. 275). Ternopil Technical National University.
21. 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.
22. 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*, Beirut, Lebanon, 1–11.

Отримано 20.03.2025

Stepan Shapoval¹, Stepan Mysak²

¹Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: stepan.p.shapoval@lpnu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4985-0930>.

²PhD in Technical Sciences, Professor of the Department of Heating and Thermal Power
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: stepan.y.mysak@lpnu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2064-7015>.

THERMAL EFFICIENCY OF A HYBRID PHOTOVOLTAIC SOLAR COLLECTOR FOR ENERGY-EFFICIENT POWER SUPPLY SYSTEMS

In the article, topical issue of increasing efficiency of solar energy production thanks to the proposed design of the hybrid thermal photovoltaic solar collector (HTPSC) and converting it into electrical and thermal energy are considered.

It is shown that the proposed design provides stable and efficient energy supply even in low light conditions. Integration of this system into the energy system increases energy independence, reduces heating costs and reduces CO₂ emissions. Indeed, today it is important to fulfill international commitments to combat climate change on our planet. In accordance with provisions of the Paris Agreement, each country sets national goals to reduce greenhouse gas emissions that increase the environment temperature. This can be achieved by using energy from renewable energy sources instead of fossil fuels and increasing energy efficiency. In addition, according to the UN Sustainable Development Goals, renewable energy should be efficient, cheap and accessible to everyone.

That is why creation of improved hybrid solar collectors is an important step in the solar energy development. Integration of advanced technologies into these systems allows increasing productivity, reducing operating costs, ensuring reliability and making renewable energy more accessible and efficient for widespread use. The aim of the paper is to study and assess effectiveness of the proposed design of the HTPSC for maximum use of solar radiation. The main focus is on increasing thermal efficiency due to the use of solar concentrators and improving electrical efficiency due to intensified heat removal from photovoltaic cells. The compact and inexpensive design of the HTPSC using inexpensive materials and high thermal efficiency allows to successfully solve existing climate problems.

Operation of the hybrid-power-supply-system using a hybrid thermal photovoltaic solar collector is analyzed by simulating the thermal state of the HTPSC under influence of constant solar radiation to establish a quasi-stationary thermal regime of the system.

It was revealed that the developed design of the HTPSC with solar radiation concentrators, regardless of the specific mass of the coolant in the solar system circuit, demonstrates decent electrical efficiency equal to $0.08 \div 0.09$, not strongly dependent on factors considered in this article, and high thermal efficiency of $0.8 \div 0.9$ with decrease in the intensity of solar radiation in its plane to 300 W/m^2 or the angle of inclination of the HTPSC to the horizon β to 30 degrees, characterizing its effective operation in conditions of insufficient illumination, including regions with high latitudes.

Keywords: solar radiation; PV/T collector; solar hybrid system; thermal efficiency; electrical efficiency; photocell; solar concentrator.

Fig.: 13. References: 22.