

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-21>

УДК 620.97: 697.329

С. Й. Мисак, к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0003-2064-7015

С. П. Шаповал, д.т.н., проф.

ORCID: 0000-0003-4985-0930

Національний університет «Львівська політехніка»

e-mail: stepan.y.mysak@lpnu.ua

РОЗРОБЛЕННЯ ГІБРИДНОГО ТЕПЛОВОГО ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕЛІОКОЛЕКТОРА ТА АНАЛІЗ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ

Анотація. Статтю присвячено дослідженню ефективності гібридних теплових фотоелектричних геліоколекторів (ГТФГК), які поєднують функції теплових геліоколекторів і фотоелектричних панелей. Основною метою є розроблення конструктивних і технологічних рішень для максимально ефективного використання сонячної енергії. Досліджено вплив кута нахилу ГТФГК, питомої масової витрати теплоносія та азимутального кута відхилення на теплову й електричну ефективність системи. Проведено експериментальні вимірювання залежності ефективності від інтенсивності сонячного випромінювання. Виявлено, що правильний вибір параметрів дозволяє підвищити продуктивність запропонованої конструкції геліосистеми. Отримані результати підтверджують перспективність ГТФГК у сфері відновлюваної енергетики, сприяючи зниженню споживання викопного палива та екологічній стабільності.

Ключові слова: гібридний тепловий фотоелектричний геліоколектор, фотоелементи, тепловий акумулятор, сонячна енергія, відновлювальні джерела енергії.

Постановка проблеми. Основною науковою проблемою, що розглядається в дослідженні, є підвищення ефективності перетворення сонячної енергії в теплову та електричну за допомогою гібридних теплових фотоелектричних геліоколекторів (ГТФГК). Завдання полягає в розробленні оптимальних конструктивних і технологічних рішень, які забезпечать максимальне поглинання сонячної енергії та мінімізують енергетичні втрати. Це передбачає об'єднання теплових геліоколекторів і електричних сонячних панелей в єдину систему, застосування нових, сучасних матеріалів, оптимізацію теплоізоляції та теплообміну завдяки вдосконаленню конструкції ГТФГК. Розв'язання цієї проблеми сприятиме ефективнішому використанню чистої енергії з відновлюваних джерел, зменшенню викидів парникових газів завдяки скороченню споживання викопного палива, зробить такі системи та отримання з них енергії дешевшими і доступнішими для споживачів.

Аналіз останніх досліджень. Зміни клімату, що відбуваються в глобальному масштабі, а також прогнози провідних кліматичних організацій [1] наголошують на нагальній потребі скорочення шкідливих викидів і зменшення залежності від традиційних джерел енергії. Це змушує світове співтовариство впроваджувати заходи [2], спрямовані на екологічну стійкість і розвиток чистих технологій. Перехід на відновлювані джерела енергії є не просто бажаним, а критично необхідним для забезпечення збереження природних ресурсів та створення безпечного енергетичного майбутнього для наступних поколінь [3].

Сучасні наукові розробки демонструють значний прогрес у сфері гібридних сонячних систем, які перевершують традиційні фотоелектричні та теплові установки за коефіцієнтом корисної дії [4; 5]. Вивчення наукової літератури, присвяченої вдосконаленню конструктивних рішень та створенню інтегрованих енергетичних комплексів [6; 7], підтверджує перспективність комбінованих технологій у сонячній енергетиці [8]. Гібридні сонячні колектори поєднують

ють дві принципово важливі технології – фотоелектричну генерацію електроенергії [9; 10] та теплове перетворення сонячної енергії [11]. Це дозволяє досягти ефективного використання енергетичного потенціалу сонця, оптимізувати процеси поглинання випромінювання та мінімізувати енергетичні втрати.

Проте існує певне обмеження таких систем: як відомо, від 80% до 90% сонячної енергії поглинається поверхнею сонячних електричних панелей, але лише від 10% до 15% цієї поглинутої енергії перетворюється в електричну, а від 5% до 10% – у теплову. Це свідчить про значний невикористаний потенціал, який може бути реалізований шляхом використання інноваційних матеріалів, удосконалення конструктивних та технологічних рішень з метою підвищення ефективності теплообміну [12; 13]. Запропонованим підходом є впровадження спеціальних концентраторів, які посилюють тепловий вихід і сприяють ефективнішому використанню сонячної енергії [14].

Гібридні геліоколектори відіграють центральну роль у розвитку сонячної енергетики як ключового компонента у стратегії переходу на відновлювані джерела енергії. Вони сприяють стабілізації енергопостачання [15] та підвищенню адаптивності енергосистем до сезонних змін у попиті [16], зменшенню споживання викопного палива, зниженню рівня викидів CO₂ [17]. Розроблення та впровадження новітніх інтегрованих гібридних сонячних колекторів, які ефективно перетворюють сонячну енергію як у теплову [18; 19], так і в електричну форму, є стратегічно важливим напрямом досліджень, що забезпечить можливість використання таких систем у сучасних енергоефективних будівлях та сприятиме подоланню наявних кліматичних проблем.

Формулювання цілей статті. Головною метою дослідження є розроблення науково обґрунтованих методів підвищення ефективності використання сонячної енергії шляхом створення вдосконалених гібридних геліоколекторів. У межах цього дослідження запропоновано конструкцію, яка об'єднує теплові та фотоелектричні перетворювачі сонячної енергії в єдину систему, що забезпечує оптимальне співвідношення між виробництвом теплової та електричної енергії. Особлива увага приділяється покращенню, інтенсифікації теплообміну, оптимізації конструкції теплового модуля ГТФГК та вибору матеріалів, що забезпечують високий рівень енергетичної ефективності та екологічної безпеки.

У дослідженні було поставлено завдання вивчити вплив питомої масової витрати теплоносія в геліосистемі та кутів нахилу запропонованої конструкції ГТФГК на його теплову та електричну ефективність. Об'єктом дослідження є процес трансформації сонячного випромінювання в теплову енергію в геліосистемі, а предметом – ефективність роботи цього геліоколектора.

Основна частина. У дослідженні розглянуто функціонування гібридної енергетичної системи (ГСЕ) на основі гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК). Принципову схему цієї системи наведено на рисунку 1.

На рисунку 1 зображено гібридну систему енергопостачання (ГСЕ), що складається з гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК) та теплового акумулятора (ТА) 12, який виконує функцію накопичення тепла від поглинутого сонячного випромінювання. ГТФГК складається із двох модулів: теплофотоелектричного 2 і теплового 6. Теплова енергія циркулює між ГТФГК та ТА через трубопроводи, що транспортують нагрітий 10 та охолоджений 13 теплоносії.

Переміщення теплоносія, роль якого виконує вода, здійснюється за допомогою циркуляційного насоса 12, що транспортує нагріту рідину від ГТФГК до ТА, звідки тепло передається споживачам. Функціонування циркуляційного насоса автоматично контролюється контролером управління системою 14, який обробляє дані датчиків температури 9, установлених після ГТФГК та ТА.

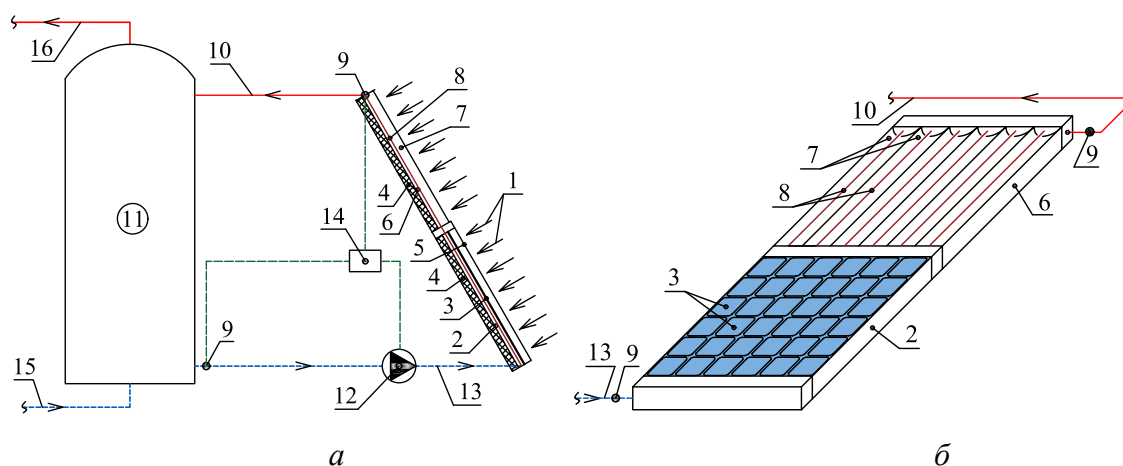


Рис. 1. Принципова схема ГСЕ з ГТФГК: а – вигляд збоку, б – вигляд зверху

1 – сонячне випромінювання; 2 – теплофотоелектричний модуль гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК); 3 – фотоелементи; 4 – утеплювач; 5 – світлопрозоре захисне покриття; 6 – тепловий модуль ГТФГК; 7 – концентратори сонячного випромінювання; 8 – теплопоглинальні трубки; 9 – датчики температури; 10, 13 – трубопроводи для нагрітого та охолодженого теплоносія; 11 – тепловий акумулятор (ТА); 12 – циркуляційний насос; 14 – контролер управління системою; 15, 16 – трубопроводи нагрітого та охолодженого теплоносія в системі споживача

Щоб підвищити ефективність роботи системи та мінімізувати тепловтрати, конструкція ГТФГК містить утеплювач 4 у теплофотоелектричному та тепловому модулі та концентратори сонячного випромінювання 7, які спрямовують сонячну енергію на теплопоглинальні трубки 8. Виробництво електроенергії здійснюється за допомогою фотоелементів 3, що отримують сонячне випромінювання крізь світлопрозоре захисне покриття 5.

Експериментальні дослідження системи проводилися за температури довкілля 15°C . ГТФГК був налаштований таким чином, щоб поглинальна площа його лицевої поверхні залишалася строго перпендикулярною до сонячних променів. Усі робочі параметри реєструвалися з інтервалом у 5 хвилин, при цьому масова витрата теплоносія залишалася незмінною.

Перші шість дослідів, залежності вихідних параметрів яких представлено на рисунках 2–7, проводилися за сталих значень азимутального кута нахилу ГТФГК до місцевого меридіана $\pm 30^{\circ}$ та питомої масової витрати теплоносія в його контурі $G = 0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Другі шість дослідів, зміни вихідних параметрів яких зображено на рисунках 8–13, проводилися за сталих значень кута нахилу ГТФГК до горизонту $\beta = 30^{\circ}$ та інтенсивності сонячного випромінювання в його площині $I_t = 300 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Графіки теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{т,ГТФГК}}$ залежно від інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_t , $\text{Вт}/\text{м}^2$, а також кута нахилу ГТФГК до горизонту β побудовано на рисунку 2.

З рисунка 2 випливає, що зміна кута нахилу ГТФГК до горизонту β не сильно впливає на його теплову ефективність $\eta_{\text{т,ГТФГК}}$, зменшуючи її на 0,02 за збільшення β з 30° до 70° , а збільшення інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_t з $300 \text{ Вт}/\text{м}^2$ до $700 \text{ Вт}/\text{м}^2$ зменшує $\eta_{\text{т,ГТФГК}}$ на 42%.

На рисунку 3 знаходяться графіки зміни теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{т,ГТФГК}}$ залежно від кута нахилу його до горизонту β та інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_t , $\text{Вт}/\text{м}^2$.

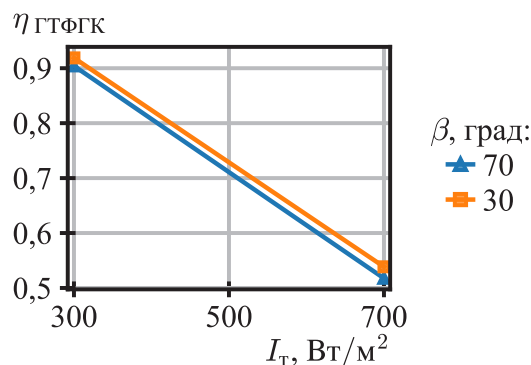


Рис. 2. Теплова ефективність ГТФГК $\eta_{T,GTFGK}$ залежно від інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T та кута нахилу ГТФГК до горизонту β за $\pm 30^\circ$, $G=0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

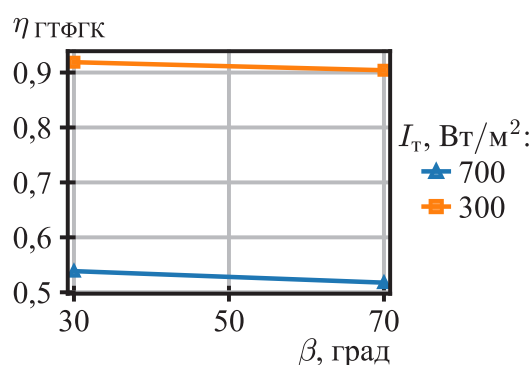


Рис. 3. Зміна теплової ефективності ГТФГК $\eta_{T,GTFGK}$ від кута нахилу його до горизонту β та інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T за $\pm 30^\circ$, $G=0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

На основі аналізу експериментальних даних, зображених на рисунку 3, виявлено зменшення на 0,02 теплової ефективності ГТФГК $\eta_{T,GTFGK}$ за збільшення кута його нахилу до горизонту β з 30° до 70° , при цьому зростання інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T з 300 W/m^2 до 700 W/m^2 зменшує $\eta_{T,GTFGK}$ на 42%.

Теплова ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{GSE \text{ з ГТФГК}}$, яка є функцією інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T , W/m^2 , та кута його нахилу до горизонту β зображена на рисунку 4.

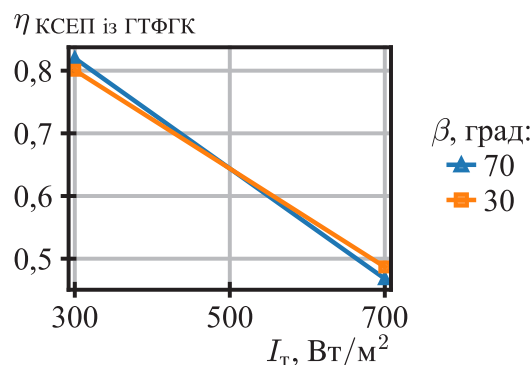


Рис. 4. Залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{GSE \text{ з ГТФГК}}$ від інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T та кута його нахилу до горизонту β за $\pm 30^\circ$, $G=0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

З рисунка 4 напрошується висновок, що зі збільшенням інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T з 300 Вт/м^2 до 700 Вт/м^2 теплова ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ зменшується на 39% при куті нахилу ГТФГК до горизонту β , рівному 30° , і на 43% за β дорівнює 70° . За значення I_T , рівного 500 Вт/м^2 , ефективність ГСЕ із ГТФГК не залежить від кута нахилу ГТФГК до горизонту і становить 0,64.

Зміна теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від кута нахилу ГТФГК до горизонту β та інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T , Вт/м^2 представлено на рисунку 5.

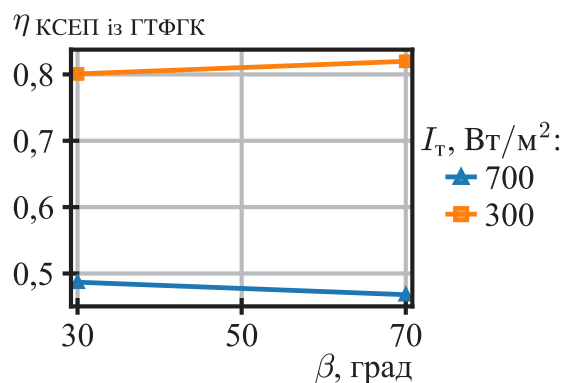


Рис. 5. Залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від кута нахилу ГТФГК до горизонту β та інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T за $\pm 30^\circ$, $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$

Згідно зі схемою (рис. 5), зі збільшенням кута нахилу ГТФГК до горизонту β теплова ефективність ГСЕ із ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ не сильно змінюється і спадає в разі збільшення інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T . Для I_T , що дорівнює 300 Вт/м^2 , $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ зростає на 2,5%, а для 700 Вт/м^2 – на 4,1% спадає.

Залежність електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ від інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T , Вт/м^2 та кута нахилу ГТФГК до горизонту β представлено на рисунку 6.

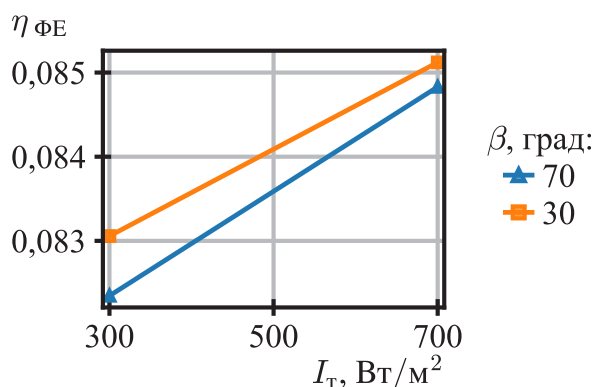


Рис. 6. Електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ залежно від інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T та кута нахилу ГТФГК до горизонту β за $\pm 30^\circ$ та $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$

З рисунка 6 видно, що зі збільшенням інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_t електрична ефективність його фотоелементів $\eta_{\text{ФЕ}}$ також зростає, а за збільшення кута нахилу ГТФГК до горизонту β – спадає. Для β дорівнює 30° $\eta_{\text{ФЕ}}$ збільшується на 2,4%, а для 70° – на 3,7%.

Електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$, що залежить від кута нахилу його до горизонту β та інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_t , Вт/м², побудована на рисунку 7.

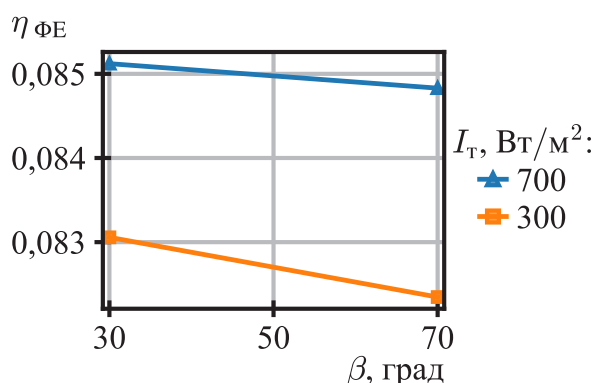


Рис. 7. Залежність електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ від кута нахилу його до горизонту β та інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_t за $\pm 30^\circ$, $G=0,01$ кг/(м²·с)

Як видно на рисунку 7, електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ трохи спадає (до 1%) за збільшення з 30° до 70° кута нахилу його до горизонту β і від 2,4% до 3,7% зростає в разі збільшення інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_t з 300 Вт/м² до 700 Вт/м².

Графіки теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{т,ГТФГК}}$ залежно від масової витрати теплоносія G , кг/с, та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ побудовано на рисунку 8.

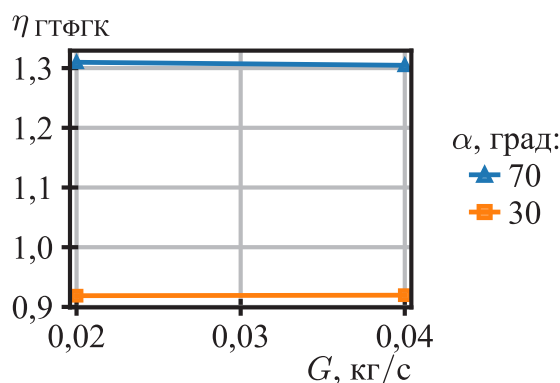


Рис. 8. Теплова ефективність ГТФГК $\eta_{\text{т,ГТФГК}}$ залежно від масової витрати теплоносія G та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ за $\beta=30^\circ$ та $I_t=300$ Вт/м²

Зі схеми на рис. 8 можна зробити висновок, що зміна масової витрати теплоносія в контурі ГТФГК G не впливає на значення його теплової ефективності $\eta_{\text{ГТФГК}}$, а збільшення азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm 30^\circ$ до 70° збільшує $\eta_{\text{ГТФГК}}$ на 42%.

Оскільки на зміну теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ не впливає зміна питомої масової витрати теплоносія в його контурі G , то на рисунку 9 знаходиться графік зміни $\eta_{\text{ГТФГК}}$ залежно від азимутального кута відхилення нормалі до нього від місцевого меридіана $\pm$, наприклад, для $G=0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

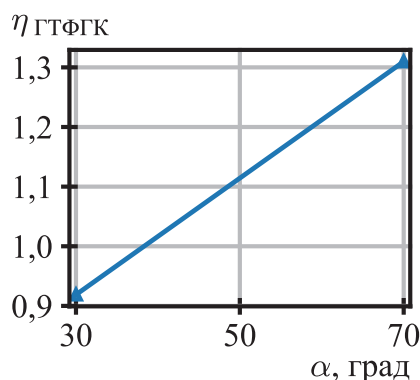


Рис. 9. Зміна теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ від азимутального кута відхилення нормалі до нього від місцевого меридіана $\pm$ за $G=0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, $\beta=30^\circ$ та $I_t=300 \text{ Вт}/\text{м}^2$

На основі аналізу експериментальних даних, що наведені на рисунку 9, виявлено зростання теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ на 42% за збільшення азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ від 30° до 70° .

На рисунку 10 зображено теплову ефективність ГСЕ із ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$, яка залежить від масової витрати теплоносія $G, \text{кг}/\text{с}$ та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$, град.

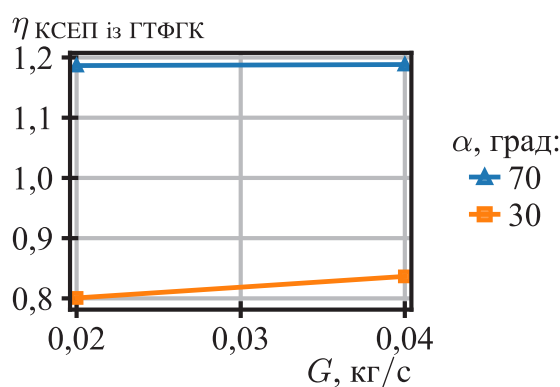


Рис. 10. Залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від масової витрати теплоносія G та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ за $\beta=30^\circ$ та $I_t=300 \text{ Вт}/\text{м}^2$

Згідно зі схемою на рис. 10, теплова ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ при азимутальному куті відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$, рівному 70° , не залежить від масової витрати теплоносія в системі G , а за $\pm$, рівному 30° , зростає на 5%.

Зміна теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$, та масової витрати теплоносія $G, \text{кг/с}$, наведена на рисунку 11.

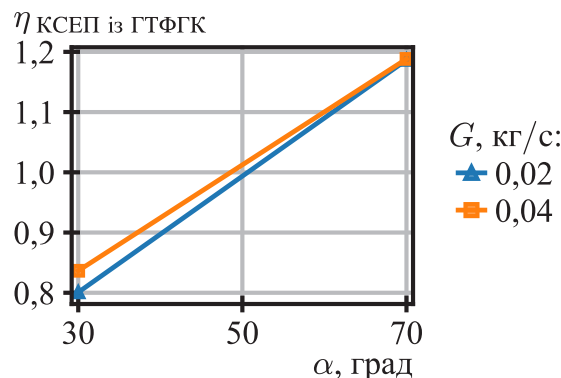


Рис. 11. Залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ та масової витрати теплоносія G за $\beta = 30^\circ$ та $I_T = 300 \text{ Вт/м}^2$

Як показано на рисунку 11, для питомої масової витрати теплоносія G , рівній $0.01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ та $0.012 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$, за збільшення азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ від 30° до 70° теплова ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ зростає на 48,7% та 41,7% відповідно.

На рисунку 12 представлено графіки зміни електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ від масової витрати теплоносія $G, \text{кг/с}$ та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$, град.

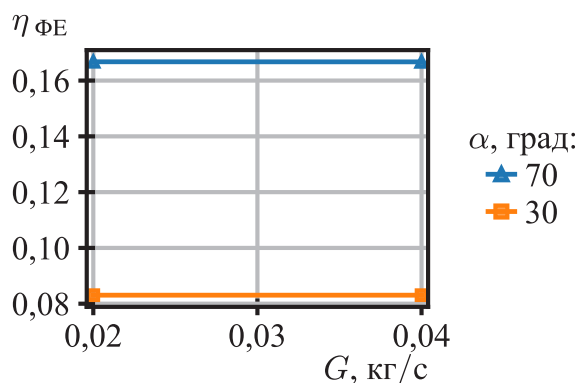


Рис. 12. Електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ залежно від масової витрати теплоносія G та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ за $\beta = 30^\circ$ та $I_T = 300 \text{ Вт/м}^2$

Згідно з графіком на рис. 12, електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ не залежить від масової витрати теплоносія в ньому G та збільшується вдвічі в разі збільшення азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ з 30° до 70° .

Електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$, що залежить від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ для $G=0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, представлена на рисунку 13.

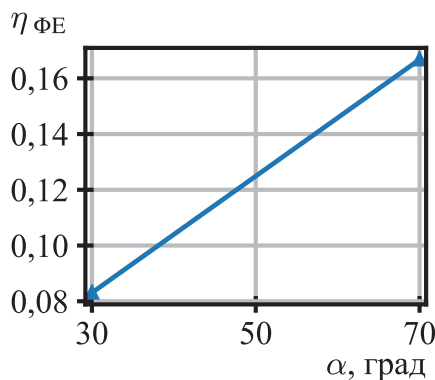


Рис. 13. Залежність електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ за $G=0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, $\beta=30^\circ$ та $I_t=300 \text{ Вт}/\text{м}^2$

Згідно зі схемою (рис. 13), електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ вдвічі зростає за збільшення азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ з 30° до 70° .

Висновки. Для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm=30^\circ$ та питомої масової витрати теплоносія в ньому $G=0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ збільшення кута нахилу ГТФГК до горизонту β з 30° до 70° призводить до зміни теплових його ефективностей $\eta_{t,\text{ГТФГК}}$ та $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ на 2–4% та електричної ефективності фотоелементів $\eta_{\text{ФЕ}}$ лише на 1% для інтенсивностей сонячного випромінювання в його площині I_t , рівних $300 \text{ Вт}/\text{м}^2$ та $700 \text{ Вт}/\text{м}^2$ відповідно. У разі збільшення I_t з $300 \text{ Вт}/\text{м}^2$ до $700 \text{ Вт}/\text{м}^2$ $\eta_{t,\text{ГТФГК}}$ та $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ зменшуються в середньому на 42%, а $\eta_{\text{ФЕ}}$, навпаки, збільшується на 2–4% для $\beta=30^\circ$ і $\beta=70^\circ$. Отже, інтенсивність сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_t є визначальним фактором впливу на $\eta_{t,\text{ГТФГК}}$, $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ та $\eta_{\text{ФЕ}}$.

Для $\beta=30^\circ$ та $I_t=300 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ефективності $\eta_{t,\text{ГТФГК}}$, $\eta_{\text{ФЕ}}$, для $\pm=30^\circ$ і $\pm=70^\circ$ не залежать від зміни питомої маси теплоносія в контурі ГТФГК G з $0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ до $0,02 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. За цієї зміни G і $\pm=70^\circ$ $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ також не змінюється, а для $\pm=30^\circ$ $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ – на 5% зростає. Однак у разі збільшення $\pm$ з 30° до 70° $\eta_{t,\text{ГТФГК}}$, $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ та $\eta_{\text{ФЕ}}$ також збільшуються на 42%, на 42–49% та у 2 рази відповідно. Отже, на відміну від питомої масової витрати G зміна азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ значно впливає на зміну $\eta_{t,\text{ГТФГК}}$, $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ та $\eta_{\text{ФЕ}}$.

Таким чином, дослідження демонструє високий потенціал гібридних геліоколекторів у контексті підвищення ефективності сонячної енергетики та її інтеграції в сучасні енергетичні системи.

Список використаних джерел

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 (date of access: 25.02.2025).
2. Paris Agreement. *United Nations*. URL: https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%2006-03%20PM/Ch_XX_VII-7-d.pdf (date of access: 25.02.2025).
3. 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> (date of access: 25.02.2025).
4. Abdullah A. L., Misha S., Tamaldin N., Rosli M. A. M., Sachit F. A. 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*. 2019. Vol. 59, no. 1. P. 107–141. ISSN 2289-7879.
5. Zhelykh V., Venhryn I., Kozak K., Shapoval S. Solar collectors integrated into transparent facades. *Production Engineering Archives*. 2020. Vol. 26, no. 3. P. 84–87. ISSN 2353-5156. URL: <https://doi.org/10.30657/pea.2020.26.17> (date of access: 25.02.2025).
6. 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: 25.02.2025).
7. 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).
8. Hamdan M. A., Abdelhafez E., Ahmad R., Alaboushi A. R., Eman A. Solar Thermal Hybrid Heating System. *Energy Sustainability and Water Resource Management for Food Security in the Arab Middle East*: conference, Beirut, Lebanon, Dec. 2014.
9. Zhelykh V., Venhryn I., Kozak K., Shapoval S. Solar collectors integrated into transparent facades. *Production Engineering Archives*. 2020. Vol. 26, no. 3, P. 84–87. URL: <https://doi.org/10.30657/pea.2020.26.17> (date of access: 25.02.2025).
10. Tripanagnostopoulos Y. Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems. *Solar Energy*. 2007. Vol. 81, no. 9. P. 1117–1131. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.04.002> (date of access: 25.02.2025).
11. Obstawski P., Bakon T., Czekalski D. Comparison of solar collector testing methods – theory and practice. *Processes*. 2020. No. 8, P. 1–29. URL: <https://doi.org/10.3390/pr8111340> (date of access: 25.02.2025).
12. Ramos F., Cardoso A., Alcaso A. Hybrid Photovoltaic-Thermal Collectors. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. 2010. Vol. 314. P. 477–484. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-11628-5_53 (date of access: 25.02.2025).
13. 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.
14. 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.
15. Ploskyi V., Sergeychuk O., Usenko V., Tereschuk M. Improving efficiency energy systems-photovoltaic modules and solar collectors in construction. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology*: conference, KhPI, Week 2022.
16. Sergeychuk O., Martynov V., Usenko D. The definition of the optimal energy-efficient form of the building. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018. Vol. 7, no 3. P. 667–671.
17. Shapoval S., Mysak S., Shapoval P., Matiko H. Analysis of Current Use of Renewable and Alternative Energy Sources by European Countries. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024. No. 438, P. 381–391.
18. Склянюк А., Кучер А. Дослідження роботи геліоустановки для спільної генерації електричної та теплової енергії. *Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання* : зб. матеріалів IV-ї Всеукр. студент. наук.-техн. конф., 19–20 квіт. 2011 р. Тернопіль : ТНТУ, 2011. Том 1. С. 275.
19. Суржик О.М. Теплофізичні характеристики геліоенергетичних модулів з композиційними тепловідводами : дис. ... канд. техн. наук. : 05.14.08. Київ, 2016. 159 с.

Стаття надійшла до редакції 28.03.2025 р.



S. Mysak, S. Shapoval
Lviv Polytechnic National University

DEVELOPMENT OF A HYBRID THERMAL PHOTOVOLTAIC SOLAR COLLECTOR AND ANALYSIS OF ITS EFFICIENCY

Summary

This paper investigates the efficiency of hybrid thermal photovoltaic solar collectors (HTPSC), which integrate the functions of thermal solar collectors and photovoltaic panels to maximize the conversion of solar energy into thermal and electrical forms. The study aims to develop optimal design and technological solutions that enhance energy absorption and minimize thermal losses. Experimental research focuses on evaluating the impact of key operational parameters, including the tilt angle of the HTPSC, the specific mass flow rate of the heat transfer fluid, and the azimuthal deviation angle, on the system's thermal and electrical performance.

The study analyzes the influence of solar radiation intensity on the efficiency of HTPSC, measuring variations in thermal and electrical energy conversion under different conditions. The results show that adjusting the tilt angle and optimizing the heat transfer process significantly improve energy utilization. Additionally, the integration of advanced heat exchange materials and solar concentrators has been tested to enhance overall system performance. The findings indicate that solar radiation intensity is a dominant factor affecting both thermal and electrical efficiency, while the azimuthal deviation of the collector normal to the local meridian significantly influences energy conversion rates.

Experimental data demonstrate that increasing the azimuthal deviation angle improves energy efficiency, whereas changes in the specific mass flow rate have a negligible effect. The study also confirms that hybrid solar collectors can effectively reduce dependency on fossil fuels and greenhouse gas emissions by increasing the share of renewable energy sources in modern energy systems. The results contribute to the advancement of solar energy applications, supporting the integration of high-efficiency hybrid systems in sustainable energy infrastructure.

By implementing optimized HTPSC configurations, energy systems can achieve greater adaptability to seasonal variations in solar radiation, ensuring stable power and heat generation. These findings reinforce the strategic importance of hybrid solar collector development in the transition toward eco-friendly and energy-efficient technologies, offering practical solutions for modern energy-efficient buildings and sustainable energy management.

Keywords: hybrid thermal photovoltaic solar collector, efficiency, photovoltaic cell, thermal accumulator, solar energy, renewable energy sources.