

С. П. ШАПОВАЛ

доктор технічних наук,
професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0000-0003-4985-0930

С. Й. МИСАК

кандидат технічних наук,
науковий співробітник кафедри автоматизації
та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0000-0003-2064-7015

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ГІБРИДНОГО ТЕПЛОВОГО-ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕЛІОКОЛЕКТОРА

У статті досліджується ефективність використання гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК) у системі теплопостачання. Головною метою роботи є аналіз основних параметрів, що визначають теплову ефективність гібридного геліоколектора, а також аналіз його конструкції для підвищення теплопродуктивності.

Розглянуто основні проблеми та виклики, пов'язані з використанням традиційних джерел енергії, а також необхідність переходу на відновлювані джерела відповідно до європейських екологічних ініціатив. Визначено, що сучасні фотоелектричні панелі перетворюють лише 15–20 % поглиненої сонячної енергії в електричну, а решта втрачається у вигляді тепла. Це вимагає розробки інноваційних рішень для підвищення загальної ефективності систем енергопостачання, зокрема вдосконалення гібридних геліоколекторів.

У рамках дослідження було проведено серію експериментів для аналізу впливу ключових факторів – інтенсивності сонячного випромінювання, кута нахилу геліоколектора та масової витрати теплоносія – на теплову та електричну ефективність ГТФГК. Отримані результати підтверджують, що зі збільшенням інтенсивності випромінювання теплова ефективність геліоколектора знижується. Виявлено, що застосування концентраторів сонячного випромінювання та наявність хорошої теплоізоляції сприяє зниженню теплових втрат і підвищенню коефіцієнта корисної дії системи.

На основі дослідження запропоновано конструктивні рішення для гібридних колекторів, що дозволяють підвищити ефективність перетворення сонячної енергії та забезпечити стабільніше енергопостачання. Використання таких технологій сприятиме зниженню залежності від викопного палива, зменшенню викидів парникових газів і досягненню цілей сталого розвитку.

Ключові слова: гібридний тепловий фотоелектричний геліоколектор; гібридна система енергопостачання, теплова ефективність, електрична ефективність, сонячне випромінювання, енергопостачання.

S. P. SHAPOVAL

Doctor of Technical Sciences,
Professor at the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0003-4985-0930

S. Y. MYSAK

Candidate of Technical Sciences,
Senior Lecturer at the Department of Heat and Power Engineering,
Thermal and Nuclear Power Plants
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0003-2064-7015

INVESTIGATION OF THE THERMAL EFFICIENCY OF A HYBRID THERMAL-PHOTOVOLTAIC SOLAR COLLECTOR

The article investigates the efficiency of using a hybrid thermal photovoltaic solar collector (HTPSC) in a heating system. The main objective of the study is to analyze the key parameters that determine the thermal efficiency of the hybrid solar collector, as well as to examine its design for enhancing thermal performance.

The study discusses the main challenges associated with the use of traditional energy sources and the necessity of transitioning to renewable energy in accordance with European environmental initiatives. It is determined that modern photovoltaic panels convert only 15–20 % of the absorbed solar energy into electricity, while the rest is lost as heat. This necessitates the development of innovative solutions to improve the overall efficiency of energy supply systems, particularly by enhancing hybrid solar collectors.

A series of experiments were conducted to analyze the impact of key factors—solar radiation intensity, collector tilt angle, and heat transfer fluid mass flow rate – on the thermal and electrical efficiency of the HTPSC. The results confirm that as radiation intensity increases, the thermal efficiency of the solar collector decreases. It was found that the use of solar radiation concentrators and effective thermal insulation helps to reduce heat losses and improve the system's overall efficiency.

Based on the research findings, structural solutions for hybrid collectors are proposed to enhance solar energy conversion efficiency and ensure more stable energy supply. The implementation of such technologies will contribute to reducing dependence on fossil fuels, lowering greenhouse gas emissions, and achieving sustainable development goals.

Key words: hybrid thermal photovoltaic solar collector; hybrid power supply system, thermal efficiency, electrical efficiency, solar radiation, energy supply.

Постановка проблеми

У рамках реалізації цілей European Green Deal [1], у 2019 р. країнами Європи було ухвалено пакет законодавчих норм «Clean energy for all Europeans package» [2]. Цей комплекс правил для впровадження в національне законодавство країн-членів ЄС став важливим кроком у виконанні “Energy Union Strategic Framework” [3], представленої ще у 2015 р. Однією з ключових цілей цього пакету є, крім визначеної в «The 2030 climate and energy framework» [4] мети скорочення викидів парникових газів (ПГ) мінімум на 40 % до 2030 р. та до 80–95 % до 2050 р. порівняно з рівнем 1990 р., підвищення енергоефективності та стимулювання використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Наприклад, згідно з Директивою ЄС 2018/2002 щодо енергетичної ефективності, до 2030 р. передбачено підвищення показників енергоефективності на понад 32,5 % від поточного рівня. Водночас, керуючись Директивою ЄС 2018/2001 про заохочення використання ВДЕ, поставлено завдання досягти 32 % частки відновлюваної енергії у валовому кінцевому споживанні до 2030 р. Управління цими процесами відбуватиметься відповідно до Регламенту ЄС 2018/1999 про Енергетичний союз і кліматичні дії через Інтегровані національні енергетичні та кліматичні плани на 2021–2030 рр., а також довгострокові Стратегії низьковуглецевого розвитку кожної країни-члена європейської спільноти.

У серпні 2021 р. було представлено новий пакет законодавчих ініціатив «Fit for 55» [5], спрямований на уточнення й перегляд існуючого законодавства країн ЄС, щоб забезпечити виконання цілей European Climate Law [6] і підтримати реалізацію European Green Deal. Крім зменшення кількості викидів ПГ, до ключових пропозицій належить збільшення частки виробництва енергії з ВДЕ до 40 % (замість попередніх 32 %) до 2030 р., скорочення первинного споживання енергії на 39–41 %, а кінцевого – на 36–37 %. Також заплановані реформи системи торгівлі викидами ЄС (EU ETS) та інші комплексні заходи для досягнення нових екологічних орієнтирів.

Унаслідок дестабілізації світового енергетичного ринку, Європейська комісія затвердила план REPowerEU [7]. Ця ініціатива спрямована на зменшення споживання енергії, розвиток чистої енергетики та диверсифікацію джерел енергопостачання з метою прискорення переходу на відновлювану енергію, підвищення енергетичної незалежності країн ЄС і скорочення залежності від імпорту викопного палива, особливо російського. Захід також спрямований на те, щоб агресор не міг використовувати енергоресурси як політичну або економічну зброю. У рамках цього плану передбачається поетапна відмова від російських видів викопного палива до 2030 р., поряд із вирішенням питань кліматичної кризи. До 2030 р. план REPowerEU включає наступні цілі: обов’язкове облаштування нових будівель сонячними панелями; надання рекомендацій щодо скорочення енергоспоживання та збільшення загальноєвропейської мети з енергоефективності з 9 % до 13 %; підвищення частки енергії з ВДЕ у валовому кінцевому енергоспоживанні до рівня 40–45 % завдяки активному розвитку вітрових та сонячних електростанцій; розширення виробництва біометану та розвиток низьковуглецевої водневої енергетики, що включає будівництво нових електролізерів. Цей захід дозволить виробляти 10 млн т. відновлюваного водню для промисловості та вирішити проблеми його транспортування і споживання.

Країни-члени ЄС мають врахувати ці цілі у своїх національних планах, розробивши політики для їх реалізації. Відповідно до European Climate Law, оновлені національні стратегії повинні бути подані на розгляд Єврокомісії до кінця червня 2023 р.

Головною метою цивілізованих країн залишається трансформація економіки задля мінімізації негативного впливу зміни клімату. Для цього необхідне вдосконалення державної політики, спрямованої на досягнення ухвалених ООН цілей сталого розвитку [8] та реалізацію вищеписаних стратегій. Також важливо створити правові та інституційні передумови для переходу до низьковуглецевої економіки із забезпеченням балансу між економічною, енергетичною та екологічною безпекою, а також підвищенням рівня життя громадян.

Довгий час економічний розвиток української держави характеризувався нераціональним використанням природних ресурсів і недбалим ставленням до оточуючого середовища. Це було значною перешкодою для досягнення

збалансованого й сталого розвитку, згідно [8]. Проте взяті на себе міжнародні зобов'язання, зміни в українському суспільстві та прагнення створити демократичну, конкурентоспроможну, з верховенством права державу, зумовили нову стратегічну мету. Зокрема, уряд України сьогодні стикається з амбітним завданням якнайшвидшого виконання положень Угоди про Асоціацію з ЄС. Захист довкілля та клімату, згідно Paris Agreement [9] – одні з головних пріоритетів у процесі переговорів щодо повноцінного членства країни в Євросоюзі. Попри збільшення викидів парникових газів і забруднюючих речовин через військову агресію північного сусіда [10], стратегія повоєнного відновлення орієнтована на створення чистого та безпечного довкілля, просування European Green Deal й розбудову економіки за принципами сталого розвитку.

Саме тому для розв'язання вищенаведених проблем сьогодні є дуже важливим розвиток ВДЕ, а саме сонячної енергетики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Завдяки актуальності вирішення екологічних проблем в рамках Paris Agreement рекомендується відмовлятися від традиційних вуглеводневих палив і переходити на відновлювальну енергетику. Особлива увага надається розвитку сонячної енергії, потужність генерації електричної та теплової енергії від якої прогнозується збільшити майже вдвічі до 2030 р. [11, 12]. Саме тому актуальним є вдосконалення існуючих та розроблення нових систем постачання сонячної енергії.

Найбільш поширеними типами сонячних колекторів є плоскі пластинчасті сонячні колектори, вакуумно-трубчасті сонячні колектори, а також гібридні системи фотоелектрично-теплових сонячних колекторів. Ці типи відрізняються за конструктивними особливостями, рівнем ефективності та методологіями тестування, які були детально розглянуті у попередніх дослідженнях [13]. Наприклад, для плоских сонячних колекторів характерною є відносно низька швидкість передачі тепла, що зумовлено невисоким коефіцієнтом конвективної теплопередачі між робочою рідиною та поверхнею поглинача. Підвищення ефективності таких колекторів може бути досягнуто шляхом розширення площі теплообміну, використання матеріалів із високою теплопровідністю, збільшення тривалості контакту повітря з теплообмінними елементами, створення турбулентності у потоці рідини або модифікації траєкторії її руху [13, 14].

У роботі [15] проаналізовано продуктивність і ефективність гібридного плоского сонячного колектора, оснащеного фазоперемінним матеріалом та радіатором. Результати дослідження свідчать, що такі колектори забезпечують триваліше виробництво гарячої води у вечірній час, а також характеризуються зниженою вихідною температурою вранці.

Енергетичні сектори провідних країн активно впроваджують гібридні фотоелектрично-теплові сонячні системи, які дозволяють отримувати тепло та електроенергію з єдиного джерела сонячного випромінювання. У традиційних рішеннях ці завдання виконуються окремими системами: тепловими сонячними колекторами та фотоелектричними панелями. Фотоелектричні панелі конвертують сонячне світло в електричну енергію, тоді як теплові колектори спрямовані на виробництво теплової енергії. Гібридні системи поєднують ці функції, забезпечуючи роботу виключно за рахунок сонячної енергії. Втім, попри очевидні переваги, їх впровадження супроводжується певними труднощами. Основними обмеженнями є нерівномірне охолодження, відносно низька ефективність, висока вартість обладнання, складність інтеграції з наявними даховими конструкціями, а також необхідність виділення значного простору для розміщення компонентів окремих систем [15, 16].

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є дослідження теплотехнічних характеристик розробленого гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК) та виявлення факторів, які покращують його теплову та фотоелектричну ефективність.

Викладення основного матеріалу дослідження

У статті розглянуто роботу комбінованої системи енергопостачання з гібридним тепловим фотоелектричним геліоколектором (ГСЕ з ГТФГК), принципова схема якої зображена на рис. 1.

На рис. 1 ГСЕ з ГТФГК складається з двох окремих блоків, а саме з гібридного теплового фотоелектричного колектора (ГТФГК), що містить теплофотоелектричну 2 і теплову частину 6, та теплового акумулятора (ТА) 11, які з'єднані між собою трубопроводами нагрітого 9 та охолодженого теплоносія 10. Циркуляція води, що служить теплоносієм в даній системі, відбувається за допомогою насоса 12, який переміщає поглинуту теплову енергію сонячного випромінювання 1 до ТА, а далі вона надходить до споживачів. Робота циркуляційного насоса керується блоком управління 13 на основі даних з термодатчиків 8 на виходах з ГТФГК та ТА. Для запобігання втратам тепла та підвищення теплової ефективності в конструкції ГТФГК передбачені теплоізолятор 3 та концентратори сонячного випромінювання 7. Установка виробляє електричну енергію завдяки фотоселементам 4, на які потрапляє сонячне випромінювання через світлопрозоре покриття 5.

Експериментальні дослідження функціонування геліосистеми здійснювалися за температури навколишнього повітря 15 °С. Площина ГТФГК була строго орієнтована перпендикулярно до напрямку сонячного випромінювання. Вхідні та вихідні параметри системи реєстрували через інтервали у 5 хвилин. Протягом усього періоду проведення кожного експерименту масова витрата теплоносія залишалася незмінною. Дослідження ГСЕ з ГТФГК проводились

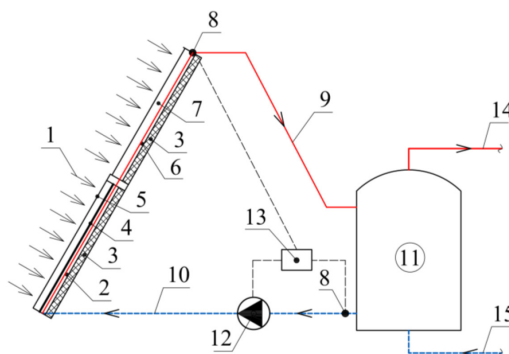


Рис. 1. Принципова схема дослідної ГСЕ з ГТФГК: 1 – джерело сонячного випромінювання; 2 – теплофотоелектрична частина гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК); 3 – теплоізолятор; 4 – фотоелементи; 5 – захисне скло; 6 – теплова частина ГТФГК; 7 – концентратори сонячного випромінювання; 8 – термодатчики; 9, 10 – трубопроводи нагрітого та охолодженого теплоносія; 11 – тепловий акумулятор (ТА); 12 – циркуляційний насос; 13 – блок управління; 14, 15 – трубопроводи нагрітого та охолодженого теплоносія в контурі споживача

за постійних кута нахилу ГТФГК до горизонту β та інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_m рівних 50° та 500 Вт/м^2 відповідно.

Теплова ефективність ГТФГК $\eta_{\text{м. ГТФГК}}$ в залежності від масової витрати G , кг/с , для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\alpha = 50^\circ$, зображена на рисунку рис. 2.

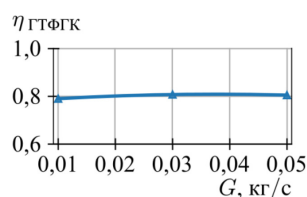


Рис. 2. Залежність теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{м. ГТФГК}}$ від масової витрати G при $\alpha = 50^\circ$, $\beta = 50^\circ$, $L_m = 500 \text{ Вт/м}^2$

Згідно рис. 2, для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α рівному 50° теплова ефективність ГТФГК $\eta_{\text{м. ГТФГК}}$ майже не залежить від масової витрати теплоносія в ньому G і знаходиться в межах від $0,79$ до $0,81$.

На рис. 3 на основі експериментальних досліджень зображена зміна теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{м. ГТФГК}}$, яка залежить від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α , град, для питомої масової витрати теплоносія $G = 0,015 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$

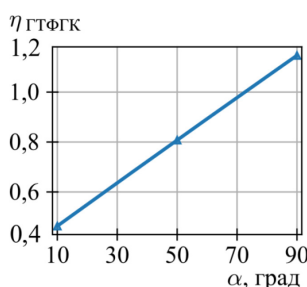


Рис. 3. Залежність теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{м. ГТФГК}}$ від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α при $G = 0,015 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$, $\beta = 50^\circ$, $L_m = 500 \text{ Вт/м}^2$

При питомій масовій витраті теплоносія G рівній $0,015 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$, теплова ефективність ГТФГК, графік якої зображений на рис. 3, рівномірно зростає на $0,2$ при збільшенні азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана на 23° : з $0,46$ при γ дорівнює 10° до $0,81$ при 50° , до $1,15$ при 90° , демонструючи загальне зростання в $2,5$ раза.

Графічна залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{ГСЕ з ГТФГК}$ від масової витрати теплоносія G , кг/с, для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\alpha = 50^\circ$, зображена на рисунку рис. 4.

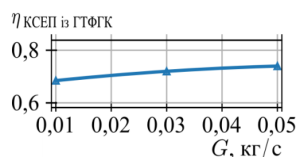


Рис. 4. Залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{ГСЕ з ГТФГК}$ від масової витрати теплоносія G при $\alpha = 50^\circ$, $\beta = 50^\circ$, $L_m = \text{Вт/м}^2$

Згідно рис. 4, при азимутальному куті відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α рівному 50° , тепла ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{ГСЕ з ГТФГК}$ повільно зростає від 0,67 при питомій масовій витраті теплоносія в установці $G = 0,005 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ до 0,71 при $G = 0,015 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ і до 0,73 при $G = 0,025 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$, загалом збільшившись на 9 %.

На рис. 5 зображено залежність зміни теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{ГСЕ з ГТФГК}$ від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α , град, для питомої масової витрати теплоносія $G = 0,015 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$.

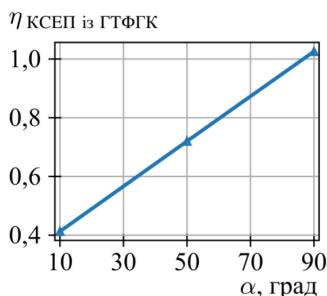


Рис. 5. Залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{ГСЕ з ГТФГК}$ від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α при $G = 0,015 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$, $\beta = 50^\circ$, $L_m = \text{Вт/м}^2$

З аналізу рис. 5, випливає, що для питомої масової витрати теплоносія G , що дорівнює $0,015 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$, зі зростанням азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α з 10° до 90° , тепла ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{ГСЕ з ГТФГК}$ рівномірно зростає на 0,15 через кожних 20° .

На основі експериментальних даних побудована графічна залежність електричної ефективності ГТФГК $\eta_{\Phi E}$ від масової витрати теплоносія G , кг/с, для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\alpha = 50^\circ$, яка зображена на рисунку рис. 6.

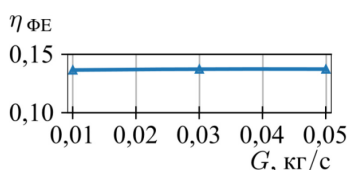


Рис. 6. Залежність електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\Phi E}$ від масової витрати теплоносія G при $\alpha = 50^\circ$, $\beta = 50^\circ$, $L_m = \text{Вт/м}^2$

Згідно рис. 6 для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α рівному 50° його електрична ефективність фотоелементів $\eta_{\Phi E}$ не залежить від масової витрати G , маючи постійне значення 0,137.

На рис. 7 побудована залежність електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\Phi E}$ від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α , град, для питомої масової витрати теплоносія $G = 0,015 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$.

З аналізу рис. 7 видно, що для питомої масової витрати теплоносія G , що дорівнює $0,015 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$, зі зростанням азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α електрична ефективність його фотоелементів $\eta_{\Phi E}$ інтенсивно зростає в 7,5 раза: в 5,7 раза – з 0,024 при 10° до 0,137 при 50° та ще на 30 % – до 0,179 при 90° .

Висновки

При куті нахилу ГТФГК до горизонту β рівному 50° та інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_m рівній 500 Вт/м^2 його тепла ефективність $\eta_{m, ГТФГК}$ майже не залежить від питомої масової витрати

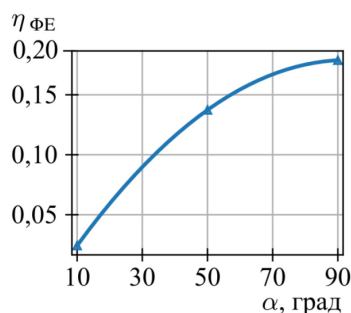


Рис. 7. Залежність електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α при $G = 0,015 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, $\beta = 50^\circ$, $L_m = \text{Вт}/\text{м}^2$

теплоносія в ньому G та у 2,5 разів рівномірно зростає при збільшенні кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α з 10° до 90° . Теплова ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ зростає на 9 % при збільшенні G у 5 разів, з $0,005 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ до $0,025 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, а при збільшенні α з 10° до 90° $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ зростає так само, як $\eta_{\text{м, ГТФГК}}$. Електрична ефективність ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ не залежить від розглянутих в статті значень G та в 5,7 разів інтенсивно зростає зі збільшенням α з 10° до 50° та ще на 30 % з його збільшенням до 90° .

Отже, на теплову $\eta_{\text{м, ГТФГК}}$ та електричну ефективність ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ майже не впливає зміна питомої масової витрати теплоносія в ньому G та в 7,5 разів ці ефективності збільшує зростання кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α з 10° до 90° .

Список використаної літератури

1. 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
2. Clean energy for all Europeans package. 2019. – https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package_en
3. Communication from the commission to the European Parliament, the council, the European economic and social committee, the committee of the regions and the European Investment Bank a framework strategy for a resilient energy union with a forward-looking climate change policy /* com/2015/080 final */. – <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2015:80:FIN>
4. The 2030 climate and energy framework. – <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/climate-change/2030-climate-and-energy-framework/>
5. Fit for 55. – <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition>
6. Establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No. 401/2009, and (EU) 2018/1999 (European Climate Law). June 30, 2021. – <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32021R1119>
7. European Commission. (2019). REPowerEU: affordable, secure and sustainable energy for Europe. – https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repower-eu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en
8. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1. United Nations. – <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>
9. Paris Agreement. United Nations, 2015. – https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%200603%20PM/Ch_XXVII-7-d.pdf
10. Міндовкілля: Війна росії проти України пришвидшує зміну клімату та спричиняє збільшення викидів парникових газів. – <https://www.kmu.gov.ua/news/mindovkillia-viina-rosii-proti-ukrainy-pryshvydshuie-zminu-klimatu-ta-sprychyniaie-zbilshennia-vykydiv-parnykovykh-gaziv>
11. Stec M., Grzebyk M. (2022) Statistical Analysis of the Level of Development of Renewable Energy Sources in the Countries of the European Union. *Energies*, 15, 1-18. <https://doi.org/10.3390/en15218278>
12. Cantarero M. M. V. (2020) Of renewable energy, energy democracy, and sustainable development: a roadmap to accelerate the energy transition in developing countries, *Energy Res. Social Sci.* 70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101716>
13. Obstawski P., Bakon T., Czekalski D. (2020) Comparison of solar collector testing methods – theory and practice, *Processes*, 8, 1–29. <https://doi.org/10.3390/pr8111340>
14. Algarni S. (2023) Evaluation and optimization of the performance and efficiency of a hybrid flat plate solar collector integrated with phase change material and heat sink. *Case Studies in Thermal Engineering*. 45. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102892>

15. Francesconi M., Antonelli M., Desideri U. (2023) Assessment of the optical efficiency in solar collectors: Experimental method for a concentrating solar power. *Thermal Science and Engineering Progress*, 40, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101740>

16. Hamdan M.A., Abdelhafez E., Ahmad R., Aboushi A.R. (2014) Solar Thermal Hybrid Heating System, Conference: Energy Sustainability and Water Resource Management for Food Security in the Arab Middle East, December 2014, Beirut, Lebanon, 1–11.

17. Abdelhafez E.A., Hamdan M.A., and. Al Aboushi A.R. (2016) Simulation of Solar Thermal Hybrid Heating System Using Neural Artificial Network. Conference: 8th International Ege Energy Symposium and Exhibition (IEESE-8), Afyonkarahisar, Turkey, May 2016, 1–6.

References

1. 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

2. Clean energy for all Europeans package. 2019. – https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package_en

3. Communication from the commission to the European Parliament, the council, the European economic and social committee, the committee of the regions and the European Investment Bank a framework strategy for a resilient energy union with a forward-looking climate change policy /* com/2015/080 final */. – <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2015:80:FIN>

4. The 2030 climate and energy framework. – <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/climate-change/2030-climate-and-energy-framework/>

5. Fit for 55. – <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition>

6. Establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No. 401/2009, and (EU) 2018/1999 (European Climate Law). June 30, 2021. – <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32021R1119>

7. European Commission. (2019). REPowerEU: affordable, secure and sustainable energy for Europe. – https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en

8. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1. United Nations. – <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>

9. Paris Agreement. United Nations, 2015. – https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%200603%20PM/Ch_XXVII-7-d.pdf

10. Russia's War against Ukraine Accelerates Climate Change and Increases Greenhouse Gas Emissions. – <https://www.kmu.gov.ua/news/mindovkillia-viina-rosii-proti-ukrainy-pryshvydshuie-zminu-klimatu-ta-sprychyniaie-zbilshennia-vykydiv-parnykovykh-haziv>

11. Stec M., Grzebyk M. (2022) Statistical Analysis of the Level of Development of Renewable Energy Sources in the Countries of the European Union. *Energies*, 15, 1–18. <https://doi.org/10.3390/en15218278>

12. Cantarero M.M.V. (2020) Of renewable energy, energy democracy, and sustainable development: a roadmap to accelerate the energy transition in developing countries, *Energy Res. Social Sci.* 70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101716>

13. Obstawski P., Bakon T., Czekalski D. (2020) Comparison of solar collector testing methods – theory and practice, *Processes*, 8, 1–29. <https://doi.org/10.3390/pr8111340>

14. Algarni S. (2023) Evaluation and optimization of the performance and efficiency of a hybrid flat plate solar collector integrated with phase change material and heat sink. *Case Studies in Thermal Engineering*. 45. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102892>

15. Francesconi M., Antonelli M., Desideri U. (2023) Assessment of the optical efficiency in solar collectors: Experimental method for a concentrating solar power. *Thermal Science and Engineering Progress*, 40, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101740>

16. Hamdan M.A., Abdelhafez E., Ahmad R., Aboushi A.R. (2014) Solar Thermal Hybrid Heating System, Conference: Energy Sustainability and Water Resource Management for Food Security in the Arab Middle East, December 2014, Beirut, Lebanon, 1–11.

17. Abdelhafez E.A., Hamdan M.A., and. Al Aboushi A.R. (2016) Simulation of Solar Thermal Hybrid Heating System Using Neural Artificial Network. Conference: 8th International Ege Energy Symposium and Exhibition (IEESE-8), Afyonkarahisar, Turkey, May 2016, 1–6.