

**Степан Петрович Шаповал<sup>1</sup>, Юрій Васильович Пришляк<sup>2</sup>, Богдан Іванович Гулай<sup>3</sup>,  
Микола Петрович Генсецький<sup>4</sup>, Мар'яна Євгенівна Касинець<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор кафедри теплогазопостачання та вентиляції

Національний університет "Львівська політехніка" (Львів, Україна)

E-mail: [stepan.p.shapoval@lpnu.ua](mailto:stepan.p.shapoval@lpnu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4985-0930>. ResearcherID: [S-3421-2017](https://orcid.org/S-3421-2017)

<sup>2</sup>аспірант кафедри теплогазопостачання та вентиляції

Національний університет "Львівська політехніка" (Львів, Україна)

E-mail: [yurii.v.pryshliak@lpnu.ua](mailto:yurii.v.pryshliak@lpnu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0511-2568>. ResearcherID: [LGZ-2116-2024](https://orcid.org/LGZ-2116-2024)

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання та вентиляції

Національний університет "Львівська політехніка" (Львів, Україна)

E-mail: [bogdan.i.gulai@lpnu.ua](mailto:bogdan.i.gulai@lpnu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6951-6994>. ResearcherID: [V-7301-2017](https://orcid.org/V-7301-2017)

<sup>4</sup>кандидат технічних наук, доцент

ВСП "Техніко-економічний коледж Національного університету "Львівська політехніка" (Львів, Україна)

E-mail: [gens2005@ukr.net](mailto:gens2005@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0460-8131>. ResearcherID: [LGZ-8263-2024](https://orcid.org/LGZ-8263-2024)

<sup>5</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання та вентиляції

Національний університет "Львівська політехніка" (Львів, Україна)

E-mail: [mariana.y.kasynets@lpnu.ua](mailto:mariana.y.kasynets@lpnu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7686-7482>. ResearcherID: [V-7536-2017](https://orcid.org/V-7536-2017)

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ГІБРИДНІ СОНЯЧНІ КОЛЕКТОРИ  
ІНТЕГРОВАНІ У СВІТЛОПРОЗОРИ КОНСТРУКЦІЇ БУДІВЕЛЬ**

Одним із ключових завдань в сучасній енергетиці є забезпечення теплом енергоефективних будівель за допомогою відроджуваних джерел енергії, зокрема сонячної енергії. Через обмежений простір для розміщення геліоколекторів на будівлях, перспективною є інтеграція сонячних систем теплопостачання в конструкції зовнішніх огорожень будівель. У цій статті розглянуто наукові аспекти застосування основних типів сонячних колекторів, а також їх класифікацію. Авторами запропонована конструкція гібридного теплового та фотоелектричного сонячного колектора й подана методика розрахунку теплових характеристик системи теплопостачання з використанням такого геліоколектора. У статті наведено аналіз розрахунку теплових процесів у гібридних сонячних колекторах, які інтегровані у світлопрозорі фасади будівель і споруд. Тут особливо увага зосереджена на визначенні коефіцієнта корисної дії такого пристрою. Дані, представлені у статті, показують, що математична модель процесів теплообміну в гібридному геліоколекторі потребує додаткових експериментальних досліджень.

**Ключові слова:** сонячна енергія; геліоколектор; гібридний сонячний колектор; фотоелектричний сонячний колектор; тепла продуктивність; геліосистема.

Рис.: 2. Бібл.: 24.

**Актуальність теми дослідження.** На сьогодні дедалі більшого поширення набувають системи сонячного енергопостачання, зокрема гібридні геліоколектори, які конструктивно поєднують у собі два типи – фотоелектричні та теплові. Це дозволяє максимально використовувати сонячне випромінювання, перетворюючи його одночасно в одній установці як в електричну, так і теплову енергію. Особливо це актуально за обмеженої площі для встановлення таких систем. Гібридні геліоколектори можуть працювати ефективно за різних умов - включаючи хмарні дні, ранкову та вечірню дифузію сонячного світла, що забезпечує більшу стабільність в енергопостачанні порівняно з традиційними сонячними енергетичними системами. Використання гібридних геліоколекторів сприяє створенню стабільних і незалежних від зовнішніх факторів систем енергопостачання. Це особливо важливо в умовах збільшення змін клімату та нестабільності в енергетичному секторі, а також забруднення навколишнього середовища.

Гібридні сонячні системи майже не завдають шкоди навколишньому середовищу, оскільки вони використовують безкоштовну та екологічну сонячну енергію. Це призводить до зменшення викидів CO<sub>2</sub> та інших шкідливих речовин в атмосферу, сприяючи збереженню природних ресурсів та зменшенню впливу на зміну клімату. Також впровадження гібридних геліоколекторів може призвести до суттєвого зниження енерговитрат на теплопостачання будівель та збільшення енергетичної незалежності, що стає привабливим для підприємств, громадських установ та приватних осіб.

**Постановка проблеми.** Для проектування систем сонячного теплопостачання з гібридними сонячними колекторами необхідно вживати заходів для широкого впровадження таких систем. Тому важливим є розроблення відповідних конструкцій та проведення досліджень теплофізичних характеристик, щоб максимально забезпечити ефективне використання гібридних сонячних систем і досягти економічності та максимальної ефективності в їх експлуатації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Гібридні геліосистеми, що поєднують фотоелектричні та теплові компоненти, нині є предметом значного наукового інтересу через їхню високу ефективність для виробництва як електричної, так і теплової енергії. Аналіз останніх публікацій дає змогу оцінити сучасний стан досліджень у цій галузі та визначити напрями для подальших розробок.

У роботі [1] наведено, що пасивне використання сонячної енергії в архітектурних формах споруд має важливе значення для проектування енергоефективних будівель. У праці [2] зазначено, що для максимального відбору сонячної енергії в умовах обмеженого простору вивчення інтеграції геліосистем у світлопрозорі конструкції будівель є одним з найважливіших підходів у геліотехніці. На даний час існує багато напрацювань використання елементів зовнішніх захищень будівель в якості складових гібридних сонячних систем. Основні з них це геліюпокрівля, геліостіна та геліовікно [3]. Для підвищення ефективності систем сонячного теплопостачання активно застосовують спеціальні гібридні електричні та теплові сонячні приймачі [4]. Одночасно вивчаються їхня структура й особливості для запобігання перегріву та підвищення продуктивності [5]. Окреме місце посідають дослідження різноманітних систем теплозабезпечення на основі гібридних сонячних колекторів. Дані дослідження спрямовані на визначення основних переваг і недоліків використання таких геліоколекторів для енергоефективних будівель [6; 7].

У роботі [8] представлено, що для покращення теплопередачі в гібридних системах окремо досліджені конструктивні особливості та основні теплові характеристики термосифонних сонячних колекторів. Подібні дані наводяться в [9], де досліджуються колектори на основі алюмінієвих канавчатих теплових труб. Відомі геліонагрівники, які інтегровані в скляні фасади будівель. Такі гібридні сонячні колектори містять у своїй конструкції електричні фотопанелі та оребрені трубки, в яких циркулює рідинний теплоносій [10]. У праці [11] наведено дані, що поряд із традиційними матеріалами існують геліоколектори, де абсорбер виготовлений з гофрованого вуглеграфітового трикотажного полотна, яке може бути застосовано в гібридних системах.

Дослідження низько потенціальних енергетичних систем є основним рушієм підвищення ефективності геліосистем загалом [12]. Науковці у своїй праці [13] показують щорічний прогрес технологій використання фотоелектричних теплових колекторів із плоскими водяними збірниками, підкреслюючи їхню ефективність. Сьогодні є вже цілі стратегії стійкого впровадження сонячних іригаційних насосів, адаптованих для роботи з гібридними геліосистемами, які відображені в роботі [14]. Особливу увагу відведено екологічній складовій при використанні гібридних сонячних колекторів як покриття будівель [15]. Також у джерелах [16; 17] наведено дані про проведення безліч предметних оцінок ресурсного потенціалу сонячної електро- та теплоенергетики для модернізації систем теплопостачання населених пунктів України.

Огляд літератури показав значний прогрес у розробці гібридних геліосистем та їх інтеграції в архітектурні конструкції будівель. Подальші дослідження мають бути спрямовані на покращення теплових і електричних характеристик таких систем, а також на оптимізацію їхніх конструктивних рішень для підвищення ефективності та зменшення витрат на енергію.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Аналіз останніх публікацій та досліджень показав, що питання вибору та проектування вищезгаданих гібридних геліоколекторів на сьогодні є обмеженим, оскільки такі системи мало досліджені. Особливо немає вичерпних даних, щодо теплотехнічних характеристик таких систем, а також актуальних методик їх розрахунку.

**Метою статті** є розробка та формування методики розрахунку теплових характеристик запропонованої конструкції гібридного геліоколектора.

**Виклад основного матеріалу.** Сьогодні сфера геліоенергетики стрімко розвивається та створюються нові види та типи сонячних колекторів. На основі аналізу відповідних праць [18; 19; 20] було систематизовано класифікацію сонячних колекторів (рис. 1).

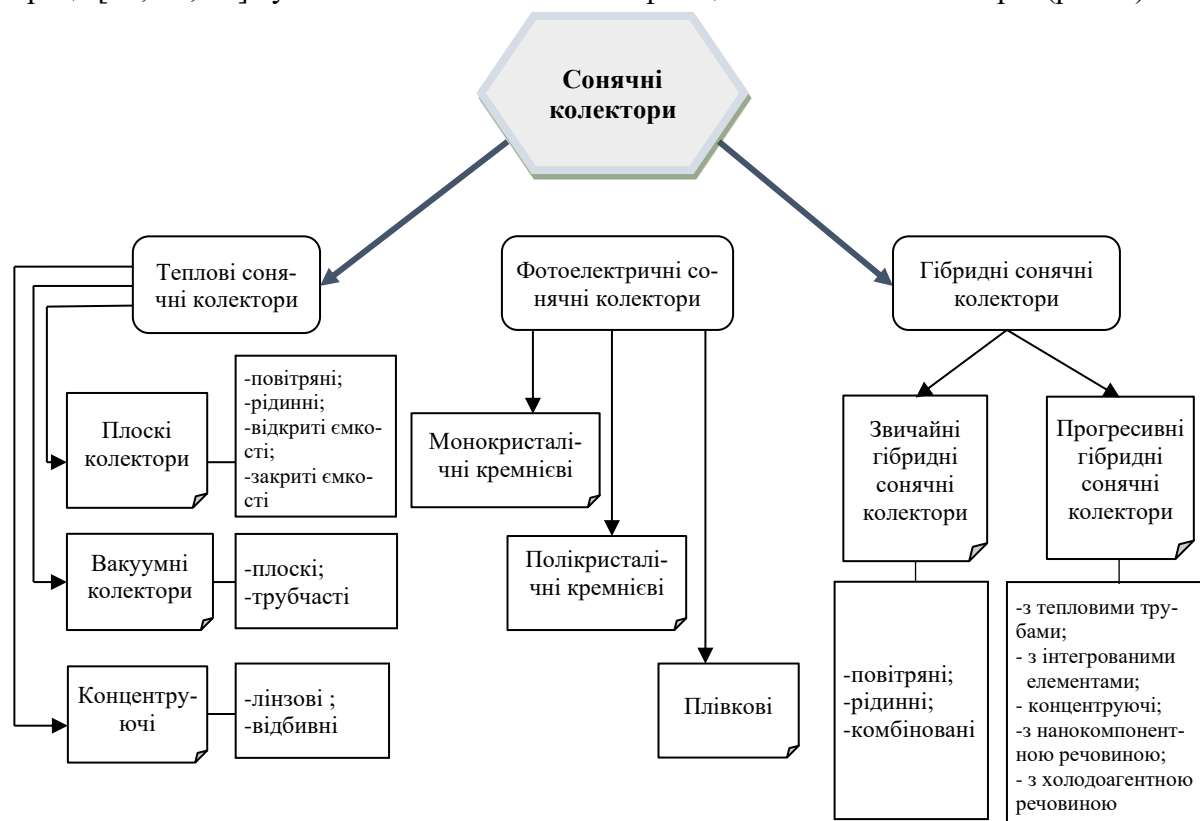


Рис. 1. Узагальнена класифікація сонячних колекторів

Джерело: розроблено авторами.

На основі огляду літературних джерел [21; 22] та даних з рис. 1 можна побачити, що на сьогодні з'явився новий тип сонячних колекторів, а саме – гібридні геліоколектори, які активно розвиваються та набувають широкого вжитку. Наведені дані вказують, що системи з такими сонячними колекторами можуть водночас здійснювати генерацію, як електричної так і теплової енергії. Це, в свою чергу, дозволяє кінцевому споживачу обирати пріоритетність того чи іншого рішення. Ці характеристики можна використати в єдиному схемному рішенні, якщо поєднати в одну конструкцію фотоелектричний і тепловий сонячний колектор. До того ж, враховуючи зростаючу популярність скляних світлопрозорих фасадів на будівлях, є можливість інтегрувати гібридні геліоколектори з такими фасадами.

Для вирішення поставленого завдання, в галузі енергоефективного будівництва, оптимальним рішенням є тепловий та фотоелектричний гібридний сонячний колектор. З метою дослідження теплових- та електричних характеристик запропонованої конструкції розроблено модель гібридного сонячного колектора (рис. 2). Ця модель на етапі теоретичних досліджень сприятиме ефективному вирішенню ряду задач, перед практичним

застосуванням. На рис. 2 наведено схему теплового фотоелектричного гібридного сонячного колектора, конструкція якого містить вертикальні ролети з ламелями, на які закріплено фотоелектричні елементи.

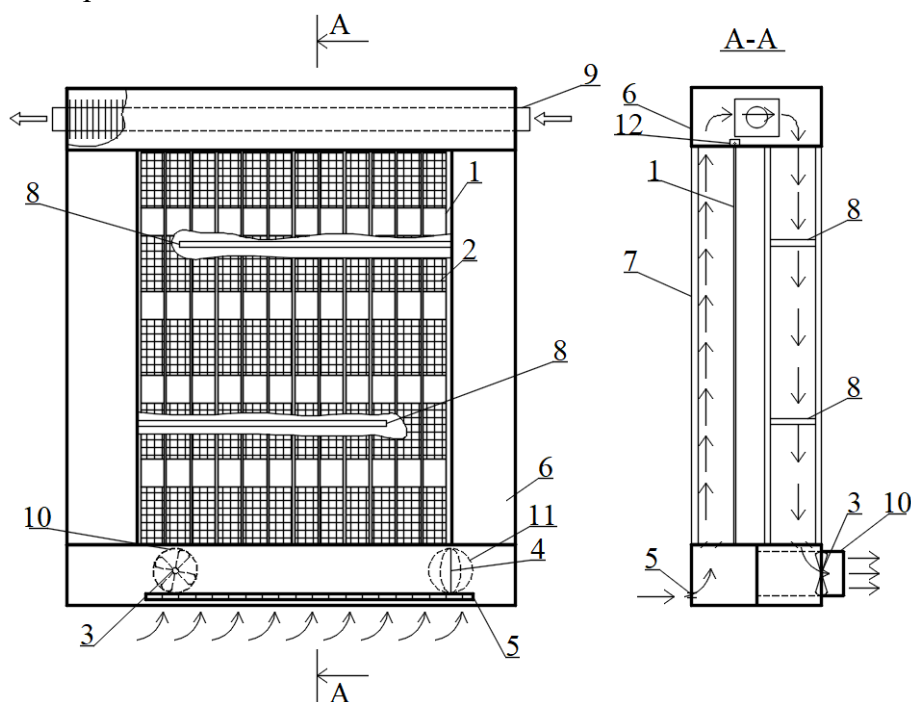


Рис. 2. Гібридний геліоколектор

- 1 – ламелі, 2 – фотоелектричні модулі, 3 – вентилятор, 4 – повітряний клапан,  
 5 – решітка щілинного типу, 6 – корпус, 7 – енергозберігаючі склопакети,  
 8 – скляні поперечні неповні перегородки, 9 – теплообмінник, 10 – вхідний патрубок,  
 11 – вихідний патрубок, 12 – механізм повороту.

Джерело: розроблено авторами.

Гібридний геліоколектор працює таким чином: сонячне випромінювання проходить крізь енергозберігаючі склопакети 7 та потрапляє на ламелі 1, що мають можливість повороту навколо своєї осі, на поверхні яких розміщені фотоелектричні модулі 2, які в подальшому перетворюють сонячну енергію в електричну для живлення вентилятора 3 та для потреб споживача, одночасно сонячне випромінювання нагріває корпус скляного фасаду будівлі 6, в якому розміщено теплообмінник з теплоносієм 9. Завдяки вбудованому вентилятору 3 нагріте повітря через вихідний та вхідний патрубки циркулює між шибками склопакету 7 та між скляними перегородками 8, а за допомогою решітки щілинного типу 5 та повітряному клапану 4 є можливість вибору режиму роботи: із забором свіжого повітря чи без. Поворотний механізм 12 застосовують для руху фотоелектричних модулів 2 навколо своєї осі та забору ламелей 1, тим самим регулюючи надходження сонячного випромінювання безпосередньо в приміщення.

Якщо говорити про світлопрозорі фасади, то дані елементи виконуватимуть функцію штор. Для житлових будівель є рекомендація, що частка звичайного засклення повинна бути не більше ніж 18 %, а для громадських будівель – 25 % залежно від архітектурно-кліматичної зони. Але фактично даний показник переважно перевищений, що вимагає обов'язкового застосування сонцезахисних конструкцій. Також ролети з ламелями додатково можуть захищати приміщення в будівлях, до яких немає особливих нормативних вимог щодо інсоляції. Вибір напрямку влаштування фотоелементів та їхній розмір для

конструкції гібридного сонячного колектора розраховується згідно геометричних параметрів, які встановлюються за комплексними картами сонячної активності. Під час вибору сонячного колектора важливо звертати увагу на відповідність ключовим показникам якості: безпека, продуктивність та ефективність. Крім того, слід враховувати загальну площу колектора та температурні параметри. Ці характеристики можна визначити за допомогою методик розрахунку теплових і електричних сонячних колекторів.

Методики випробування сонячних колекторів засновані на використанні різних математичних моделей, що враховують міжнародні стандарти тестування та умови отримання сонячної енергії. При виборі методів випробування дотримуються стандартів ISO. В Україні ці випробування проводяться відповідно до вимог ДСТУ. Щоб дослідити ту чи іншу конструкцію геліоколекторів використовують як натурні, так і лабораторні способи досліджень, які в свою чергу бувають стаціонарні та нестаціонарні.

Лабораторні дослідження можуть проводитися з використанням імітаторів сонячного випромінювання або без них. У разі відсутності такого імітатора, геліоколектор розглядається, як звичайний теплообмінний пристрій, досліджений у роботі [23]. Під час лабораторних випробувань не враховуються зміни метеорологічних умов. Водночас натурні дослідження супроводжуються неконтрольованими факторами, зумовленими метеозмінами довкілля. Тому лабораторні випробування застосовуються для визначення загального коефіцієнта теплових втрат у колекторі, а натурні – для оцінки його оптичних характеристик.

Коефіцієнт корисної дії теплового сонячного колектора визначають за формулою:

$$\eta_{ТСК} = \eta_0 - U_{\text{конв}} \cdot X - U_{\text{випром}} \cdot I_e \cdot X^2, \quad (1)$$

де  $\eta_0$  – ступінь ефективності геліоколектора коли тепловтрати відсутні;  $U_{\text{конв}}$  і  $U_{\text{випром}}$  – коефіцієнти тепловтрат конвекцією та випромінюванням відповідно, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $I_e$  – інтенсивність сонячного випромінювання, Вт/м<sup>2</sup>;  $X$  – відношення різниці температур між сонцепоглинаючою поверхнею сонячного колектора  $t_{СПП}$ , C і зовнішньою температурою  $t_z$ , °C, до величини  $I_e$ , (м<sup>2</sup>·°C)/Вт.

Для порівняння різного типу, виду й конструкцій геліоколекторів застосовують так званий  $f$ -метод розрахунку системи сонячного теплозабезпечення [24]. Цей метод базується на даних тривалих спостережень з використанням математичної моделі для побудови рівнянь регресії, які описують залежність  $f$ -методу від значень двох безрозмірних комплексів. Першим таким є  $x$ -комплекс. Показує відношення втрат тепла сонячним колектором протягом місяця дотримуючись значення певної фіксованої (базової) температури до теплового навантаження за місяць (2):

$$x = \frac{A \cdot f_R \cdot k_{СПП-Д} \cdot (t_{\text{баз}} - t_{\text{н.сер}}^{\text{міс}}) \cdot \Delta \tau}{J_{\text{н.сер}}^{\text{міс}}}, \quad (2)$$

де  $A$  – площа адсорбера (сонцесприймаючої поверхні) геліоколектора, м<sup>2</sup>,  $k_{СПП-Д}$  – коефіцієнт теплопередачі між сонцесприймаючою поверхнею та оточуючим середовищем, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $t_{\text{баз}}$  – базова температура, °C;  $t_{\text{н.сер}}^{\text{міс}}$  – температура навколишнього середовища протягом місяця, °C;  $\Delta \tau$  – час роботи геліоколектора за місяць, с. Формула (2) є доцільною для теплових сонячних колекторів, в яких теплоносієм є повітря.

$y$ -комплекс – це другий комплекс. Він відображає, як поглинута сонячна радіація відноситься до теплового навантаження за певний визначений проміжок часу:

$$y = \frac{A \cdot f_R \cdot (\tau \cdot \alpha) \cdot j_{\text{над}}^{\text{дн}} \cdot N}{J_{\text{нав}}^{\text{міс}}}, \quad (3)$$

де  $(\tau \cdot \alpha)$  – приведена усереднена поглинальна здатність ( $\tau$  – пропускна здатність системи покриття для розрахункового кута падіння сонячного випромінювання;  $\alpha$  – поглинаюча направлена здатність поглинаючого покриття;  $j_{\text{над}}^{\text{дн}}$  – інтегральний денний потік теплової енергії, яка надходить (падає) на покриття кДж/м<sup>2</sup>;  $N$  – кількість днів роботи сонячного колектора за місяці;  $J_{\text{наб}}^{\text{міс}}$  – місячне теплове навантаження потоку енергії, кДж. Вважається, що  $f$ -метод є найуніверсальнішим. Однак одночасно є складним, якщо виконувати оптимізаційні розрахунки.

Коефіцієнт корисної дії поглинальної здатності геліоколектора можна визначити за таким співвідношенням:

$$\eta = f_R^{cp} \left[ (\tau \cdot \alpha) - \frac{U_{\text{нов}} \cdot (\bar{t} - t_3)}{I_g} \right], \quad (4)$$

де  $f_R^{cp}$  – коефіцієнт відводу теплової енергії (за Європейською практикою);  $U_{\text{нов}}$  – повний коефіцієнт теплопередачі теплових втрат геліоколектора, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\bar{t}$  – середня температура сонячного колектора, °С;  $t_3$  – температура оточуючого середовища, °С. Формула (4) відображає лінійний зв'язок між ККД геліоколектора і приведеною температурою, коли виконується умова, що повний коефіцієнт теплопередачі теплових втрат сонячного колектора є постійною величиною.

При натурних дослідженнях американська асоціація ASHRAE рекомендує ККД геліоколектора визначати за допомогою наступного рівняння:

$$\eta = f_R \cdot (\tau \cdot \alpha)_n - F_R \cdot U_{\text{нов}} \cdot \frac{t_{\text{вх}} - t_3}{I_g}, \quad (5)$$

де  $f_R$  – коефіцієнт відводу теплової енергії згідно американської практики.

Коли невідоме значення коефіцієнта відведення теплоти, то ККД теплового геліоколектора визначають, як відношення повної теплопродуктивності такого геліоколектора до інтенсивності сонячного випромінювання, яке надійшло на поверхню сонячного колектора загалом:

$$\eta_{\text{ТСК}} = \frac{q_{\text{пов}}}{I_g}, \quad (6)$$

де  $q_{\text{пов}}$  – наведена повна теплопродуктивність теплового сонячного геліоколектора, Вт/м<sup>2</sup>:

$$q_{\text{пов}} = (\dot{m} \cdot c_p)_{\text{СК}} \cdot (t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}}), \text{ Вт/м}^2, \quad (7)$$

де  $\dot{m}$  – приведена масова витрата теплоносія через сонячний колектор, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Отже, основні критерії, що впливають на ККД геліоколектора є:

1. Інтенсивність сонячного випромінювання
2. Температура оточуючого середовища;
3. Конструктивні особливості сонячного колектора, його світлопропускні властивості та властивості, які показують, наскільки ефективно геліоколектор поглинає тепло;
4. Характеристики сонячного колектора, які були початково виставлені: кут встановлення геліоколектора, витрата теплоносія, температура рідинного теплоносія на вході.

На ефективність геліоколектора значно впливає зміна азимута або кута нахилу абсорбера відносно теплового потоку. Крім того, важливу роль відіграють метеорологічні умови, такі як швидкість, напрямок, частота вітру, забруднення пилом і затінення. Зокрема, при куті нахилу колектора від 0 до 50° щодо горизонту вплив забруднення може досягати близько 5 %.

Для сонячних колекторів з фотоелементами використовуються інші методики розрахунку їхніх параметрів.

**Висновки.** За останні кілька десятиліть, все більше науковців спрямовують свої дослідження на розробку, вдосконалення та вивчення комбінованих систем сонячного теплопостачання на основі гібридних геліоколекторів, які, порівняно з традиційними тепловими чи фотоелектричними, мають покращену загальну теплопродуктивність.

Дослідження різних конструкцій гібридних сонячних колекторів є дуже важливими у вдосконаленні сучасних енергетичних систем та сприяє постійному розвитку технологій використання сонячної енергії. Розуміння їхнього потенціалу та впровадження новітніх розробок у цій області є критичними для досягнення енергетичної стійкості, сталого економічного розвитку та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Проведений аналіз вказує на недостатню кількість досліджень у сфері гібридних геліоколекторів, особливо щодо їхніх теплотехнічних характеристик і методик розрахунку. Авторами визначено стан розвитку геліотеплотехніки на сьогодні та розглянуто наявні на ринку системи. На основі цього аналізу розроблено конструкцію гібридного сонячного колектора і запропоновано методики для розрахунку його теплових характеристик. Отримані результати є важливими для подальших досліджень та практичного впровадження гібридних геліоколекторів у різні сфери енергетики

Незважаючи на велику кількість запропонованих конструкцій гібридних сонячних колекторів, практичних рішень стосовно їхнього застосування є дуже мало, тому необхідно продовжувати подальші експерименти та дослідження, особливо у напрямку інтеграції таких систем у світлопрозорі конструкції будівель.

#### Список використаних джерел

1. Давиденко, С. П. Пасивне використання сонячної енергії в архітектурних формах / С. П. Давиденко // Енергоефективність в будівництві та архітектурі. – 2016. – № 8. – С. 107-112.
2. Венгрин, І. І. Енергоефективні геліосистеми, інтегровані в світлопрозорі конструкції будівель : дис. ... канд. техн. наук / І. І. Венгрин ; Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2022.
3. Шаповал, С. П. Використання сонячної теплової енергії за рахунок комбінованого геліовікна / С. П. Шаповал // Енергоефективність в будівництві та архітектурі. – 2017. – № 9. – С. 250-253.
4. A Hybrid Electric and Thermal Solar Receiver / L. A. Weinstein, K. McEnaney, E. Strobach, S. Yang, B. Bhatia, L. Zhao, Y. Huang, J. Loomis, F. Cao, S. V. Boriskina, Z. Ren, E. N. Wang, G. Chen // Joule. – 2018. – Vol. 2, № 5. – Pp. 962-975. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.02.009>.
5. Jun, Y.-J. A study on the structure of Solar/Photovoltaic Hybrid system for the purpose of preventing overheat and improving the system performance / Y.-J. Jun, K.-S. Park, Y.-H. Song // Solar Energy. – 2021. – Vol. 230. – Pp. 470-484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.019>.
6. Шаповал, С. П. Система теплозабезпечення будівель на основі гібридних сонячних колекторів [Електронний ресурс] / С. П. Шаповал, Б. І. Гулай, М. Є. Касинець, Ю. В. Пришляк // Екологія. Ресурси. Енергія: багатофункціональні еко- та енергоефективні, ресурсозберігаючі технології в архітектурі, будівництві та суміжних галузях: робоча програма та тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції. – Київ : Київський національний університет будівництва і архітектури, 2023. – С. 69-70. – Режим доступу: <https://is.lpnu.ua/sciencelp/research/nonparticlesedit.aspx?id=129091>.
7. Shapoval, S. Building heat supply system based on hybrid solar collectors / S. Shapoval, M. Kasynets, B. Gulai, Y. Prishlyak // Theory and Building Practice. – 2023. – Vol. 5, № 2. – Pp. 55-60. DOI: <https://doi.org/10.23939/jtbp2023.02.055>.

8. Желих, В. М. Визначення теплових характеристик термосифонного сонячного колектора / В. М. Желих // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. – 2012. – № 742. – С. 75-78.
9. Козак, Д. В. Теплотехнічні характеристики комбінованого сонячного колектора на основі алюмінієвих канавчатих теплових труб : дис. ... канд. техн. наук / Д. В. Козак ; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ, 2018.
10. Венгрин, І. Дослідження сонячних колекторів, інтегрованих в конструкцію скляного фасаду будівлі/споруди: необхідність та особливості / І. Венгрин // Theory and Building Practice. – 2019. – Vol. 1, № 1. – С. 38-46. DOI: 10.23939/jtbp2019.01.038.
11. Приймак, О. В. Дослідження тепловідачі абсорбера сонячного повітропідігрівача виготовленого з гофрованого вуглеграфітового трикотажного полотна [Електронний ресурс] / О. В. Приймак, П. О. Пасічник // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки. – 2016. – № 1. – С. 85–91. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vknutd\\_2016\\_1\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vknutd_2016_1_12).
12. Низькопотенціальна енергетика: навч. посіб. / А. О. Редько, М. Н. Безродний, М. В. Загорченко, О. Ф. Редько, Г. С. Ратушняк, М. І. Хмельнюк. – Київ : Друкарня Мадрид, 2016.
13. Technology Progress on Photovoltaic Thermal (PVT) Systems with Flat-Plate Water Collector Designs: A Review [Electronic resource] / A. L. Abdullah, S. Misha, N. Tamaldin, M. A. M. Rosli, F. L. A. Sachit // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. – 2019. – Vol. 59, № 1. – Pp. 107-141. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/287241394.pdf>.
14. Agrawal, Sh. Sustainable deployment of solar irrigation pumps: Key determinants and strategies [Electronic resource] / Sh. Agrawal, A. Jain // WIREs Energy and Environment. – 2018. – Vol. 8, № 2. – Pp. 325. – Accessed mode: <https://www.ceew.in/sites/default/files/Agrawal-Jain-2018-Sustainable-solar-irrigation.pdf>.
15. Efficiency Improvement of Eco-Friendly Solar Heat Supply System as a Building Coating (Open Access) / O. Voznyak, N. Spodyniuk, I. Antypov, E. Dudkiewicz, M. Kasynets, O. Savchenko, S. Tarasenko // Sustainability (Switzerland). – 2023. – Vol. 15, № 3. – Article 2831. DOI: 10.3390/su15032831.
16. Басок, Б. І. Оцінка ресурсного потенціалу сонячної електроенергетики у Одеській області / Б. І. Басок, Ю. А. Веремійчук. – Київ : Видавничий дім «Калита», 2018.
17. Модернізація системи теплопостачання населених пунктів України / Б. І. Басок, О. В. Новосельцев, С. В. Дубовський, Є. Т. Базеев // Теплофізика, Енергоефективність, Енерго-економіка, Екологія. – Київ : Видавничий дім «Калита», 2018.
18. Analysis of a hybrid solar collector photovoltaic thermal (PVT) / A. Khelifa, K. Touafek, B. Moussa, H. Tabet, B. Cheikh, E. Hocine, H. Haloui // Energy Procedia. – 2015. – Vol. 74. – Pp. 835-843. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.819.
19. Solar-thermal and hybrid photovoltaic-thermal systems for renewable heating / A. Ramos, I. Guarracino, A. Mellor, D. Alonso-Álvarez, P. Childs, N. J. Ekins-Daukes, C. N. Markides // Briefing paper. – 2017. – Vol. 22. DOI: 10.13140/RG.2.2.10473.29280.
20. Ramos, F. Hybrid Photovoltaic-Thermal Collectors / F. Ramos, A. Cardoso, A. Alcaso // IFIP Advances in Information and Communication Technology. – 2010. – Vol. 314. – Pp. 477-484. DOI: 10.1007/978-3-642-11628-5\_53.
21. Calise, F. Experimental and numerical analyses of a flat plate photovoltaic/thermal solar collector / F. Calise, R. D. Figaj, L. Vanoli // Energies. – 2017. – Vol. 10, № 4. – Pp. 1-21. DOI: 10.3390/en10040491.
22. Кувшинов, В. В. Методи розрахунку і підвищення ефективності використання теплофотоелектричних установок [Електронний ресурс] / В. В. Кувшинов // Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості. – 2013. – № 3. – С. 166-171. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpsnu\\_2013\\_3\\_25](http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpsnu_2013_3_25).



23. Василюха, Х. В. Вдосконалення нормативно-технічної бази випробувань сонячних перетворювачів : дис. ... канд. техн. наук : 05.01.02 / Василюха Христина Василівна ; Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Львів, 2017. – 202 с.

24. Козак, Д. В. Теплотехнічні характеристики комбінованого сонячного колектора на основі алюмінієвих канавчатих теплових труб: дис. ... канд. техн. наук : 05.14.06 / Д. В. Козак; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ, 2018. – 227 с.

### References

1. Davydenko, Ye.P. (2016). Pasyvne vykorystannia soniachnoi enerhii v arkhitekturykh formakh [Passive use of solar energy in architectural forms]. *Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi – Energy Efficiency in Construction and Architecture*, (8), 107-112.

2. Venhryn, I.I. (2022). Enerhoefektyvni heliosystemy intehrovani v svitloprozori konstrukttsii budivel [Energy-efficient solar systems integrated into transparent building structures]. *Candidate's thesis*. Natsionalnyi Universytet «Lvivska politekhnika».

3. Shapoval, S.P. (2017). Vykorystannia soniachnoi teplovoi enerhii za rakhunok kombinovanoho heliovikna [Use of solar thermal energy through combined solar windows]. *Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi – Energy Efficiency in Construction and Architecture*, 9, 250-253.

4. Weinstein, L. A., et al. (2018). A Hybrid Electric and Thermal Solar Receiver. *Joule*, 2(5), 962-975. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.02.009>.

5. Jun, Y.-J., Park, K.-S., & Song, Y.-H. (2021). A study on the structure of Solar/Photovoltaic Hybrid system for the purpose of preventing overheat and improving the system performance. *Solar Energy*, 230, 470-484. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.019>.

6. Shapoval, S.P., Hulai, B.I., Kasynets, M.Ye., Pryshliak, Yu.V. (2023). Systema teplozabezpechennia budivel na osnovi hibrydnykh soniachnykh kolektoriv [Building heat supply system based on hybrid solar collectors]. *Ekolohiia. Resursy. Enerhiia: bahatofunktsionalni eko – ta enerhoefektyvni, resursozberihaiuchi tekhnolohii v arkhitekturi, budivnytstvi ta sumizhnykh haluziakh – Ecology. Resources. Energy: Multifunctional eco- and energy-efficient, resource-saving technologies in architecture, construction, and related industries: working program and abstracts of the VI International Scientific and Practical Conference* (pp. 69–70). Kyivskiy natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury. <https://is.lpnu.ua/sciencelp/research/nonparticlesedit.aspx?id=129091>.

7. Shapoval, S., Kasynets, M., Gulai, B., Prishlyak, Y.(2023). Building heat supply system based on hybrid solar collectors. *Theory and Building Practice*, 5(2), 55–60. <https://doi.org/10.23939/jtbp2023.02.055>.

8. Zhelykh, V.M. (2012). Vyznachennia teplovykh kharakterystyk termosyfonnoho soniachnoho kolektora [Determination of thermal characteristics of a thermosyphon solar collector]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Teoriia i praktyka budivnytstva – Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic" Theory and Building Practice*, 742, 75–78.

9. Kozak, D.V. (2018). Teploekhnichni kharakterystyky kombinovanoho soniachnoho kolektora na osnovi aliuminiievnykh kanavchatykh teplovykh trub [Thermal characteristics of a combined solar collector based on aluminum grooved heat pipes]. *Candidate's thesis*. Natsionalnyi Tekhnichniy Universytet Ukrainy «Kyivskiy politekhnichniy instytut imeni Ihoria Sikorskoho».

10. Venhryn, I. (2019). Doslidzhennia soniachnykh kolektoriv, intehrovanykh v konstrukttsiiu sklianoho fasadu budivli/sporudy: neobkhdnist ta osoblyvosti [Study of solar collectors integrated into the glass facade structure of a building: necessity and features]. *Theory and Building Practice*, 1(1), 38-46. doi: 10.23939/jtbp2019.01.038.

11. Pryimak, O. V., Pasichnyk, P. O. (2016). Doslidzhennia teploviddachi absorbera soniachnoho povitropidhrivacha vyhotovlenoho z hofrovanoho vuhlegrafitovoho trykotazhnogo polotna [Study of heat transfer of a solar air heater absorber made of corrugated carbon-graphite knitted fabric]. *Visnyk Kyivskoho Natsionalnoho Universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Seriya: Tekhnichni nauky*, 1, 85-91. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkntud\\_2016\\_1\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkntud_2016_1_12).

12. Redko, A.O., Bezrodnyi, M.N., Zahoruchenko, M.V., Redko, O.F., Ratushniak, H.S., Khmelniuk, M.I. (2016). *Nyzkopotentsialna enerhetyka [Low-potential energy]*. TOV «Drukarnia Madryd».
13. Abdullah, A.L., Misha, S., Tamaldin, N., Rosli, M.A.M., Sachit, F.L.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. <https://core.ac.uk/download/pdf/287241394.pdf>.
14. Agrawal, Sh., Jain, A. (2018). Sustainable deployment of solar irrigation pumps: Key determinants and strategies. *WIREs Energy Environ*, 8(2), 325. <https://www.ceew.in/sites/default/files/Agrawal-Jain-2018-Sustainable-solar-irrigation.pdf>.
15. Voznyak, O., Spodyniuk, N., Antypov, I., Dudkiewicz, E., Kasynets, M., Savchenko, O., & Tarasenko, S. (2023). Efficiency Improvement of Eco-Friendly Solar Heat Supply System as a Building Coating. *Sustainability*, 15(3), Article No. 2831. DOI:10.3390/su15032831.
16. Basok, B.I., Veremiichuk, Yu.A. (2018). *Otsinka resursnoho potentsialu soniachnoi elektroenerhetyky u Odeskii oblasti [Assessment of solar energy resource potential in the Odesa region]*. Vydavnychiy dim «Kalyta».
17. Basok, B.I., Novoseltsev, O.V., Dubovskyi, S.V., Bazieiev, Ye.T. (2018). Modernizatsiia systemy teplopostachannia naselenykh punktiv Ukrainy [Modernization of heat supply systems in Ukrainian settlements]. *Teplofizyka, Enerhoefektyvnist, Enerhoekonomika, Ekolohiia – Thermophysics, Energy Efficiency, Energy Economics, Ecology*. Vydavnychiy dim «Kalyta».
18. Khelifa, A., Touafek, K., Moussa, B., Tabet, H., Cheikh, B., Hocine, E., Haloui, H. (2015). Analysis of a hybrid solar collector photovoltaic thermal (PVT). *Energy proceding*, 74, 835-843. doi:10.1016/j.egypro.2015.07.819.
19. 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.
20. 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.
21. Calise, F., Figaj, R. D., Vanoli, L. (2017). Experimental and numerical analyses of a flat plate photovoltaic/thermal solar collector. *Energies*, 10(4), 1-21. doi:10.3390/en10040491.
22. Kuvshynov, V. V. (2013). Metody rozrakhunku i pidvyshchennia efektyvnosti vykorystannia teplofotoelektrychnykh ustanovok [Methods for calculating and improving the efficiency of photovoltaic thermal installations]. *Zbirnyk naukovykh prats Sevastopolskoho natsionalnoho universytetu yadernoi enerhii ta promyslovosti – Collection of scientific works of the Sevastopol National University of Nuclear Energy and Industry*, 3, 166-171. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpsnu\\_2013\\_3\\_25](http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpsnu_2013_3_25).
23. Vasylykha, Kh. V. (2017). *Vdoskonalennia normatyvno-tekhnichnoi bazy vyprobuvan soniachnykh peretvoriuvachiv [Improvement of the regulatory and technical base for testing solar converters]*. [PhD dissertation; Natsionalnyi Universytet «Lvivska politehnika»].
24. Kozak, D.V. (2018). Teplotekhnichni kharakterystyky kombinovanoho soniachnoho kolektora na osnovi aliuminiievnykh kanavchatykh teplovykh trub [Thermal characteristics of a combined solar collector based on aluminum grooved heat pipes]. *Candidate's thesis*. Natsionalnyi Tekhnichniy Universytet Ukrainy «Kyivskyi politehnichniy instytut imeni Ihoria Sikorskoho».

Отримано 23.09.2024

**Stepan Shapoval<sup>1</sup>, Yurii Pryshliak<sup>2</sup>, Bogdan Gulai<sup>3</sup>,  
Mykola Gensetskyi<sup>4</sup>, Mariana Kasynets<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Doctor 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](mailto:stepan.p.shapoval@lpnu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4985-0930>. **ResearcherID:** [S-3421-2017](https://orcid.org/0000-0003-4985-0930)

<sup>2</sup>Postgraduate of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation  
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [yurii.v.pryshliak@lpnu.ua](mailto:yurii.v.pryshliak@lpnu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-0511-2568>. **ResearcherID:** [LGZ-2116-2024](https://orcid.org/0009-0001-0511-2568)

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation  
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [bogdan.i.gulai@lpnu.ua](mailto:bogdan.i.gulai@lpnu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6951-6994>. **ResearcherID:** [V-7301-2017](https://orcid.org/0000-0001-6951-6994)

<sup>4</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Lviv Technical and Economic College of Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [gens2005@ukr.net](mailto:gens2005@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0460-8131>. **ResearcherID:** [LGZ-8263-2024](https://orcid.org/0000-0002-0460-8131)

<sup>5</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation  
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [mariana.y.kasynets@lpnu.ua](mailto:mariana.y.kasynets@lpnu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7686-7482>. **ResearcherID:** [V-7536-2017](https://orcid.org/0000-0002-7686-7482)

## **ENERGY-EFFICIENT HYBRID SOLAR COLLECTORS INTEGRATED INTO TRANSPARENT BUILDING STRUCTURES**

*The article addresses current issues related to the use of hybrid solar collectors that combine photovoltaic and thermal components for maximum utilization of solar radiation. The advantages of such systems in space-constrained conditions and their efficiency under various weather conditions are analyzed. The importance of creating stable and independent energy supply systems, unaffected by external factors, is emphasized, which is particularly relevant in the context of climate change and instability in the energy sector. The environmental benefits of hybrid solar collectors, which reduce CO<sub>2</sub> and other harmful emissions, are highlighted. The challenges associated with the design and implementation of such solar collectors, as well as the need to study their thermophysical characteristics, are outlined. The aim of the article is to conduct a detailed analysis of the development of solar thermal technology, verify existing solar collectors, and develop a method for calculating their thermal characteristics to improve efficiency.*

*The article also explores various types of solar collectors and compiles their classification, including hybrid ones. A review of sources shows that hybrid solar collectors, which use liquid heat carriers to convert solar radiation into thermal energy, are available on the market. Currently, it is known that approximately 90% of solar radiation is absorbed by the surface of photovoltaic collectors, but only 15% is converted into electrical energy and 10% into thermal energy.*

*A design of a hybrid solar collector with a heat exchanger, in which a liquid heat carrier circulates, and with vertical slats where photovoltaic elements are mounted, has been developed. These solutions allow such a solar collector to be integrated into the external envelope of a building.*

*A model of the hybrid solar collector has been developed to study its thermal and electrical properties. The drawings show that photovoltaic elements can be applied to vertical shutters, which is a practical solution for buildings with transparent facades. This model will effectively support research and help solve the tasks before practical application begins.*

*The article presents methods for calculating the thermal parameters of the hybrid solar collector, based on various mathematical models. These methods show that as the ambient temperature decreases, the electrical characteristics of the system improve with constant solar radiation. Research is conducted using natural and laboratory methods, which are divided into stationary and non-stationary types. The thermal efficiency coefficient of the solar collector is determined by formulas that account for efficiency, heat losses, and solar radiation intensity.*

*The authors provide equations indicating that the efficiency of the hybrid solar collector is influenced by its design features, meteorological factors, pollution, and the tilt angle of the collector.*

**Keywords:** hybrid solar collector; solar radiation; energy sector; heat exchanger; thermal energy; photovoltaic elements; thermal efficiency coefficient.

*Fig.: 2. References: 24.*