

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ТЕПЛОВИХ ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНО-ТЕПЛОВИХ СИСТЕМ

Сучасні стратегії декарбонізації енергетичного сектору вимагають інтенсивного впровадження відновлюваних джерел енергії, серед яких сонячні технології посідають провідне місце. Для забезпечення потреб гарячого водопостачання (ГВП) традиційно використовуються сонячні теплові системи, що базуються на перетворенні сонячного випромінювання безпосередньо в теплову енергію. Водночас розвиток фотоелектричних технологій зумовив появу гібридних фотоелектрично-теплових (PVT) систем, здатних генерувати як електричну, так і теплову енергію одночасно. Це створює нові можливості для підвищення енергетичної щільності систем енергопостачання, проте вимагає ретельного аналізу їхньої порівняльної доцільності в реальних експлуатаційних умовах. Необхідність вибору між традиційними геліосистемами та гібридними PVT-установками часто ускладнюються різними критеріями оцінки: від безпосередньої теплопродуктивності до загальної екологічної ефективності протягом життєвого циклу. В роботі проведено комплексну оцінку енергетичної та екологічної ефективності обох типів систем у мережах ГВП. Метою дослідження є виявлення переваг та обмежень застосування кожної технології, що дозволить сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо їхнього оптимального вибору для підвищення енергоефективності та зменшення антропогенного впливу на довкілля.

У роботі запропоновано авторську методику розрахунку коефіцієнта підвищення терміну ефективної експлуатації сонячної енергії в гібридних установках. Ключовим елементом методики є впровадження показника «коефіцієнт продовження періоду роботи геліотеплопостачання», який дозволяє кількісно оцінити часове розширення експлуатаційного вікна системи протягом світлового дня та річного циклу. Запропонований підхід базується на порівнянні тривалості активної генерації енергії гібридною PVT-системою та традиційним тепловим колектором за однакових умов інсоляції. Основною перевагою даної методики є можливість обґрунтувати енергетичну доцільність PVT-рішень навіть у періоди низької сонячної активності, коли електрична складова дозволяє компенсувати теплову інерційність системи та забезпечити її раніший старт. Важливою особливістю дослідження є те, що підвищення показників використання енергії досягається при повному збереженні існуючих конструктивних параметрів та технологічних вимог до мережі гарячого водопостачання промислової будівлі. Це робить методику практично цінною для модернізації енергетичних систем підприємства, оскільки вона не потребує радикальної зміни гідравлічної структури ГВП, але суттєво покращує річний енергетичний баланс об'єкта.

Ключові слова: геліосистема, тепловий колектор, PVT - панелі, сонячна енергія, гаряче водопостачання, енергоефективність, екологічна ефективність, відновлювані джерела енергії.

Постановка проблеми. Сучасні умови роботи підприємств, в Україні стикаються з труднощами енергозабезпечення, що вимагає впровадження ефективних технічних заходів, які спрямовані на економію енергоресурсів та забезпечують безперебійність функціонування технологічних підрозділів. Використання сонячних геліотеплосистем набуло поширення для

забезпечення гарячого тепловодопостачання допоміжних та виробничих будівель, як невеликих так і потужних виробництв. Необхідність цілорічного функціонування систем ГВП на промислових об'єктах вимагає інтеграції додаткових електричних нагрівачів, що в умовах енергодефіциту знижує загальний коефіцієнт корисної дії установки та обмежує тривалість її ефективної роботи. Наряду з цим, у більшості регіонів України, особливо в осінньо-зимовий період, рівень сонячної радіації є недостатнім для забезпечення стабільної роботи систем теплопостачання. Це знижує економічну доцільність та екологічний ефект впровадження геліосистем у промисловому секторі. У зв'язку з цим актуальною науково-технічною задачею є пошук і обґрунтування методів підвищення ефективності використання сонячної енергії та розширення періоду її застосування протягом року для теплопостачання промислових будівель.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання максимізації енергетичної віддачі сонячних систем теплопостачання перебувають у центрі уваги наукової спільноти як в Україні, так і за кордоном. Основний акцент у дослідженнях спрямований на оптимізацію термодинамічних параметрів геліосистем, удосконалення методологій розрахунку енергетичного балансу та підвищення сумарного коефіцієнта корисної дії при трансформації сонячного випромінювання [1,2]. Значний потенціал для зростання енергоефективності вбачається у розробці інноваційних матеріалів для абсорберів та високоефективних систем акумулювання теплоти, які дозволяють мінімізувати втрати енергії під час її накопичення та розподілу [2]. На відміну від роздільних фотоелектричних технологій сонячних колекторів PV, принцип комбінованого виробництва PVT- теплових систем забезпечує вищий рівень енергетичної щільності на одиницю площі панелей, що робить їх високоефективним рішенням для об'єктів з одночасним споживанням електроенергії та тепла, включаючи інтегровані в будівлі системи (BIPV/T) та енергоємні промислові процеси [3,4, 5]. Технічна перевага PVT-систем полягає в їхній здатності оптимізувати енергетичний баланс шляхом активного керування тепловими потоками, що неможливо в стандартних фотоелектричних (PV) модулях. Інтеграція теплоприймача дозволяє мінімізувати термічні втрати, утилізуючи побічне тепло для нагрівання теплоносія, або самої поверхні панелі в зимових умовах, що істотно покращує загальний коефіцієнт використання сонячної енергії [3,4]. На відміну від роздільних технологій, комбінований характер PVT-систем забезпечує вищий рівень енергетичної щільності на одиницю площі апертури. *Сучасні дослідження показують, що PVT-системи забезпечують значно вищу сумарну ефективність у порівнянні з окремими системами. Зокрема: теплова ефективність: 30–70%, електрична ефективність: 8–17% [6].*

Енергетичний вихід PVT-систем безпосередньо корелює з теплофізичними властивостями робочого тіла, що визначає ефективність охолодження фотоелементів та потенціал теплогенеруючої частини. Повітряні PVT-установки, попри конструктивну спрощеність, характеризуються низьким коефіцієнтом теплопередачі, що суттєво лімітує їхню загальну термічну потужність [6]. Рідинні системи (на водній основі) мають вищу енергоефективність завдяки кращій теплоємності носія, проте потребують мінімізації теплових втрат через ускладнення гідравлічного контуру. Для подолання енергетичних обмежень однофазних систем розробляються біфлюїдні конфігурації (повітря-вода), які дозволяють максимізувати відведення тепла, підвищуючи тим самим електричний ККД за рахунок глибшого охолодження панелі [7].

Незважаючи на значні успіхи в оптимізації геліосистем, малодослідженими залишаються аспекти пролонгації періоду їх високоефективної експлуатації протягом річного циклу, особливо в умовах значної міжсезонної амплітуди сонячної інсоляції.

Окремої уваги потребує розробка алгоритмів адаптації параметрів сонячних установок до мінливих кліматичних чинників, що є критично важливим для забезпечення стабільного

енергопостачання промислових об'єктів, де технологічні процеси вимагають високої надійності та постійності параметрів теплоносія.

Мета дослідження. Комплексна оцінка енергетичної та екологічної ефективності сонячних теплових та гібридних фотоелектрично-теплових (PVT) систем для потреб тепло та гарячого водозабезпечення промислової будівлі.

Основний матеріал дослідження. За базову модель дослідження прийнято традиційну геліосистему (PV) тепло та гарячого водопостачання санітарно-побутового корпусу промислового підприємства, за умовами розрахункової інтенсивності сонячної радіації, (табл. 1).

Конструктивна схема базового варіанта передбачає використання традиційних сонячних колекторів та двоконтурної системи опосередкованого нагріву. До складу інженерного обладнання системи входять: поле сонячних модулів загальною площею $A = 192 \text{ м}^2$, двоконтурна система циркуляції з розширювальним баком для антифризу, бак-акумулятор із закритим відбором води, циркуляційний насос колекторного контуру, електричний водонагрівач (для догріву в періоди недостатньої інсоляції), споживачі теплової енергії.

Таблиця 1 –Інтенсивність сонячної радіації за 2025 рік (м. Дніпро)

Місяці	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$E_{\text{мр}}, \text{Вт/м}^2$	135	209	281	328	370	376	361	337	289	218	152	120

Розрахунок загального теплового навантаження проведено для фактичних умов, на кількість користувачів в день – $n = 655$ осіб, при нормі на санітарно - гігієнічне споживання гарячої води $g = 40$ л/добу на 1 особу [5]. Температура холодної води: $t_x = 10^\circ\text{C}$, гарячої води: $t_r = 55^\circ\text{C}$. Добова витрата води при $\Delta t = 45^\circ\text{C}$, складає $26,2 \text{ м}^3/\text{добу}$.

Проведено розрахунок основних показників роботи базової геліосистеми теплопостачання: загального теплованавтаження, коефіцієнта покриття тепло навантаження та коефіцієнта ефективності тепло геліосистеми помісячно. Характеристики вказано на рисунку 1. Отримані результати показують, що виробіток теплової енергії має виражену сезонну залежність, яка прямо корелює з інтенсивністю сонячного випромінювання $E_{\text{міс}}$. Максимальна ефективність геліосистеми спостерігається у весняно-літній період (травень–вересень). Середньорічний ККД $\approx 45\%$. Спостерігалось зниження цих показників у квітні, що пов'язано з дефіцитом енергопостачання у цей період.

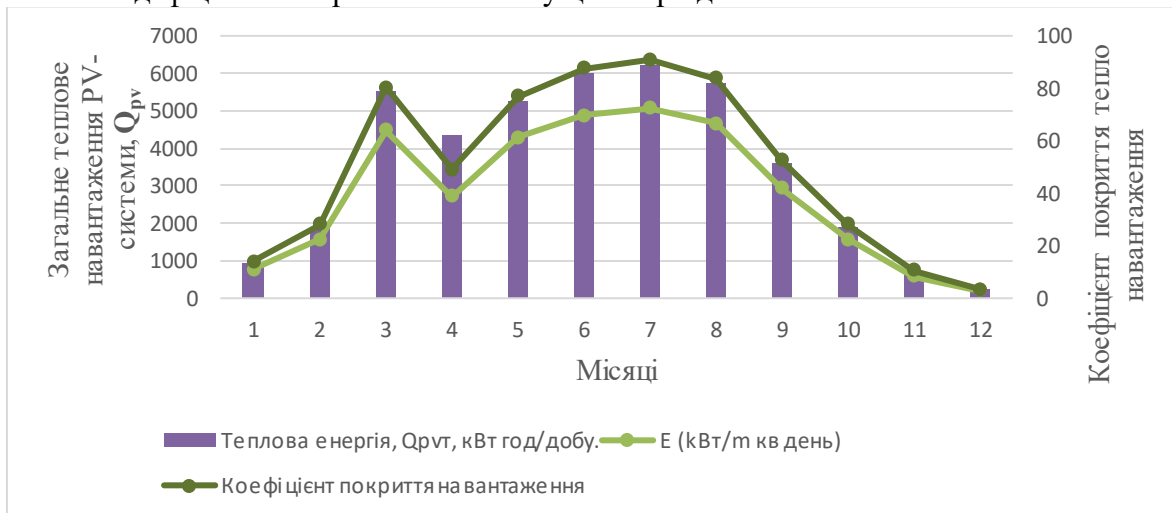


Рисунок 1 – Теплове навантаження установки PV - теплопостачання за 2025 рік

Енергетичні системи та обладнання

Числовий аналіз розрахунків показав, що ефективність покриття теплонавантаження PVT системи у літній період року досягає 65–70% (рис. 1). У зимові місяці цей показник знижується до 5–10%, що підтверджує виражену сезонність використання сонячної енергії.

З метою максимізації загальної ефективності перетворення сонячної енергії проведено порівняльне дослідження показників базової геліосистеми та гібридних фотоелектрично-теплових (PVT) установок.

Для оцінки енергоефективності використано комплексну систему показників, що базується на аналізі теплової та електричної складових енергетичного балансу. Також, порівняно коефіцієнти покриття теплонавантаження, коефіцієнт корисної дії системи та визначено ступінь заміщення традиційних паливно-енергетичних ресурсів обох варіантів (табл. 2), що дозволяє кількісно оцінити енергетичний та екологічний ефект від впровадження PVT-технологій.

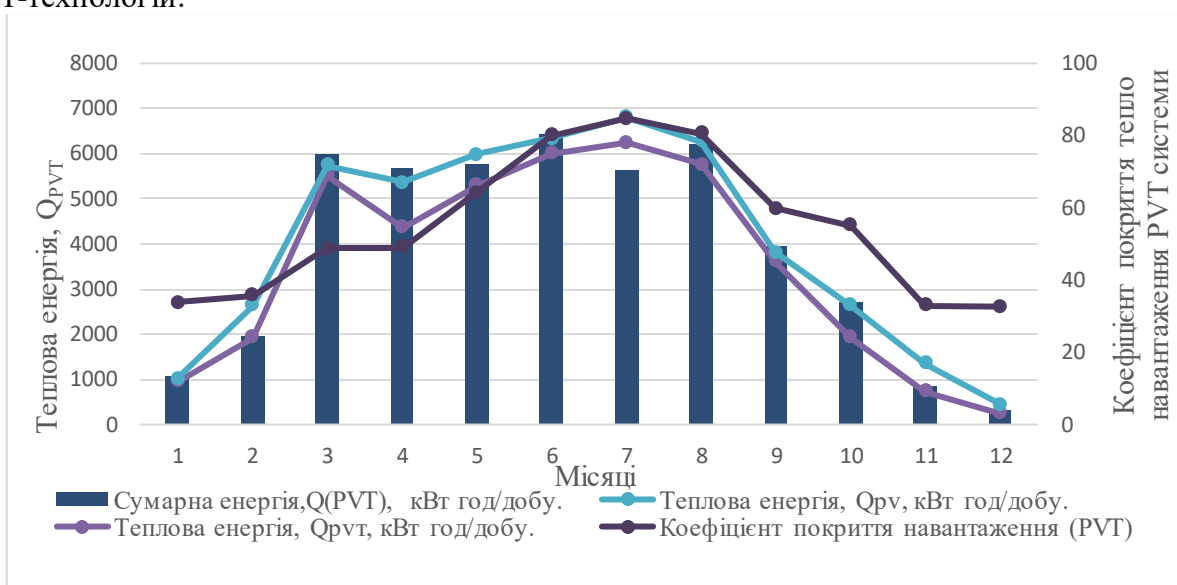


Рисунок 2 - Теплове навантаження установки PVT - теплопостачання

Аналіз результатів моделювання дозволяє оцінити енергетичну ефективність обох систем у різні сезонні періоди.

Зимовий період (листопад – лютий). У цей проміжок спостерігається мінімальна теплопродуктивність (табл. 2). Традиційна геліосистема не забезпечує повного покриття навантаження, особливо у грудні, де коефіцієнт покриття становить лише 10 – 15%. Гібридна PVT-система в цей час також працює в умовах дефіциту теплової енергії (коефіцієнт покриття 25-30%), проте вона демонструє кращу загальну ефективність за рахунок одночасної генерації електроенергії. Вироблену електричну енергію можна спрямувати на живлення циркуляційних насосів або часткову компенсацію дефіциту тепла (на 10–25%) за допомогою пікових електронагрівачів, що дозволяє оптимізувати загальне енергоспоживання об'єкта.

Перехідні періоди (березень – квітень, жовтень). У ці місяці фіксується різке зростання генерації. Коефіцієнт покриття для традиційної системи зростає до 16–28. Для PVT-системи він стабільно перевищує теплове навантаження, забезпечуючи при цьому суттєвий вихід електричної енергії (табл. 2), що створює додатковий енергетичний запас для потреб промислової будівлі.

Літній період (травень – серпень). Цей етап характеризується значним надлишком теплової енергії. Коефіцієнти покриття для обох систем сягають максимальних значень (від 80 до 93). Ключовою перевагою PVT-системи в цей період є пікова генерація електроенергії, яка,

на відміну від надлишкового тепла, може бути легко інтегрована в загальну електричну мережу підприємства або використана для охолодження приміщень, підвищуючи сумарний енергетичний ККД всієї установки.

Для умов Дніпропетровської області встановлено, що використання PVT-панелей дозволяє збільшити час корисної експлуатації установки на 15–20% у зимовий період. Це досягається за рахунок здатності фотоелектричного контуру генерувати енергію при низьких рівнях інтенсивності сонячної радіації ($E_{\text{мр}} < 200 \text{ Вт/м}^2$), коли тепловий контур традиційної системи залишається неефективним через високі втрати в навколишнє середовище.

Коефіцієнт продовження періоду ефективної роботи системи (K_{ext}) визначається як відношення тривалості активної генерації енергії обох систем:

$$K_{\text{ext}} = \frac{T_{\text{PVT}}}{T_{\text{PV}}}, \quad (1)$$

де T_{PVT} — кількість годин (або днів) на рік, коли PVT-система видає енергію, достатню для покриття потреб;

T_{PV} — аналогічний показник для базової системи.

Порівняльний аналіз тривалості роботи показав, що традиційна геліосистема у перехідний період забезпечує ефективне покриття навантаження лише протягом 6 годин пікової інсоляції, тоді як гібридна PVT-система розширює цей інтервал до 9 годин завдяки ранньому старту фотоелектричного контуру.

Таблиця 2 – Порівняльна характеристика енергетичної ефективності та ступеня енергозаміщення базової та гібридної геліосистем

Показник	Мінімальні	Максимальні	Середнє
Теплова енергія PV, кВт·год/добу	240,2	6244,9	3462,7
Теплова енергія PVT (теплова част.), кВт·год/добу	213,5	6151,1	171,6
Електрогенерація PVT, кВт·год	133,5	209,9	171,7
Сумарна енергія PVT, кВт·год/добу	346,96	6360,96	3180,48
Сумарний ККД PVT, %	40	60	50
Коефіцієнт покриття PV	0,7	15,1	9,3
Коефіцієнт покриття PVT	2,6	16,8	10,3
Ступінь заміщення традиційного палива PV	0,7	47,9	19,2
Ступінь заміщення традиційного палива PVT	0,6	43,3	17,4

Використання електричної складової для компенсації теплового дефіциту дозволяє PVT-установці функціонувати на 1,5 години довше на початку та в кінці світлового дня порівняно з інерційною тепловою системою. У результаті розрахований коефіцієнт продовження періоду роботи (K_{ext}) становить 1,5, що підтверджує вищу адаптивність гібридної технології до змінних кліматичних умов при енергозабезпеченні промислових будівель.

ВИСНОВКИ

Традиційні геліосистеми PV є ефективними лише в тепловому аспекті, але мають обмеження через сезонність. Гібридні PVT-системи забезпечують одночасне виробництво тепла та електроенергії підвищення загального ККД до 60%, більш стабільну роботу протягом року. Підвищення ефективності гібридних PVT-систем у зимовий період року на 10 -15%, обумовлене сукупністю фізичних факторів: більш повним використанням сонячного спектра; зниженням температури фотоелементів і зростанням їх ККД; утилізацією теплових втрат, які в традиційних системах розсіюються; зменшенням теплових втрат з колектору; можливістю комбінованого використання теплової та електричної енергії.

У результаті гібридні системи демонструють вищу сумарну енергетичну ефективність і більший розрахований коефіцієнт продовження періоду роботи (K_{ext}), що становить 1,5 та дозволяє збільшити час корисної експлуатації установки на 15–20%, що підтверджує вищу адаптивність гібридної технології до змінних кліматичних умов при енергозабезпеченні промислових будівель. Такий підхід дозволяє адаптувати систему теплопостачання до мінливих кліматичних умов регіону, забезпечуючи стабільність енергогенерації протягом року.

Список використаних джерел

1. Кудря С. О. Відновлювані джерела енергії: підручник. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. – 392 с.
2. Каплун В. В., Бойко Р. В. Аналіз ефективності сонячних теплових колекторів у системах гарячого водопостачання // Відновлювана енергетика. – 2019. – № 3. – С. 45–52.
3. Петренко В. О., Іваненко І. М. Дослідження гібридних фотоелектрично-теплових колекторів (PVT) для систем теплопостачання // Теплоенергетика. – 2021. – № 2. – С. 67–74.
4. Басанец В. Г., Ткаченко С. Й. Порівняльний аналіз енергетичної ефективності сонячних систем різних типів // Енергетика та електрифікація. – 2020. – № 5. – С. 23–29.
5. ДСТУ 4034-2001.
6. Гелетуха Г. Г., Железна Т. А. Перспективи використання відновлюваних джерел енергії в Україні. – Київ: Біоенергетична асоціація України, 2018. – 84 с.
7. Adam Samsudin Recent advances in photovoltaic thermal collectors (PVT): from conventional designs to high insulation glazing and semi-transparent PVT for building applications / Adam Samsudin, Hasila Jarimi Wardah Fatimah Mohammad Yusoff Ubaidah Syafiq, Tajul Rosli Razak, Emy Zairah Ahmad, Shafidah Shafian, Muaz Mohd Zaini Makhtar, Yuehong Su/ Journal of Building Engineering. Vol. 116, 2025, 114500. URL <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114500>.

Yelistratova N.Y.

COMPREHENSIVE EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF SOLAR THERMAL AND PHOTOTHERMAL SYSTEMS

Modern strategies for decarbonising the energy sector require the widespread adoption of renewable energy sources, with solar technologies playing a leading role. Solar thermal systems, which convert solar radiation directly into thermal energy, are traditionally used to meet hot water supply (HWS) needs. At the same time, the development of photovoltaic technologies has led to the emergence of hybrid photovoltaic-thermal (PVT) systems capable of generating both electrical and

thermal energy simultaneously. This creates new opportunities for increasing the energy density of power supply systems, but requires a thorough analysis of their comparative feasibility under real operating conditions. The need to choose between traditional solar thermal systems and hybrid PVT systems is often complicated by various evaluation criteria: ranging from direct thermal output to overall environmental performance over the life cycle. This study provides a comprehensive assessment of the energy and environmental performance of both types of systems in DHW networks.

The aim of the research is to identify the advantages and limitations of each technology, thereby enabling the formulation of scientifically sound recommendations regarding their optimal selection to enhance energy efficiency and reduce anthropogenic impact on the environment. This paper proposes an original method for calculating the coefficient of extension of the effective operating life of solar energy in hybrid systems. A key element of the methodology is the introduction of the 'solar thermal supply operating period extension coefficient', which allows for a quantitative assessment of the extension of the system's operational window during daylight hours and over the annual cycle. The proposed approach is based on a comparison of the duration of active energy generation by a hybrid PVT system and a conventional solar thermal collector under identical insolation conditions. The main advantage of this methodology is the ability to demonstrate the energy efficiency of PVT solutions even during periods of low solar activity, when the electrical component compensates for the system's thermal inertia and ensures an earlier start-up. An important feature of the study is that improved energy efficiency is achieved whilst fully retaining the existing design parameters and technical requirements for the hot water supply network of an industrial building. This makes the methodology practically valuable for the modernisation of an enterprise's energy systems, as it does not require a radical change to the hydraulic structure of the DHW system, but significantly improves the facility's annual energy balance.

Keywords: solar system, heat collector, PVT panels, solar energy, hot water supply, energy efficiency, environmental efficiency, renewable energy sources.

Стаття надійшла 02.04.2026р.

Стаття прийнята 05.04.2026р.

Стаття опублікована 30.04.2026р.