

УДК 620.91

Дмитро Кулида, <https://orcid.org/0009-0004-4292-1569>

Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, Київ, 03150, Україна
e-mail: dimakulyda009@gmail.com

ІНТЕГРАЦІЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ ІЗ СОНЯЧНИМИ PVT-СИСТЕМАМИ: СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ В ДОМОГОСПОДАРСТВАХ

Анотація. В умовах енергетичної кризи в Україні та у зв'язку з нестабільністю централізованого постачання енергії зростає стратегічна значущість розвитку децентралізованих відновлюваних джерел. Наразі особливу увагу привертають гібридні автономні системи енергозабезпечення, зокрема поєднання теплових насосів та фотоелектрично-термічних (PVT) панелей, яке дозволяє комплексно покривати потреби домогосподарств у теплі та електроенергії, знижувати залежність від газу і централізованої мережі. Метою статті є огляд сучасних конструктивних рішень PVT-систем, принципів їх роботи, переваг і викликів при інтеграції з тепловими насосами. Представлено обґрунтування ролі таких систем у підвищенні енергоефективності та енергетичної автономності приватних домогосподарств України. Фотоелектрично-термічний PVT-колектор об'єднує сонячний тепловий колектор і фотоелемент в одному пристрої, одночасно виробляючи тепло та електроенергію. Такі колектори можуть виконувати функцію джерела тепла для соляно-водяних теплових насосів, що дозволяє підвищити сезонний ККД системи і знизити потребу в глибокому бурінні ґрунтових теплообмінників. У статті розглянуто різні варіанти поєднання PVT з тепловими насосами (послідовні та паралельні схеми, використання відкритих або покритих колекторів) та оптимальні співвідношення теплової і електричної потужності для умов України. Моделювання систем показало конкурентну ефективність гібридних конфігурацій: наприклад, PVT-ТН з ребристим колектором досягають $SPF \approx 3,5-3,8$ (для 20–30 м² панелей) і $SPF(Grid)$ до $\sim 4,4$. Поєднання PVT з геотермальним джерелом ще підвищує коефіцієнт ефективності ($SPF > 4,0$) при скороченій довжині свердловини (~ 70 м), а в умовах обмеженого буріння допомагає зменшити площу горизонтального теплообмінника і підвищити загальний ККД системи. На основі аналізу сучасних зарубіжних та вітчизняних досліджень сформовано аналітичне узагальнення, що дозволяє оцінити перспективність і доцільність впровадження комбінованих PVT-ТН систем у житловому секторі України.

Ключові слова: PVT-система, фотоелектрично-термічний колектор, відновлювані джерела енергії, децентралізоване енергозабезпечення, енергоефективність, енергетична автономність.

1. Вступ

Енергозабезпечення житлового сектору в Україні традиційно базується на централізованому теплопостачанні у містах та використанні газу й електроенергії у приватних домогосподарствах. Однак така модель поступово втрачає ефективність і стійкість через низку критичних факторів. Зношеність мереж, високі втрати при транспортуванні енергії, нестабільність постачання енергоносіїв і залежність від імпортного викопного палива роблять систему вразливою до зовнішніх шоків і геополітичних викликів. Після початку повномасштабної війни Росії проти України ці ризики лише посилились, спричинивши перебої в енергопостачанні, зростання цін та руйнування критичної інфраструктури [1, 2].

На цьому тлі відновлювані джерела енергії (ВДЕ) набувають стратегічного значення не лише для приватних споживачів, а й на рівні національної енергетичної політики. Україна вже має амбітні цілі щодо розвитку ВДЕ: згідно з Енергетичною стратегією до 2050 року, частка відновлюваних джерел у структурі енергоспоживання має сягнути щонайменше 25%. Також однією з цілей є розвиток альтернативних джерел енергії, нових продуктів та інноваційних рішень в енергетичному секторі [3–6].

В умовах воєнної нестабільності розвиток децентралізованих джерел генерації – сонячних, вітрових, біоенергетичних установок – дозволяє підвищити енергетичну безпеку та зменшити навантаження на централізовані мережі. Зокрема, після 2022 року спостерігається підвищений попит на автономні та гібридні системи, які поєднують традиційні мережі з генерацією з ВДЕ [6, 7].

У контексті енергетичної трансформації домогосподарства також відіграють ключову роль. Зростає інтерес до децентралізованих систем енергозабезпечення на основі відновлюваних джерел. Перспективним напрямом є поєднання теплових насосів із фотоелектрично-термічними (PVT) панелями, що дозволяє комплексно покривати потреби у тепловій та електричній енергії. Такі системи дають змогу зменшити залежність від газу та централізованої електроенергії, знизити витрати на енергоносії та підвищити енергоавтономність житла [8, 9].

У нинішніх умовах побутовий сектор посідає провідне місце у структурі викидів парникових газів, адже через війну значна частина промисловості зупинилася або була зруйнована, що спричинило загальне зниження індустріального забруднення. Встановлення сучасних систем на базі ВДЕ – теплових насосів, сонячних електростанцій, акумуляторних блоків – сприяє істотному скороченню викидів CO₂. Це відповідає міжнародним зобов'язанням України в межах Паризької кліматичної угоди та Європейського зеленого курсу, а також сприяє формуванню більш екологічно збалансованого житлового сектору [10, 11].

Таким чином, розвиток відновлюваних джерел енергії – як на рівні держави, так і в межах окремих домогосподарств – є не лише економічно доцільним, але й стратегічно необхідним кроком.

У контексті зазначених викликів та можливостей доцільним є детальний аналіз інноваційних технологій, здатних забезпечити ефективне, екологічне й надійне енергозабезпечення домогосподарств. Насамперед це стосується поєднання фотоелектрично-термічних панелей та теплових насосів – систем, що інтегрують генерацію електричної та теплової енергії в одному рішенні. У межах цієї статті пропонується здійснити огляд конструктивних особливостей, принципів роботи, переваг і викликів, пов'язаних із впровадженням таких комбінованих систем. Такий підхід дозволить краще зрозуміти потенціал використання PVT-панелей у поєднанні з тепловими насосами для потреб домогосподарств в Україні, а також оцінити їхню ефективність у контексті енергетичного переходу та декарбонізації житлового сектору.

2. Основна частина

Сонячний елемент має свою порогову енергію фотонів, що відповідає певній енергетичній зоні, нижче якої перетворення електроенергії не відбувається. Фотони з більшою довжиною хвилі не генерують електронно-діркових пар, а лише розсіюють свою енергію у вигляді тепла в комірці. Звичайний фотоелектричний модуль перетворює 4–17 % сонячного випромінювання, що надходить в електрику, залежно від типу сонячних елементів, що використовуються, та умов роботи сонячних елементів. Іншими словами, більше 50 % падаючої сонячної енергії перетворюється на тепло (після вирахування відбитої частини). Через це фотоелементи можуть нагріватися до екстремальної робочої температури, яка на 50°C перевищує температуру навколишнього середовища. Можуть бути два небажані наслідки: падіння ефективності комірки (зазвичай 0,4 % на кожне підвищення температури для c-Si елементів) і незворотні структурні пошкодження модуля. Структурне пошкодження модуля відбувається у випадку, якщо теплове навантаження зберігається протягом тривалого часу або тривалого періоду. Численні кореляції виражають температуру комірки і ефективність елемента як функції відповідних погодних змінних і умов роботи комірки. Охолоджуючи сонячні елементи потоком, наприклад, повітря або води, можна збільшити вихід електроенергії. Але концептуально краща конструкція полягає у повторному використанні теплової енергії, що виділяється теплоносієм. Тоді вихід енергії з одиниці площі панелі (або фасаду у випадку інтегрованої в будівлю установки) можна підвищити. Такими є стимули, що ведуть до розвитку гібридної сонячної технології PVT [12, 13].

Фотоелектрично-термічні колектори можуть бути використані як альтернативне або додаткове джерело тепла для теплових насосів з розсолем і водою. PVT-колектор об'єднує сонячний тепловий колектор і фотоелектричний модуль в єдиний компонент, одночасно генеруючи енергію і тепло з однієї області. Колектори PVT можна комбінувати з тепловими насосами для розсолу та води послідовно або паралельно для попереднього нагрівання побутової гарячої води.

Проектні рішення повинні передбачати вибір типу колектора, співвідношення теплової та електричної потужності, а також рівень сонячної частки, необхідний для оптимізації загальної ефективності системи. Усі ці чинники суттєво впливають на режим роботи, робочу температуру та загальну продуктивність PVT-системи [14]. На рис. 1 показані основні елементи плоского PVT-колектора, який охолоджується рідиною.

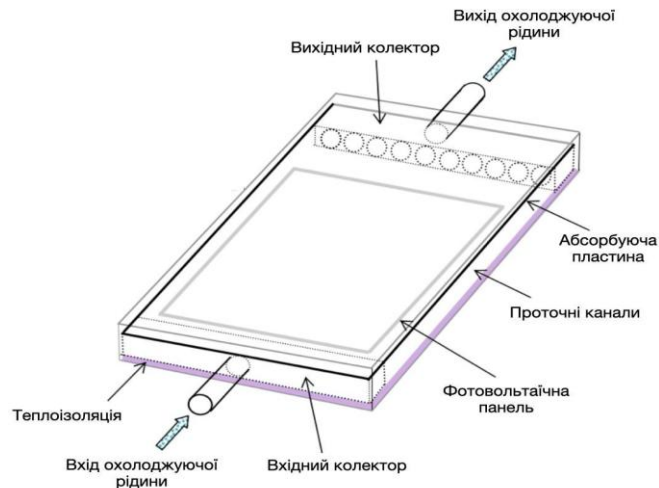


Рисунок 1. Плоский PVT-колектор

PVT серії діють як пряме або додаткове джерело тепла для регенерації землі. Згідно з їх дизайном колектори PVT в основному класифікуються як покриті, відкриті або концентровані. Відкриті колектори PVT мають найвищу частку ринку в Німеччині, оскільки їх можна використовувати безпосередньо як низькотемпературну систему розподілу опалення з тепловими насосами. У статті [16] досліджували економічно ефективне вимірювання горизонтальних наземних теплообмінників (HGHE) шляхом регенерації літнього ґрунту за допомогою колекторів PVT. Результати моделювання TRNSYS показали, що регенерація ґрунту влітку з колекторами PVT покращилася на 7 %. Автори всебічно вивчили поєднання відкритих ПБТ з низькорослими горизонтальними наземними теплообмінниками. Результати підтвердили, що інтеграція PVT (26,6 м²) з невеликим полем HGHE (89,7 м²) збільшує сезонний коефіцієнт ефективності (SPF) на 30 % (з 2,4 до 3,4). У роботі вивчали системи теплових насосів з комбінацією гібридних джерел тепла вертикальних наземних теплообмінників та відкритих колекторів PVT. Автори продемонстрували за допомогою систематичного аналізу, що довгострокові охолоджувальні ефекти ВНЕ усуваються сонячною тепловою регенерацією за допомогою колекторів PVT, що призводить до коротших наземних теплообмінників та збільшення на 3-4 К у свердловинах, що забезпечує стійку роботу системи [15, 16].

PVT також можна використовувати як пряме джерело тепла для теплових насосів на боці випарника без будь-якого геотермального джерела, що економить витрати та місце для встановлення ВНЕ або HGHE. Автори виявили, що PVT-колектори з високими коефіцієнтами тепловтрат (c_1 та c_2 відповідно до ISO 9806) можуть працювати як сонячні колектори і як теплообмінники навколишнього середовища і досягати вищої / кращої ефективності системи з прямими комбінаціями PVT-теплових насосів порівняно з PVT-колекторами з нижчими коефіцієнтами теплових втрат [15, 16].

Нещодавно розроблені PVT-колектори з ребристими теплообмінниками для покращення теплообміну між рідиною та навколишнім повітрям підтверджують ці результати і пропонують

альтернативу традиційним тепловим насосам. Зокрема, для прямої комбінації з тепловими насосами без будь-якого додаткового геотермального джерела, як пояснюється в [16].

У статті [16] проведено дослідження з двома різними PVT-системами та шістьма більш класичними системами тепло та енергозабезпечення приватного домогосподарства. Що стосується систем теплових насосів PVT, то колектори PVT використовуються як єдине джерело тепла для теплових насосів або як додаткове джерело тепла із свердловинними теплообмінниками.

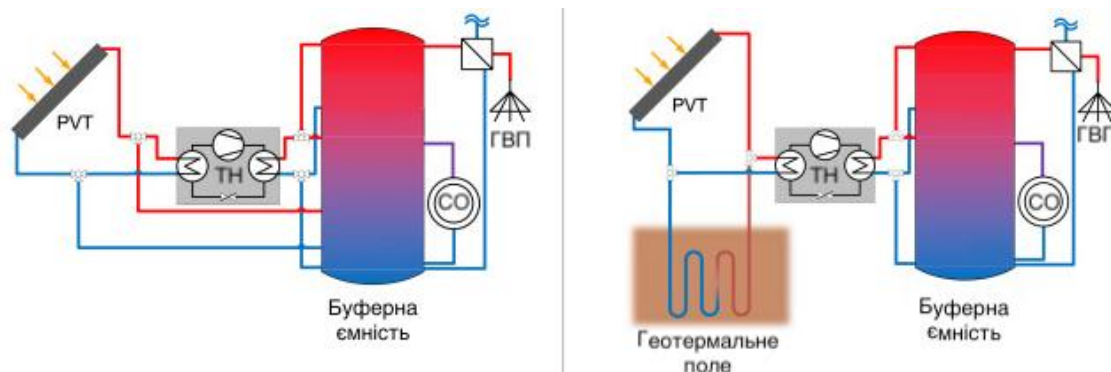


Рисунок 2. Принципова схема поєднання PVT-колектора та теплового насоса [16]

Ліворуч зображено схему з PVT-тепловим насосом, у якого єдиним джерелом теплової енергії є теплообмінник PVT-панелі. Праворуч зображено тепловий насос розсіл-вода, у якого є геотермальний теплообмінник та PVT-панелі є додатковим джерелом тепла.

Інші 6 видів систем це: повітряний ТН; повітряний ТН з PV-панелями; геотермальний ТН; геотермальний ТН з PV-панелями; газовий конденсаційний котел; газовий конденсаційний котел з PV-панелями.

У статті було змодельовано будинок та різні системи його енергозабезпечення. Головним компонентом дослідження стали два різні типи PVT-колекторів. Перший колектор – це відкритий PVT-колектор з ребрами на тильній стороні. Цей колектор розроблений спеціально для застосування в теплових насосах, і його конструкція показана на рис. 3(а). Цей PVT-колектор термічно з'єднаний з ребрами на тильній стороні фотоелемента, що збільшує використання енергії сонця і навколишнього повітря. На додаток до конвективних надходжень тепла в періоди низької освітленості, особливо взимку або вночі, на більшій поверхні ребер відбувається конденсаційне надходження тепла, а також надходження тепла за рахунок фазового переходу в іній, що підвищує теплову потужність колектора і робить його придатним для роботи в якості єдиного джерела тепла теплового насоса. Другий колектор є стандартним відкритим PVT-колектором, рис. 3(б). Обидва PVT-колектори, використані для аналізу чутливості, доступні на ринку. Обидва колектори регулярно розморожуються в обхід теплового насоса за допомогою тепла з буферного накопичувача [16].



Рисунок 3. PVT-колектори [16]

Головними показниками ефективності системи є сезонний коефіцієнт ефективності (seasonal performance factors – SPF), загальне споживання електроенергії, споживання електроенергії з мережі.

Результати моделювання різних систем з дослідження наведені на рис. 4.

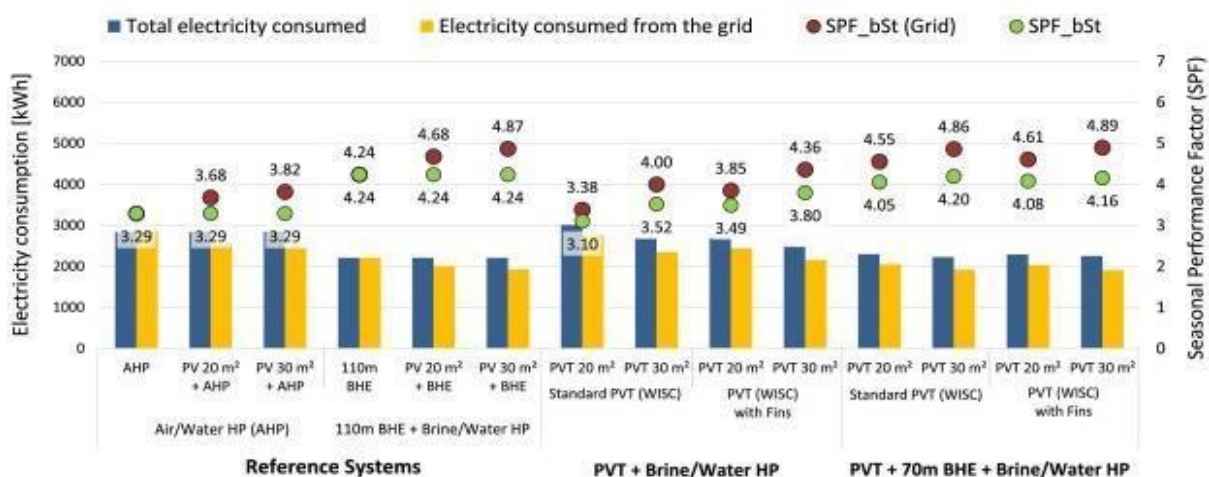


Рисунок 4. SPF різних систем [16]

Примітки: (вісь абсцис праворуч) та відповідне споживання електроенергії (вісь ординат ліворуч), де синім кольором позначено загальне споживання електроенергії системою, а жовтим кольором – електроенергію, спожиту лише з електромережі.

Повітряний тепловий насос досягає SPF 3,29 і SPF(Grid) 3,68 з фотоелектричним колектором площею 20 м² та SPF(Grid) 3,82 з фотоелектричним колектором площею 30 м². Як і очікувалося, ґрунтові теплові насоси досягають значно вищого ККД; наприклад, теплові насоси з теплообмінником у свердловині глибиною 110 м досягають SPF 4,24, а поєднання фотоелектричної системи з геотермальним тепловим насосом збільшує до SPF(Grid) 4,87 за площі фотоелектричних модулів 30 м².

PVT з ребрами як єдине джерело тепла для теплових насосів досягає SPF 3,49 (на 20 м²) і 3,80 (на 30 м²). Враховуючи власне споживання електроенергії, PVT з ребрами може досягати SPF(Grid) 4,36 (за площі 30 м²). Продуктивність системи зі стандартним PVT-колектором на 8–14 % нижча, а для досягнення аналогічних результатів потрібні більші площі. Таким чином, пряме порівняння PVT-теплових насосів з тепловим насосом на повітряному джерелі показує, що PVT-теплові насосні системи є конкурентоспроможною альтернативою цим еталонним системам.

Поєднання PVT і теплових насосів підтверджує ще більш високі коефіцієнти ефективності: завжди залишається вище 4,0 навіть за меншої довжини геотермального теплообмінника (ГТ) (70 м) незалежно від конкретної технології PVT-колектора. SPF(Grid) досягає значень вище 4,85 при 30 м² PVT (обидва колектори) в поєднанні з 70 м ГТ. Таким чином, важливо відзначити, що комбінація PVT з ГТ відкриває можливість зменшити довжину ГТ (на $\approx 35\%$, з 110 м до 70 м), не впливаючи на ефективність системи. Цей аспект стає економічно більш актуальним для великих систем з двома або більше свердловинами. Регенерація підземного джерела, як правило, забезпечує сталу роботу системи і може компенсувати невизначеність планування навіть для невеликих установок [16–19].

Також PVT-панелі можна поєднати з геотермальним тепловим насосом, який має горизонтальний ґрунтовий теплообмінник (ГГТ). Трапляються випадки, коли буріння глибоких свердловин неможливе або економічно недоцільне через геологію ґрунтів. В такому випадку можна використати ГГТ. Для ГГТ необхідна значно більша площа для геотермального поля (ГП), а через недостатню площу можна переморозити ґрунт, що може негативно вплинути на рослинність над ГП. Одним з можливих рішень цієї проблеми є дообладнання системи PVT-панелями, які допоможуть зменшити площу поля та збільшити сезонний коефіцієнт ефективності.

У статті [15] теплові насоси в поєднанні з тепловими ґрунтовими джерелами, такими як ГГТ, є ефективним варіантом для забезпечення потреб в опаленні одно- та багатоквартирних будинків. Однак високий рівень землекористування часто перешкоджає встановленню ГГТ. Поєднання із сонячною тепловою енергією дасть змогу скоротити площу встановлення ГГТ, зберігаючи при цьому високу ефективність системи. У цій роботі досліджується комбінація ГГТ і сонячних теплових колекторів,

причому особлива увага приділяється сонячній тепловій регенерації ґрунту. Це аналізується як за допомогою чисельного моделювання, так і експериментальних досліджень.

На рисунках 5 і 6 представлені сезонні коефіцієнти продуктивності для ґрунту типу суглинок залежно від відстані між трубопроводами та розмірів колектора PVT. Згідно з технічними настановами Німеччини (VDI 4640), за умови ламінарної течії, рекомендована відстань між трубами 0,5 м. На рисунку 5 (перша діаграма) показані результати для системи без рекуперації сонячного тепла. Всі графіки підтверджують, що менша відстань між трубопроводами дозволяє підвищити ефективність в цілому. З діаграм на рис. 5 видно, що зменшення розмірів на 28 % (ГТП з 311 м² до 224 м²) ГТП порівняно з проєктною рекомендацією VDI 4640 може бути допустимим за майже повної відсутності втрат ефективності. На другій діаграмі (рис.5 праворуч) результати для систем, обладнаних колекторами площею 6,7 м². Для того, щоб зосередити увагу на тепловому / регенераційному процесі, вихід електричної енергії від PVT-колектора в розрахунок сезонних коефіцієнтів продуктивності не включається. Зі збільшенням площі PVT-колекторів (рис. 6) описані тенденції продовжуються, доки при 26,6 м² PVT площі колектора критичні умови замерзання повністю усуваються, навіть для найменших змодельованих площ ГТП змодельованих ділянок. При такому розмірі PVT-колектора площа ГТП може бути на 64 % меншою (ГТП від 311 м² до 112 м²), при цьому досягається майже така ж ефективність системи, як і в стандартній системі. Лише 5 % втрати ефективності (SPF з 3,76 до 3,60).

Аналогічні результати отримані для типів ґрунту: пісок, піщано-глинистий ґрунт [15].

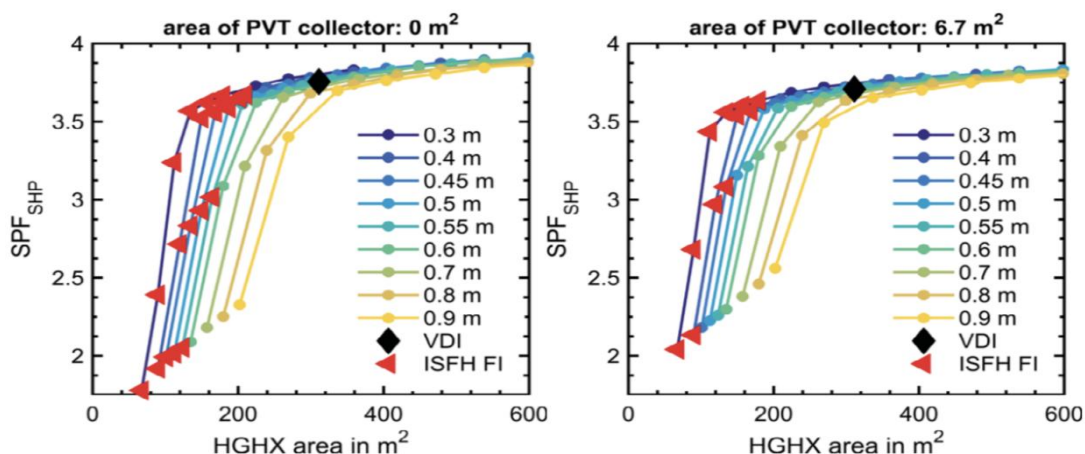


Рисунок 5. Сезонний коефіцієнт продуктивності для ґрунту типу суглинок залежно від площі горизонтального ґрунтового теплообмінника (ГТП або HGHE) за різної відстані між трубами

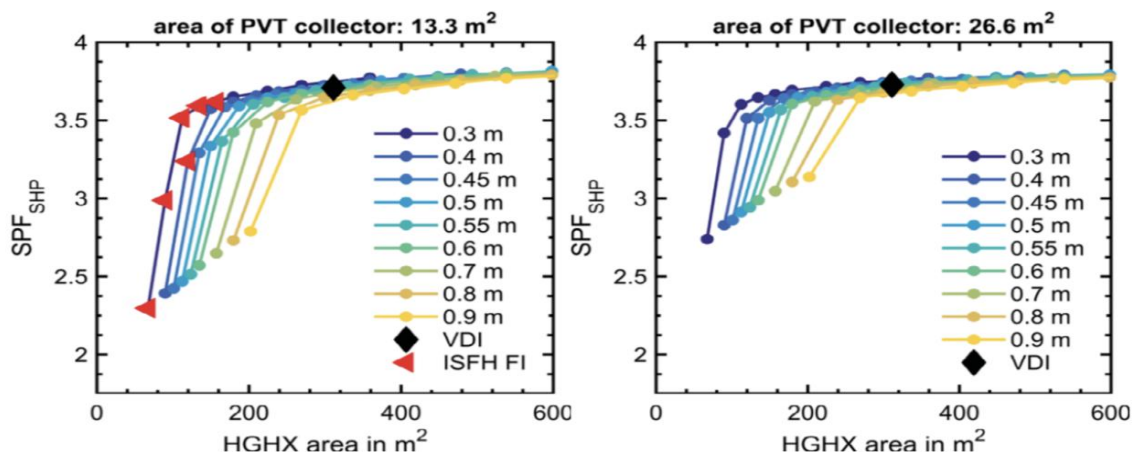


Рисунок 6. Сезонний коефіцієнт продуктивності для ґрунту типу суглинок залежно від площі горизонтального ґрунтового теплообмінника (ГТП або HGHE) за різної відстані між трубами

Моделювання показує, що інтеграція 26,6 м² PVT-колекторів на стороні джерела дозволяє підвищити сезонний коефіцієнт корисної дії малогабаритного ГТП (~29 % від рекомендації VDI),

збільшити з 2,4 до 3,4. Якщо взяти до уваги потенціал когенерації електроенергії фотоелектричними модулями (використовуючи лише електроенергію, отриману з мережі, для розрахунку сезонного коефіцієнта корисної дії), SPF системи може досягати навіть 3,7, що означає, що малогабаритна система ГВП з підтримкою PVT-модулів є такою ж ефективною, як і стандартна конструкція, але на дві третини меншою [15, 20–22].

У статті [23] автори пропонують альтернативну систему опалення для модернізованих односімейних будинків – *L-Sol*, що поєднує **неостеклені PVT-колектори** як єдине джерело тепла з **тепловим насосом типу «розсіл–вода»** (рис.7). Така система пропонується як екологічно чиста і ефективна альтернатива популярним тепловим насосам «повітря–вода», які мають недоліки у вигляді шуму та складності отримання дозволів у міських умовах.

Моделювання системи за допомогою програмного забезпечення Polysun враховує теплову ефективність колекторів, схему акумулювання тепла в «холодному» баку та механізм попереднього нагріву води для ГВП. Параметри порівняння включали в себе системи з льодовими акумуляторами, геотермальними петлями, а також класичну PV-систему з тепловим насосом «повітря–вода».

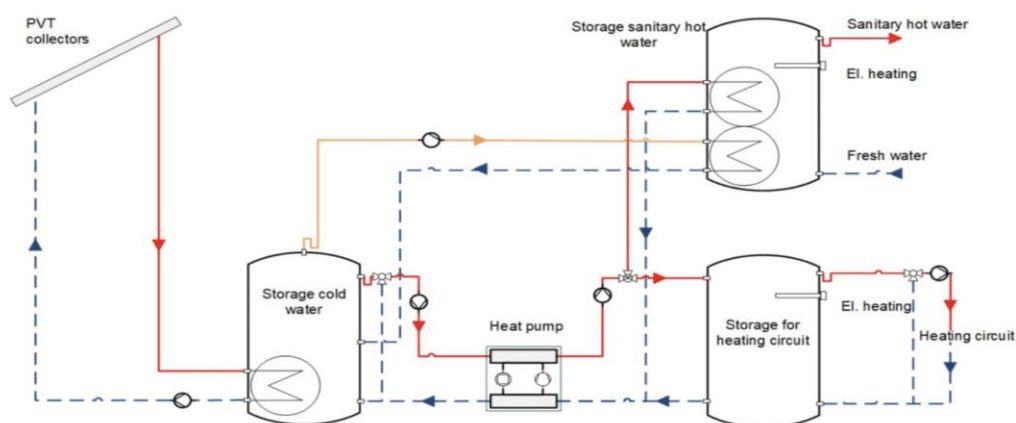


Рисунок 7. Схема системи L-Sol

Система *L-Sol* продемонструвала вищу сезонну ефективність (SPF) порівняно з іншими системами, зокрема на $\approx 20\%$ кращу енергоефективність порівняно з тепловим насосом «повітря–вода». Автори також розглянули можливості оптимізації вартості, зменшуючи кількість модулів до 20 одиниць та використовуючи модернізовані колектори, що дозволило скоротити витрати життєвого циклу системи майже до рівня базової повітряної системи.

Важливою частиною дослідження було моделювання стратегій управління споживанням енергії – зокрема, механізми перегріву акумуляторів ГВП при надлишку PV-генерації, що підвищує рівень самоспоживання. Проте така оптимізація зменшує ефективність теплового насоса через підвищення температур зворотного потоку. Автори показали, що оптимальний компроміс між ефективністю та самоспоживанням досягається при мінімізації електроспоживання з мережі, а не максимізації SPF.

Найкращі результати були отримані при об'ємі холодного акумулятора в 1000 л, бака ГВП – 500 л і бака для опалення – 800 л, з SPF на рівні 3,0–3,3. Оптимізація без перегріву забезпечила найвищу ефективність, у той час як стратегія з перегрівом мінімізувала мережеве споживання [23, 24].

Існують різні типи накопичення енергії в гібридних фотоелектрично-термічних системах, серед яких особливе місце займає акумулювання тепла за допомогою фазозмінних матеріалів (PCM). Це дозволяє зберігати надлишкове тепло, яке генерується під час сонячного випромінювання, та використовувати його пізніше – наприклад, у нічний час або в похмуру погоду. Автори статті [25] досліджують ефективність концентруючої PVT-системи, яка поєднує параболічний концентратор, фотоелектричний модуль, тепловий обмінник та блок теплового акумулювання з PCM. Особливу увагу приділено впливу температури плавлення PCM на теплову ефективність системи, а також її здатність забезпечувати стабільний тепловий потік. У результаті досліджень було виявлено, що найкращу ефективність забезпечує PCM з температурою плавлення $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, яка дозволяє зберігати та передавати

значну кількість теплової енергії. Система демонструє високу термічну стабільність і здатна забезпечити стабільне теплопостачання протягом 3 годин після припинення сонячного випромінювання. Загальний коефіцієнт корисного використання сонячної енергії перевищив 60 %, а електричний ККД фотоелемента зберігався на рівні 12,5 % навіть при високому тепловому навантаженні. Ці результати свідчать про практичну доцільність використання подібних систем у побутових умовах [25–29].

Для українських домогосподарств це означає можливість покращення енергонезалежності, особливо в перехідні сезони, коли денна сонячна активність є обмеженою, а потреба в теплі зберігається. Інтеграція таких систем у комплекси з тепловим насосом може суттєво знизити навантаження на національну енергосистему та забезпечити стаке теплопостачання в умовах кризи.

Серед сучасних підходів до підвищення ефективності гібридних фотоелектрично-термічних систем заслуговує на увагу дослідження М. Sheikholeslami, в якому проаналізовано концентровану PVT-систему із застосуванням парафіну та нанофлюїду з наночастинками вуглецевих нанотрубок. Автор статті досліджує термічну та електричну продуктивність такої системи з урахуванням геометричних особливостей тепловідвідних ребер у парафіновій зоні, що виконує функцію акумулятора тепла. В результаті чисельного моделювання виявлено, що конфігурація «коротка стрілка з широкою основою» забезпечує найвищу ефективність як у тепловому, так і в електричному аспекті. При цьому електрична ефективність (η_{ele}) зростає на 3,72 % зі збільшенням числа Рейнольдса, а корисне тепловиділення – приблизно на 9,58 % завдяки використанню наночастинок MWCNT.

Переваги представленого підходу полягають у можливості ефективного використання всього сонячного спектра завдяки концентруванню випромінювання за допомогою дзеркал, що дозволяє підвищити густину потоку тепла і, відповідно, продуктивність системи. Інтеграція РСМ (парафіну) та нанофлюїдів створює умови для ефективного охолодження фотоелементів, стабілізації температурного режиму й збереження тепла з можливістю його повторного використання. Отже, результати роботи демонструють перспективність застосування концентричних PVT-систем з пасивним накопиченням тепла у майбутніх конструкціях сонячних енергосистем для побутових потреб, особливо в умовах обмеженого простору для встановлення або необхідності збільшення щільності потужності [30–33].

3. Висновки

Огляд сучасних досліджень та публікацій щодо інтеграції теплових насосів із сонячними фотоелектрично-термічними системами свідчить про високу енергоефективність та доцільність їх впровадження в житловому секторі України. Найбільш перспективним рішенням у сучасних умовах енергетичної нестабільності є поєднання PVT-колекторів із геотермальними тепловими насосами, оснащеними вертикальними теплообмінниками.

Таке поєднання має низку ключових переваг. По-перше, вертикальний ґрунтовий теплообмінник дозволяє ефективно скидати надлишкове тепло влітку, регенеруючи температуру ґрунту для зимової експлуатації. По-друге, охолодження PVT-панелей протягом літніх місяців підвищує їхню електричну ефективність. По-третє, така система дозволяє зменшити площу геотермального поля, що знижує витрати на буріння та матеріали. Крім того, при належному проєктуванні можливо досягти повної енергетичної незалежності домогосподарства в літній та перехідні сезони. Це особливо важливо з огляду на стан енергосистеми України, яка потерпає від постійних атак з боку російського агресора.

Сприятливі геологічні умови більшості регіонів України (глибини буріння до 80–120 м без значних кам'янистих порід) створюють реальні технічні передумови для широкого застосування вертикальних геотермальних систем. Масове впровадження таких гібридних систем за підтримки держави у вигляді пільгових кредитів, програм співфінансування або податкових стимулів може не лише забезпечити енергетичну автономність домогосподарств, але й суттєво розвантажити національну електромережу.

Подальшим напрямом дослідження є аналіз сценаріїв масового впровадження подібних систем у приватному секторі України, їх кумулятивного впливу на національну енергетичну безпеку та кліматичні зобов'язання країни.

Посилання

1. Кулик М.М., Малярєнко О.Є., Майстрєнко Н.Ю., Станиціна В.В., Куц Г.О. Енергоефективність та прогнозування енергоспоживання на різних ієрархічних рівнях економіки: методологія, прогнозні оцінки до 2040 року. Київ: НВП «Видавництво “Наукова думка” НАН України», 2021. 234 с. ISBN 978-966-00-1739-9.
2. Малярєнко О., Майстрєнко Н., Станиціна В. Прогноз споживання теплової енергії з урахуванням реалій воєнного часу та повоєнного відновлення (до 2030 року). *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2025. № 1(82). С. 5–22. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2025.01>
3. Дерій В.О., Тєслєнко О.І., Соколовська І.С. Методичний підхід щодо оцінювання потенціалу виробництва теплової енергії теплонасосними установками у разі їх впровадження в регіональних системах централізованого теплопостачання. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2023. № 2(75). С. 44–56. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2023.03>
4. Костєнко Г.П., Запорожець А.О., Запорожець Н.В., Верпєта В.О. Аспекти інтеграції відновлюваної розподіленої генерації в системі енергозабезпечення України. *Проблеми економіки*. 2024. № 2(60). С. 83–93. <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2024-2-83-93>
5. Запорожець А.О. Аналіз засобів моніторингу забруднення повітря навколишнього середовища. *Наукоємні технології*. 2017. № 3(5). С. 242–252. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.35.11844>
6. Бабак В.П. Зміни в структурі енергосистеми та особливості роботи енергоринку в період відновлення України: За матеріалами доповіді на засіданні Президії НАН України 12 червня 2024 року. *Вісник Національної академії наук України*. 2024. № 8. С. 10–16. <https://doi.org/10.15407/visn2024.08.010>
7. Станиціна В.В., Артемчук В.О. Прогнозування споживання електроенергії: сучасні підходи та нові виклики, пов'язані з пандемією COVID-19.
8. Шрайбер О.А., Дубровський В.В., Тєслєнко О.І. Сучасний стан і перспективи розвитку водневої енергетики у світі. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Т. 32(71). № 5. С. 199–209. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/30>
9. Novikov P., Teslenko O., Beldii V., Lenchevsky E., Bunke O. Systems for Energy Accumulation Based on Renewable Sources. In Z. Artemchuk, V. Kharchenko (Eds.). *Systems, Decision and Control in Energy V*. 2023. P. 355–370. Springer, Cham.
10. Тєслєнко О.І., Куц Г.О. Структурні та технологічні напрями зменшення викидів парникових газів підприємствами чорної металургії. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33(72). № 6. С. 165–173. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/27>
11. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 р. № 373-р. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-skhvalennia-enerhetychnoi-stratehii-ukrainy-na-period-do-2050-roku-373r-210423> (дата звернення: 23.08.2025)
12. Chow T.T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy*. 2010. Vol. 87. Iss. 2. P. 365–379. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.037>
13. Wolf M. Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences. *Energy Conversion*. 1976. Vol. 16. Iss. 1-2. P. 79–90. [https://doi.org/10.1016/0013-7480\(76\)90018-8](https://doi.org/10.1016/0013-7480(76)90018-8)
14. Khan J., Arsalan M. H. Solar power technologies for sustainable electricity generation – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 55. P. 414–425. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.135>
15. Hüsing F., Hirsch H., Rockendorf G. Combination of solar thermal collectors and horizontal ground heat exchangers as optimized source for heat pumps. *Proceedings of EuroSun 2016: International Conference on Solar Energy and Buildings* (2016, October 11–14, Palma de Mallorca, Spain). <https://doi.org/10.18086/eurosun.2016.04.18>
16. Chhugani B., Pärish P., Helmling S., Giovannetti F. Comparison of PVT – heat pump systems with reference systems for the energy supply of a single-family house. *Solar Energy Advances*. 2023. Vol. 3. <https://doi.org/10.1016/j.seja.2022.100031>
17. Hengel F., Heschl C., Inschlag F., Klanatsky P. System efficiency of PVT collector-driven heat pumps. *International Journal of Thermofluids*. 2020. Vol. 5. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100034>
18. Lämmle M. Thermal management of PVT collectors: development and modelling of highly efficient glazed, flat plate PVT collectors with low emissivity coatings and overheating protection: PhD Thesis. Freiburg: Universität Freiburg, 2018. 227 p.
19. Bertram E. Solar assisted heat pump systems with ground heat exchanger: simulation studies. *Energy Procedia*. 2014. Vol. 48. P. 505–514. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.060>
20. Verein Deutscher Ingenieure. VDI: Guideline VDI 4640. Part 2. Thermal use of the underground – Ground source heat pump systems: draft 05/2015. Düsseldorf, 2015. (VDI-Richtlinien).

21. Pärish P., Mercker O., Warmuth J., Tepe R., Bertram E., Rockendorf G. Investigations and model validation of a ground-coupled heat pump for the combination with solar collectors. *Applied Thermal Engineering*. 2014. Vol. 62. Iss. 2. P. 375–381. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.09.016>
22. Helbig S., Kirchner M., Giovannetti F., Lampe C., Littwin M., Kastner O. PVT-Kollektoren als bisolare Wärmepumpenquelle – Ein Simulationsvergleich zwischen Polysun und TRNSYS. Symposium Thermische Solarenergie. 2018.
23. Schubert M., Hunziker M., Sauter D., Sperr N., Rohrer J. L-Sol – heating system with PVT-collectors as single heat source for a brine-water heat pump. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1343. Art. 012081. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012081>
24. Lehmann M., Meyer M., Kaiser N., Ott W. Umstieg von fossilen auf erneuerbare Energieträger beim Heizungsersatz. Zürich: Energieforschung Stadt Zürich, 2017. URL: https://energieforschung-zuerich.ch/media/topics/report/FP-2.8_Zusammenfassung.pdf (Last accessed: 05.09.2025).
25. Beragama Jathunge C., Dworkin S. B., Wemhöner C., Mwesigye A. Performance investigation of a solar-assisted ground source heat pump system coupled with novel offset pipe energy piles and solar PVT collectors for cold climate applications. *Applied Thermal Engineering*. 2025. Vol. 265. Article 125568. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125568>
26. Rad F. M., Fung A. S., Leong W. H. Feasibility of combined solar thermal and ground source heat pump systems in cold climate, Canada. *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 61. P. 224–232. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.036>
27. Emmi G., Zarrella A., De Carli M., Galgaro A. An analysis of solar assisted ground source heat pumps in cold climates. *Energy Conversion and Management*. 2015. Vol. 106. P. 660–675. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.016>
28. Bandaru S. H., Becerra V., Khanna S., Radulovic J., Hutchinson D., Khusainov R. A review of photovoltaic thermal (PVT) technology for residential applications: performance indicators, progress, and opportunities. *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 13. Article 3853. <https://doi.org/10.3390/en14133853>
29. Valancius R., Singh R. M., Jurelionis A., Vaiciunas J. A review of heat pump systems and applications in cold climates: Evidence from Lithuania *Energies*. 2019. Vol. 12. Iss. 22. Article 4331. <https://doi.org/10.3390/en12224331>
30. Sheikholeslami M. Numerical investigation for concentrated photovoltaic solar system in existence of paraffin equipped with MWCNT nanoparticles. *Sustainable Cities and Society*. 2023. Vol. 99. Article 104901. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104901>
31. Abu-Hamdeh N. H., Khoshaim A., Alzahrani M. A., Hatamleh R. I. Study of the flat plate solar collector's efficiency for sustainable and renewable energy management in a building by a phase change material: Containing paraffin-wax/Graphene and paraffin-wax/graphene oxide carbon-based fluids. *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 57. Article 104804. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104804>
32. Simón-Allué R., Guedea I., Coca-Ortegón A., Villén R., Brun G. Performance evaluation of PVT panel with phase change material: Experimental study in lab testing and field measurement. *Solar Energy*. 2022. Vol. 241. P. 738–751. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.035>
33. Carmona M., Palacio Bastos A., Doria García J. Experimental evaluation of a hybrid photovoltaic and thermal solar energy collector with integrated phase change material (PVT-PCM) in comparison with a traditional photovoltaic (PV) module. *Renewable Energy*. 2021. Vol. 172. P. 680–696. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.022>

References

1. Kulyk, M.M., Malyarenko, O.Ye., Maistrenko, N.Yu., Stanytsina, V.V., & Kuts, H.O. (2021). *Energy efficiency and forecasting of energy consumption at different hierarchical levels of the economy: Methodology, forecast estimates until 2040*. Kyiv: Scientific Publishing House “Naukova Dumka” of NAS of Ukraine [in Ukrainian].
2. Malyarenko, O., Maistrenko, N., & Stanytsina, V. (2025). Forecast of heat energy consumption considering wartime realities and post-war recovery (until 2030). *Energy Technologies and Resource Saving*, 1(82), 5–22 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2025.01>
3. Derii, V.O., Teslenko, O.I., & Sokolovska, I.S. (2023). Methodical approach to estimating the potential of thermal energy production by heat pump plants in case of their implementation in regional district heating systems. *Energy Technologies and Resource Saving*, 2(75), 44–56. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2023.03>
4. Kostenko, H.P., Zaporozhets, A.O., Zaporozhets, N.V., & Verpeta, V.O. (2024). Aspects of integrating renewable distributed generation into the energy supply system of Ukraine. *The Problems of Economy*, 2(60), 83–93 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2024-2-83-93>
5. Zaporozhets, A.O. (2017). Analysis of means for monitoring air pollution in the environment. *Science-Based Technologies*, 3(5), 242–252 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.35.11844>
6. Babak, V.P. (2024). Changes in the structure of the power system and peculiarities of the energy market in the period of Ukraine's recovery: According to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of the NAS of Ukraine, June 12, 2024. *Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 8, 10–16 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/visn2024.08.010>

7. Stanytsina, V.V., & Artemchuk, V.O. (n.d.). Forecasting electricity consumption: Modern approaches and new challenges related to the COVID-19 pandemic.
8. Shraiber, O.A., Dubrovskiy, V.V., & Teslenko, O.I. (2021). Current state and prospects of hydrogen energy development in the world. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences*, 32(71), 199–209 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/30>
9. Novikov, P., Teslenko, O., Beldii, V., Lenchevsky, E., & Bunke, O. (2023). Systems for energy accumulation based on renewable sources. In Z. Artemchuk, V. Kharchenko (Eds.), *Systems, Decision and Control in Energy V* (pp. 355–370). Springer, Cham.
10. Teslenko, O.I., & Kuts, H.O. (2022). Structural and technological directions of reducing greenhouse gas emissions by ferrous metallurgy enterprises. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences*, 33(72), 165–173 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/27>
11. On the approval of the Energy Strategy of Ukraine until 2050. Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated April 21, 2023 No. 373-r. Retrieved August 23, 2025, from <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-skhvalennia-enerhetychnoi-stratehii-ukrainy-na-period-do-2050-roku-373r-210423> [in Ukrainian].
12. Chow, T. T. (2010). A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy*, 87(2), 365–379. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.037>
13. Wolf, M. (1976). Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences. *Energy Conversion*, 16(1-2), 79–90. [https://doi.org/10.1016/0013-7480\(76\)90018-8](https://doi.org/10.1016/0013-7480(76)90018-8)
14. Khan, J., & Arsalan, M. H. (2016). Solar power technologies for sustainable electricity generation – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 414–425. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.135>
15. Hüsing F., Hirsch H., & Rockendorf G. (2016, October 11–14). *Combination of solar thermal collectors and horizontal ground heat exchangers as optimized source for heat pumps. Proceedings of EuroSun 2016: International Conference on Solar Energy and Buildings*. Palma de Mallorca, Spain. <https://doi.org/10.18086/eurosun.2016.04.18>
16. Chhugani, B., Pärish, P., Helmling, S., & Giovannetti, F. (2023). Comparison of PVT – heat pump systems with reference systems for the energy supply of a single-family house. *Solar Energy Advances*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.seja.2022.100031>
17. Hengel, F., Heschl, C., Inschlag, F., & Klanatsky, P. (2020). System efficiency of PVT collector-driven heat pumps. *International Journal of Thermofluids*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100034>
18. Lämmle, M. (2018). *Thermal management of PVT collectors: development and modelling of highly efficient glazed, flat plate PVT collectors with low emissivity coatings and overheating protection: PhD Thesis*. Freiburg: Universität Freiburg.
19. Bertram, E. (2014). Solar assisted heat pump systems with ground heat exchanger: simulation studies. *Energy Procedia*, 48, 505–514. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.060>
20. VDI: Guideline VDI 4640. Part 2. Thermal use of the underground – Ground source heat pump systems: draft 05/2015. Verein Deutscher Ingenieure. Düsseldorf, 2015. (VDI-Richtlinien).
21. Pärish, P., Mercker, O., Warmuth, J., Tepe, R., Bertram, E., & Rockendorf, G. (2014). Investigations and model validation of a ground-coupled heat pump for the combination with solar collectors. *Applied Thermal Engineering*, 62(2), 375–381. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.09.016>
22. Helbig, S., Kirchner, M., Giovannetti, F., Lampe, C., Littwin, M., & Kastner, O. (2018). *PVT-Kollektoren als bisolare Wärmepumpenquelle – Ein Simulationsvergleich zwischen Polysun und TRNSYS*. Symposium Thermische Solarenergie.
23. Schubert, M., Hunziker, M., Sauter, D., Sperr, N., & Rohrer, J. (2019). L-Sol – heating system with PVT-collectors as single heat source for a brine-water heat pump. *Journal of Physics: Conference Series*, 1343. 012081. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012081>
24. Lehmann, M., Meyer, M., Kaiser, N., & Ott, W. (2017). *Umstieg von fossilen auf erneuerbare Energieträger beim Heizungsersatz*. Zürich: Energieforschung Stadt Zürich. Retrieved September 5, 2025, from https://energieforschung-zuerich.ch/media/topics/report/FP-2.8_Zusammenfassung.pdf
25. Beragama Jathunge, C., Dworkin, S. B., Wemhöner, C., & Mwesigye, A. (2025). Performance investigation of a solar-assisted ground source heat pump system coupled with novel offset pipe energy piles and solar PVT collectors for cold climate applications. *Applied Thermal Engineering*, 265, 125568. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125568>
26. Rad, F. M., Fung, A. S., & Leong, W. H. (2013). Feasibility of combined solar thermal and ground source heat pump systems in cold climate, Canada. *Energy and Buildings*, 61, 224–232. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.036>
27. Emmi, G., Zarrella, A., De Carli, M., & Galgaro, A. (2015). An analysis of solar assisted ground source heat pumps in cold climates. *Energy Conversion and Management*, 106, 660–675. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.016>
28. Bandaru, S.H., Becerra, V., Khanna, S., Radulovic, J., Hutchinson, D., & Khusainov, R. (2021). A review of photovoltaic thermal (PVT) technology for residential applications: performance indicators, progress, and opportunities. *Energies*, 14(13), 3853. <https://doi.org/10.3390/en14133853>
29. Valancius, R., Singh, R. M., Jurelionis, A., & Vaiciunas J. (2019). A review of heat pump systems and applications in cold climates: Evidence from Lithuania *Energies*, 12(22), 4331. <https://doi.org/10.3390/en12224331>

30. Sheikholeslami, M. (2023). Numerical investigation for concentrated photovoltaic solar system in existence of paraffin equipped with MWCNT nanoparticles. *Sustainable Cities and Society*, 99, 104901. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104901>
31. Abu-Hamdeh, N. H., Khoshaim, A., Alzahrani, M. A., & Hatamleh, R. I. (2022). Study of the flat plate solar collector's efficiency for sustainable and renewable energy management in a building by a phase change material: Containing paraffin-wax/Graphene and paraffin-wax/graphene oxide carbon-based fluids. *Journal of Building Engineering*, 57, 104804. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104804>
32. Simón-Allué, R., Guedea, I., Coca-Ortegón, A., Villén, R., & Brun, G. (2022). Performance evaluation of PVT panel with phase change material: Experimental study in lab testing and field measurement. *Solar Energy*, 241, 738–751. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.035>
33. Carmona, M., Palacio Bastos, A., & Doria García, J. (2021). Experimental evaluation of a hybrid photovoltaic and thermal solar energy collector with integrated phase change material (PVT-PCM) in comparison with a traditional photovoltaic (PV) module. *Renewable Energy*, 172, 680–696. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.022>

INTEGRATION OF HEAT PUMPS WITH SOLAR PVT SYSTEMS: MODERN TECHNOLOGIES, EFFICIENCY, AND PROSPECTS FOR IMPLEMENTATION IN HOUSEHOLDS

Dmytro Kulyda, <https://orcid.org/0009-0004-4292-1569>

General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha St., Kyiv, 03150, Ukraine
e-mail: dimakulyda009@gmail.com

Abstract. Amid the energy crisis in Ukraine and the instability of centralized energy supply, the strategic importance of developing decentralized renewable energy sources is growing. Increasing attention is being paid to hybrid autonomous energy systems, particularly the combination of heat pumps and photovoltaic-thermal (PVT) panels. This integration enables comprehensive coverage of household heat and electricity demands while reducing dependence on gas and centralized grids. The aim of this article is to review modern design solutions of PVT systems, their operating principles, advantages, and challenges in integration with heat pumps. The paper substantiates the role of such systems in enhancing energy efficiency and energy autonomy of private households in Ukraine. A photovoltaic-thermal (PVT) collector combines a solar thermal collector and a photovoltaic module in a single unit, simultaneously generating heat and electricity. These collectors can serve as a heat source for brine-water heat pumps, increasing the seasonal performance factor (SPF) and reducing the need for deep drilling of ground heat exchangers. The article examines various configurations of PVT and heat pump integration (series and parallel circuits, uncovered and covered collectors) and optimal thermal-to-electric capacity ratios adapted to Ukrainian conditions. System modeling demonstrated competitive performance of hybrid configurations: for example, a PVT-HP system with a finned collector can achieve $SPF \approx 3.5\text{--}3.8$ (for $20\text{--}30\text{ m}^2$ of panels) and $SPF(\text{Grid})$ up to ~ 4.4 . Combining PVT with a geothermal source further increases efficiency ($SPF > 4.0$) with reduced borehole depth ($\sim 70\text{ m}$), and under drilling constraints helps reduce the area of horizontal heat exchangers while improving overall system performance. Based on the analysis of recent international and domestic studies, the article provides an analytical summary to assess the feasibility and prospects of implementing combined PVT-HP systems in Ukraine's residential sector.

Keywords: PVT system; photovoltaic-thermal collector; renewable energy sources; decentralized energy supply; energy efficiency; energy autonomy.

Надійшла до редколегії: 30.07.2025