

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ ЗА РАХУНОК РІЗНИХ СПОСОБІВ ОХОЛОДЖЕННЯ

Отримано 14 трав. 2026 р.; рекомендовано до публікації 26 чер. 2026 р.  
Доступно онлайн 30 чер. 2026 р.

**Юрченко М. М.**

Автор для кореспонденції: Юрченко Максим,  
e-mail: iurchenko.m.nas@ukr.net

аспірант

<https://orcid.org/0009-0000-7307-6039>

Інститут відновлюваної енергетики НАН  
України, м. Київ, Україна

**Анотація.** У статті розглянуто вплив температури на ефективність роботи фотоелектричних модулів та проаналізовано способи їх охолодження. Показано, що підвищення робочої температури сонячних панелей призводить до зниження напруги, вихідної потужності та прискорення деградації фотоелектричних елементів, також зазначено, що для зниження робочої температури й підвищення ефективності використовуються різні підходи. Представлено огляд різних способів охолодження для підвищення продуктивності фотоелектричних панелей – пасивні, активні та комбіновані системи охолодження фотоелектричних систем з використанням повітря, води, матеріалів з фазовим переходом і нанорідин як робочих агентів та інші способи. Залежно від цілей використання доречно застосовувати відповідний спосіб з метою підвищення ефективності роботи фотоелектричних модулів та/або додаткового виробництва теплової енергії. У результаті встановлено, що універсального способу охолодження фотоелектричних модулів не існує, а вибір оптимальної системи охолодження повинен здійснюватися з урахуванням кліматичних, конструктивних, економічних та експлуатаційних факторів.

**Ключові слова:** сонячна енергія, способи охолодження фотоелектричних систем, підвищення ефективності фотоелектричних систем, продуктивність, пасивне охолодження, активне охолодження, PVT.

### Перелік використаних позначень та скорочень

PV – photovoltaic (фотоелектричні)

PVT – photovoltaic thermal (фотоелектричні теплові)

V – напруга

I – струм

STC – Standard Test Conditions (стандартні тестові умови)

NOCT – Normal Operating Cell Temperature (номінальна робоча температура сонячного елемента)

PCM – phase change materials (фазозмінні матеріали)

**Вступ.** Один з найпоширеніших видів відновлюваної енергії – сонячна енергія. Її перевагами є легкодоступність у багатьох місцях, низькі експлуатаційні витрати й можливість використання в невеликих децентралізованих системах енергопостачання [1].

Перетворення сонячної енергії на електричну здійснюється за допомогою фотоелектричних (PV) сонячних елементів. Однак сонячне випромінювання, яке поглинається, але не перетворюється на електрику, сприяє підвищенню температури сонячних елементів, таким чином знижуючи ефективність їх перетворення [2].

Сонячні панелі випробовуються за стандартних тестових умов (STC): 1000 Вт/м<sup>2</sup> падаючого сонячного випромінювання, температура фотоелементів 25 °С, швидкість вітру 0 м/с, спектр сонячного випромінювання повітряної маси 1,5. Стандартні тестові

умови STC рідко існують у реальних зовнішніх умовах, зокрема, температура сонячної панелі буде набагато вищою, особливо в жаркому кліматі. Тому характеристики сонячних панелей при STC не можуть бути використані для оцінки фактичної продуктивності та виробництва електричної енергії фотоелектричної системи в реальних умовах [3].

Під час роботи, особливо в спекотну погоду, сонячні панелі нагріваються. Підвищення температури поверхні сонячного модуля негативно впливає на його техніко-експлуатаційні характеристики [4]. Ця залежність описується температурними коефіцієнтами напруги та струму. Оптимальною температурою для експлуатації фотоелементів вважається 25 °С. За температури вище оптимальної напруга холостого ходу зменшується, а струм короткого замикання незначно підвищується [3]. На рисунку для прикладу наведена вольт-амперна

характеристика сонячної панелі одного із сучасних виробників за різних температур фотоелектричних модулів.

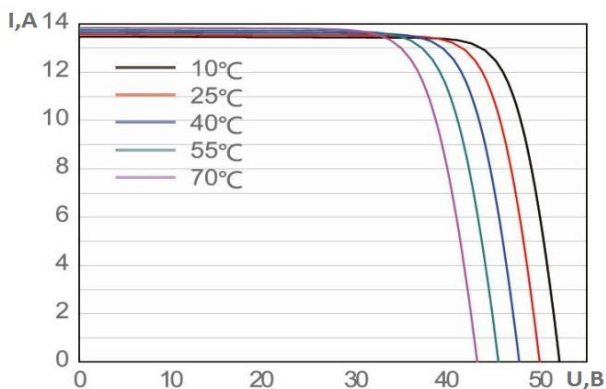


Рисунок. Вольт-амперна характеристика сонячної панелі JAM72S30-540/MR за різних температур

Щоб оцінити роботу сонячних панелей за умов наближених до реальності, були прийняті додаткові параметри, а саме температура, що відповідає типовим умовам експлуатації NOCT (Normal Operating Cell Temperature) – номінальна робоча температура сонячного елемента.

Номінальна робоча температура сонячного елемента NOCT вимірюється за сонячної інтенсивності  $800 \text{ Вт/м}^2$ , температури повітря  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  та швидкості вітру  $1 \text{ м/с}$ . Чим нижча температура NOCT, тим краще працюватиме модуль у реальних умовах. NOCT не є умовою для експлуатації сонячної панелі, однак це один з важливих параметрів для оцінки якості фотоелектричного модуля. Характеристики наведені при NOCT дають змогу отримати точніше уявлення про те, якою буде температура панелі та її характеристики в реальних умовах експлуатації [3].

Також одним з факторів, що впливає на зниження ефективності роботи фотоелементів та сонячних панелей є їх деградація. Деградація – це процес погіршення характеристик сонячних модулів з плином часу, поступове зниження якості, руйнування внаслідок зовнішнього впливу і часу. З часом вироблення електроенергії повільно зменшується [5].

Під час експлуатації монокристалічні та полікристалічні фотоелектричні елементи втрачають ефективність у середньому зі швидкістю  $1 \%$  щороку. Виробники зазвичай гарантують близько  $90 \%$  продуктивності до перших десяти років і  $80 \%$  – до  $25\text{--}30$  років роботи. Однак останні дослідження показують, що монокристалічні панелі, виготовлені після 2000 року, можуть деградувати зі швидкістю всього  $0,4 \%$  на рік. Виробники заявляють термін служби сонячних панелей  $20\text{--}25$  років [4].

Одна з причин деградації сонячних панелей – агресивна дія навколишнього середовища, а саме:

- перегрів сонячних панелей;

- постійний вплив зміни температур, який призводить до утворення мікротріщин, що викликає погіршення електричних з'єднань;
- сильні пориви вітру, що викликають підвищення динамічних і механічних навантажень;
- вологість, сніг і лід, які повільно сприяють старінню батареї [6].

Таким чином, підвищення температури негативно впливає на ефективність перетворення сонячного світла на електричну енергію. Перегрів призводить до зниження напруги, яка генерується фотоелементами, що, відповідно, зменшує вихідну потужність системи, а також прискорює деградацію фотоелектричних модулів – погіршення характеристик фотоелементів з плином часу.

**Способи охолодження фотоелектричних модулів.** Існують різноманітні способи охолодження сонячних панелей, які призначені для відведення надлишкового тепла та зниження температури панелей. У результаті можна розраховувати на збільшення виробництва електроенергії.

Способи охолодження фотоелектричних модулів можна умовно поділити на пасивні та активні, а також комбіновані (гібридні) [7]:

- пасивні – не потребують додаткового джерела енергії (наприклад, конструктивні рішення, обрешетка, радіаційне / спектральне охолодження, фазозмінні матеріали PCM);
- активні – передбачають використання допоміжного обладнання й витрату додаткової енергії (наприклад, примусове охолодження повітрям, рідинне охолодження, спрей-схеми, термоелектричні охолоджувачі);
- комбіновані (або гібридні) – поєднують пасивні та активні підходи або поєднують охолодження з корисним відбором тепла й генерацією додаткової енергії (наприклад, PVT-системи).

Кожен спосіб має свої переваги та обмеження, які залежать від кліматичних умов, типу системи, бюджету та масштабу застосування, що, відповідно, визначає його доцільність у конкретних умовах експлуатації.

**Пасивні способи охолодження** не потребують зовнішніх джерел енергії та ґрунтуються на природних фізичних процесах, таких як конвекція, теплопровідність або радіаційне випромінювання. Пасивне охолодження здійснюється лише за рахунок конструкційних особливостей [8].

Найпоширенішими технологіями є:

- природна конвекція – охолодження завдяки руху повітря навколо PV-модуля;

- конструктивні рішення – оребрення на задній поверхні фотомодуля, тонкоплівкові теплопровідні підкладки, вентиляційні зазори й оптимізована геометрія монтажу;
- теплоаккумуляція – інтеграція в конструкцію фотомодуля фазозмінних матеріалів (PCM);
- радіаційне охолодження за рахунок спеціальних покриттів.

Пасивні способи вважаються економічно доцільними завдяки простоті реалізації та відсутності додаткових енергетичних витрат. Проте їхня ефективність обмежена різними умовами.

До конструктивних рішень для охолодження сонячних панелей відносять: ребра, підкладки, зазори. Прості конструктивні поліпшення часто дають економічно обґрунтований приріст ефективності: додаткові алюмінієві ребра / радіатори на задній поверхні, тонкоплівкові теплопровідні шари, а також забезпечення вентиляційного зазору між модулем і кронштейном – усе це збільшує площу теплообміну та сприяє інтенсифікації природної конвекції. Досліди показують, що такі заходи можуть знизити локальні температури на декілька градусів (5–12 °C) і забезпечити стабільний, хоч і невеликий, приріст електрогенерації [9].

Радіаційне охолодження за рахунок спеціальних покриттів спирається на випромінювання в оточуюче середовище, завдяки чому поверхня фотоелектричного модуля охолоджується без додаткових витрат енергії. Для PV-модулів є важливий нюанс – покриття мають бути спектрально-селективними: висока прозорість у видимому та ближньому інфрачервоному спектрі, щоб не зменшувати генерацію. Також високий ступінь випромінювання в середньому і довгохвильовому інфрачервоному спектрі, щоб віддавати тепло. Експериментальні дослідження продемонстрували, що PDMS-плівки з пірамідальною текстурою можуть знижувати робочу температуру кремнієвих комірок на 5–15 °C за стандартної інсоляції, що відповідає помітному приросту електричної потужності [10].

Інтеграція в конструкцію фотомодуля фазозмінних матеріалів (PCM) дає змогу акумулювати надлишок теплової енергії в періоди пікової інсоляції за рахунок ентальпії плавлення, з подальшою поступовою віддачею її вночі. Роль PCM у PV-конструкціях – вирівнювання піків температури, зниження амплітуди денних коливань і тимчасова підтримка сприятливішого температурного режиму для фотоелементів. Також застосування PCM (органічних парафінів, соляних гідратів) у поєднанні з наноаповнювачами (металеві чи оксидні наночастинки) може збільшити теплопровідність і покращити швидкість відводу тепла, що підвищує ефективність PCM-рішення в реальних умовах. Проте ефективність сильно залежить від правильного вибору температури плавлення PCM, теплоємності та регенеративних властивостей вибраного матеріалу [11].

Пасивні способи охолодження PV-модулів являють собою привабливу й економічну можливість для зниження робочих температур без додаткових енергетичних витрат. Проте універсальної стратегії не існує. Радіаційні покриття працюють краще в сухих регіонах з малим покривом хмар і високою оптичною прозорістю атмосфери. PCM-матеріали дають найкращий результат у регіонах з чітко вираженими денними коливаннями температури. А конструктивні рішення найекономічніші для великих масивів, де вартість матеріалів відіграє головну роль. Ключовими обмеженнями пасивних систем є: залежність від метеоумов, деградація покриттів під ультрафіолетовим випромінюванням, обмежена циклічна стійкість PCM-матеріалів та проблеми інтеграції з існуючими панелями. Під час вибору слід оцінювати пасивні рішення охолодження з урахуванням локального клімату, архітектурних обмежень та вартості життєвого циклу системи.

Також одним з найменш досліджених аспектів температурного режиму фотоелектричних модулів є безпосередній вплив орієнтації сонячних панелей на її робочу температуру. Зазвичай орієнтацію сонячної панелі розглядають як спосіб максимізації поглинання сонячного випромінювання, при цьому не звертаючи уваги на її температуру за різних кутів нахилу та азимутальних напрямків. Тим часом орієнтація визначає не лише кількість радіації, що потрапляє на панель, але й характер конвективного охолодження, кут падіння прямого випромінювання та добову зміну теплового режиму фотоелектричних модулів [21]. Так, для умов північної півкулі оптимальною з погляду максимальної річної генерації вважається південна орієнтація фотоелектричних модулів. У цьому разі максимальна інсоляція спостерігається в полуденні години, коли Сонце має найбільшу висоту над горизонтом. Проте саме концентрація сонячного випромінювання в обідній період формує найінтенсивніше теплове навантаження. У літній період температура поверхні панелей у разі південної орієнтації може досягати 60–70 °C навіть за температури повітря 30 °C. Такі умови супроводжуються значними температурними втратами потужності [22].

Отже, для зменшення температури фотоелектричного модуля слід також проводити аналіз та вибір оптимального кута нахилу та азимутального напрямку для конкретних умов розміщення та регіону.

**Активні способи охолодження** використовують допоміжне обладнання та передбачають витрату додаткової енергії. У порівнянні з пасивними підходами, активні способи дають більшу різницю температур між охолоджуючим теплоносієм та модулем, але потребують енергоспоживання, складнішого обладнання та регулярного обслуговування. Тому вибір конкретного рішення вимагає аналізу витрати та вигоди у кожному випадку застосування [12].

До активних способів охолодження PV-модулів відносять:

- повітряне примусове охолодження з використанням вентиляторів;
- рідинне охолодження – циркуляція води або нанорідини через теплообмінні канали;
- системи з активним охолодженням PCM;
- рідинне охолодження з розпиленням води, спреї-системи.

Кожен варіант має свої інженерні особливості: повітряні схеми простіші й дешевші, рідинні – ефективніші для передачі теплоти, а спреї-системи дають найшвидше локальне охолодження за наявності водних ресурсів [13].

Повітряне примусове охолодження – найпростіший з активних підходів, який підвищує коефіцієнт теплообміну й знижує робочу температуру фотоелементів. Його переваги: простота інтеграції та невисока вартість установки для невеликих систем [14]. Недоліки: енергоспоживання вентиляторів та зниження корисного приросту електроенергії, що може призвести до невігідного співвідношення споживання й отриманої вигоди. Дослідження підкреслюють, що повітряні схеми доцільні там, де енергоспоживання вентиляторів невелике або вони можуть житися частково від самої PV-системи [7].

Рідинні системи охолодження – основний практичний спосіб активного охолодження. Вода або модифікований теплоносіє прокачується через канали на задній поверхні або через колектори, забезпечуючи високу швидкість відведення тепла завдяки великій теплоємності рідини. Розрахунки та експериментальні випробування показують, що водяне охолодження зменшує температуру на десятки градусів у порівнянні з панелями без охолодження та істотно підвищує вихід генерованої електричної енергії [12].

Також для охолодження використовують нанорідини (nanofluids) – рідини з додаванням наночастинок у теплоносіє, що впливають на підвищення теплопровідності теплоносія та ефективність теплообміну. Дослідження показують, що нанорідини (наприклад, на основі оксидів металів) покращують теплоперенос і можуть знизити температуру PV-модуля більше, ніж звичайна вода при тих самих гідравлічних умовах. Проте слід враховувати такі недоліки, як агрегація, підвищення гідравлічного опору й довговічності суспензій нанорідин [15].

У спреї-системах застосовується розпилювання води по задній поверхні фотомодуля або організується тонка водяна плівка з випаровуванням. Це дуже ефективний спосіб, особливо в сухому кліматі. Оскільки випаровування поглинає значну кількість теплоти під час фазового переходу, локальне охолодження помітно при порівняно невеликому обсязі води. Проте такий спосіб має недоліки – витрати водних ресурсів, відкладення солей та необхідність фільтрації води [16].

Під час вибору активних систем охолодження ключовим при оцінці є співвідношення між корисним приростом електроенергії та витратами на живлення самої систем охолодження. У практичних дослідженнях водяне та спреї-охолодження показують найвище зниження температури і, відповідно, найбільший приріст виробітку, але й більші витрати в експлуатації та на необхідне обладнання – вентилятори, насоси, фільтри, водозабезпечення [12].

**Комбіновані (або гібридні) системи** поєднують переваги обох підходів, пасивного та активного способів охолодження, або ж поєднують охолодження з корисним тепловідбором (PVT-системи). Такий підхід дає змогу одночасно охолоджувати панелі й використовувати відведене тепло для побутових чи промислових потреб, що підвищує сумарну ефективність систем [17].

Комбіновані системи охолодження PV-модулів можуть бути реалізовані по-різному:

- поєднання пасивних та активних способів – наприклад, тепловідвідні ребра або спектральне покриття та рідинний контур;
- охолодження з використанням тепла (PVT-модулі) – модуль одночасно виробляє електроенергію, а відведене тепло використовується для нагріву води, опалення чи технологічних процесів [18].

Обидва підходи спрямовані на підвищення загальної енергоефективності установки.

До комбінації пасивних і активних підходів належать, наприклад, системи, які застосовують спектрально-селективне покриття або PCM (фазозмінні матеріали), до яких додають водяний контур або спреї-систему лише в періоди пікового нагріву. Такий підхід дає змогу скоротити час і енерговитрати активного охолодження, підвищуючи ефективність.

Гібридні PVT-системи з утилізацією тепла поєднують фотоелектричну генерацію з тепловим відбором [19]. Теплоносіє, що циркулює під PV-модулем, відводить тепло, знижує температуру панелі та передає теплову енергію на корисне споживання. Такі системи дають змогу значно підвищити сумарну ефективність за рахунок виробництва електричної й теплової енергії одночасно. Результати випробувань PVT-систем показали, що підвищення сумарної енергоефективності може становити 15–25 % порівняно з окремою PV-панеллю без охолодження [20].

Під час вибору конфігурації комбінованої системи важливими є технічні параметри (різниця температур, потік теплоносія, площа теплообміну), економічна доцільність та операційна складність. Комбіновані способи охолодження фотоелектричних модулів, особливо реалізовані у форматі PVT, являють собою потужний інструмент для підвищення ефективності сонячних систем. Вони забезпечують як активне охолодження, так і утилізацію тепла, що значно підвищує загальну енергетичну віддачу та ефективність установки [23]. Хоча такі системи складніші й вимогливіші до впровадження, їхні

переваги в довгостроковій перспективі можуть виправдовувати витрати, особливо для об'єктів великої потужності або систем, орієнтованих на інтеграцію з енергетичними й тепловими мережами.

У результаті було встановлено, що універсального способу охолодження фотоелектричних модулів не існує. Вибір оптимального рішення має здійснюватися з урахуванням кліматичних умов, конструктивних особливостей та економічних факторів. Пасивні способи доцільні для невеликих установок у помірному кліматі, активні способи забезпечують стабільніший ефект, але потребують аналізу енергетичного балансу, а комбіновані мають найвищий потенціал, але й найвищу складність та капітальні витрати. Окрім цього, слід проводити аналіз та вибір оптимального кута нахилу та азимутального напрямку панелей з погляду їх впливу на робочу температуру фотоелектричних модулів.

Також крім переваг PVT сонячні колектори мають недоліки. Теплова енергія, яку виробляє такий комбінований колектор є низькопотенційною. А саме, низька температура отриманого теплоносія може використовуватись в обмеженій кількості теплоенергетичних процесів для задоволення потреб промисловості або домогосподарств. Це звужує можливості її використання. А вплив сезонності на потенціал та наявність цієї додаткової теплової енергії також зменшує період можливого використання таких систем. При спробі отримати теплоносій з вищою температурою значно зменшується ефективність виробництва електроенергії фотоелектричним модулем, що ставить питання про доцільність використання PVT-систем у конкретних випадках.

**Висновки.** Отже, робоча температура сонячних панелей є одним із факторів, який впливає на ефективність та надійність роботи фотоелектричних модулів. При інтенсивній сонячній радіації значна частина поглинутої енергії перетворюється на тепло, що призводить до підвищення робочої температури фотоелектричних елементів, зменшення напруги та зниження вихідної потужності. У зв'язку з цим застосування різних способів охолодження розглядається як шлях підвищення ефективності фотоелектричних систем.

Способи охолодження фотоелектричних модулів класифікувати як пасивні, активні та комбіновані. Пасивні способи охолодження характеризуються конструктивною простотою, високою експлуатаційною надійністю та відсутністю додаткових енергетичних витрат. Вони є доцільними для використання в умовах помірного клімату та для невеликих фотоелектричних установок, однак їх ефективність істотно залежить від зовнішніх факторів, таких як температура навколишнього середовища, швидкість вітру, рівень інсоляції та орієнтація сонячних панелей.

Активні способи охолодження, які базуються на примусовій циркуляції повітря або рідини, забезпечують більше зниження температури модулів і стабільніший режим роботи. Водночас їх впровадження

супроводжується додатковими енергетичними витратами, ускладненням конструкції та необхідністю регулярного технічного обслуговування. У цьому разі виникає потреба комплексного аналізу енергетичного балансу системи для визначення доцільності застосування активного охолодження в конкретних умовах експлуатації.

Комбіновані способи охолодження поєднують елементи пасивних і активних підходів або інтегрують процес охолодження з корисним відбором теплової енергії у фотоелектрично-теплових (PVT) системах. Такі рішення забезпечують найбільший потенціал підвищення сумарної енергоефективності, оскільки дають змогу одночасно оптимізувати електричні параметри фотоелектричних модулів та додатково використовувати відведене тепло. Однак складність проектування та вищі капітальні витрати потребують ретельного техніко-економічного обґрунтування й оптимізації конструктивних параметрів. Також додатково отримана теплова енергія є низькопотенційною, що звужує діапазон її корисного використання.

Узагальнюючи, можна зробити висновок, що універсального способу охолодження фотоелектричних модулів не існує. Під час вибору способу та системи охолодження слід враховувати місцеві, конструктивні та економічні фактори. А вибір оптимального рішення має здійснюватися з урахуванням кліматичних умов, конструктивних та економічних факторів і вимог до енергетичної ефективності.

## ПОСИЛАННЯ

1. Madalina Barbu, George Darie, Monica Siroux. Analysis of a Residential Photovoltaic-Thermal (PVT) System in Two Similar Climate Conditions. *Energies*, 2019, 12 (19). DOI: <https://doi.org/10.3390/en12193595>
2. Ramos C. A. F., Alcaso A. N., Cardoso A. J. M. Photovoltaic-thermal (PVT) technology: Review and case study. *International Conference on New Energy and Future Energy System IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 354, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/354/1/012048>
3. Шкляр В. И., Дубровская В. В., Карпенко Д. С. Использование энергии Солнца фотоэлектрическими системами. *Відновлювана енергетика*. 2014. № 3. С. 39–48. URL: <http://jnas.nbu.gov.ua/uk/article/UJRN-0000943735>
4. Iurchenko M., Matyakh S. Improving the efficiency of photovoltaic modules. *Vidnovliuvana enerhetyka ta enerhoefektyvnist u XXI stolitti: Materialy XXV mizhnarodnoi naukovoopraktychnoi konferentsii (Kyiv, 22–24 travnia 2024 r.)*. Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NAN Ukrainy. 2024. Pp. 223–225. DOI: <https://doi.org/10.36296/renewable.conf.22-24.05.2024>
5. Rahman T., Mansur A. A., Hossain Lipu M. S., Rahman M. S., Ashique R. H., Houran M. A., Elavarasan R. M., Hossai E. Investigation of Degradation

- of Solar Photovoltaics: A Review of Aging Factors, Impacts, and Future Directions toward Sustainable Energy Management. *Energies* 2023, 16, 3706. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16093706>
6. Pramod Rajpu, Digvijay Singh, K Y Singh, Alagar Karthick, Mohd Asif Shah, Radhey Shyam Meena, Musaddak Maher Abdul Zahra. A comprehensive review on reliability and degradation of PV modules based on failure modes and effect analysis. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2024, Vol. 19. Pp. 922–937. DOI: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctad106>
  7. Ewa Kozak-Jagięła, Piotr Cisek, Paweł Ochoń. Cooling techniques for PV panels: A review. *Scientiae Radices*. 2023, 2, 47-68. DOI: <https://doi.org/10.58332/scirad2023v2i1a03>
  8. Ramkiran B., Sundarabalan CK, K. Sudhakar. Sustainable passive cooling strategy for PV module: A comparative analysis. *Case Studies in Thermal Engineering*. Volume 27, October 2021, 101317. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101317>
  9. Mohamed Sharaf, Mohamed S. Yousef, Ahmed S. Huzayyin. Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022, 29, 26131–26159. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18719-9>
  10. Ke Wang, Guoling Luo, Xiaowei Guo, Shaorong Li, Zhijun Liu, Cheng Yang. Radiative cooling of commercial silicon solar cells using a pyramid-textured PDMS film. *Solar Energy*. 2021. Vol. 225, 245–251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.025>
  11. Liang Tang, Yong Luo, Linlin Yin, Jinwei Li, Xiaoling Cao. Thermal-Management Performance of Phase-Change Material on PV Modules in Different Climate Zones. *Energies*. 2024, 17(23). DOI: <https://doi.org/10.3390/en17236200>
  12. Krzysztof Sornek, Wojciech Goryl, Rafał Figaj, Gabriela Dąbrowska, Joanna Brezdeń. Development and Tests of the Water Cooling System Dedicated to Photovoltaic Panels. *Energies*. 2022, 15. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15165884>
  13. Yaareb Elias Ahmed, Mohammad Reza Maghami, Jagadeesh Pasupuleti, Suad Hassan Danook, Firas Basim Ismail. Overview of Recent Solar Photovoltaic Cooling System Approach. *Technologies*. 2024. 12(9), 171. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies12090171>
  14. Bondarenko D., Matiakh S., Surzhyk T., Sheiko, I. Actual pathways for solar energy development based on the materials of the scientific and practical conference «Renewable energy and energy efficiency in the 21st century» 2025. *Vidnovluvana Energetika*, 3(82), 82–88. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3\(82\).82-88](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3(82).82-88)
  15. Suresh, A. K.; Khurana, S.; Nandan Gopal Dwivedi, G.; Kumar, G. Role on nanofluid in cooling solar photovoltaic cell to enhance overall efficiency. *Materials Today: Proceedings* 5 (2018) 20614–20620. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.442>
  16. Mazlum Cengiz, İsmail Kayri, Hüseyin Aydın. A collated overview on the evaporative cooling applications for photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024, Vol. 197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114393>
  17. Cheng Wang, Fumin Guo, Huijie Liu, Gang Wang. A Comprehensive Review of Research Works on Cooling Methods for Solar Photovoltaic Panels. *Energies* 2025, 18(16), 4305. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18164305>
  18. Mahdi Shakouri, Hossein Ebadi, Shiva Gorjian. Chapter 4 - Solar photovoltaic thermal (PVT) module technologies. *Photovoltaic Solar Energy Conversion. Technologies, Applications and Environmental Impacts*, 2020, p. 79–116. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819610-6.00004-1>
  19. Bondarenko D, Matiakh S., Surzhyk T., Sheiko I., Kravchenko M. Development trends of solar power engineering based on the materials of the scientific and practical conference «Renewable energy and energy efficiency in the 21st century» 2024. *Vidnovluvana Energetika*, 3(78), 76–83. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3\(78\).76-83](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78).76-83)
  20. Ihsan Okta Harmailil, Sakhr M. Sultan, Chih Ping Tso, Ahmad Fudholi, Masita Mohammad, Adnan Ibrahim. The State of the Art of Photovoltaic Module Cooling Techniques and Performance Assessment Methods. *Symmetry*. 2024, 16(4), 412. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym16040412>
  21. Mustafa Arslan, Mehmet Çunkaş. An experimental study on determination of optimal tilt and orientation angles in photovoltaic systems. *Journal of Engineering Research*. Volume 13, Issue 3, September 2025, 2689–2701. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.07.015>
  22. Zhen Ye, André Nobre, Thomas Reindl, Joachim Luther, Christian Reise. On PV module temperatures in tropical regions. *Solar Energy*. Volume 88. 2013, 80–87. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X12003921>
  23. Bondarenko D., Matiakh S., Surzhyk T., Sheiko I. Photovoltaic Thermal Solar Collector for Autonomous and Energy Cluster Modes. *Systems, Decision and Control in Energy VI*, vol. 552. Springer, Cham. Pp. 373–384. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-67091-6\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-031-67091-6_16)

## INCREASING THE EFFICIENCY OF PHOTOVOLTAIC MODULES DUE TO VARIOUS COOLING METHODS

Received May 14, 2026; accepted Jun. 26, 2026  
Available online June. 30, 2026

### Iurchenko M.

Author for correspondence: Iurchenko Maxim,  
e-mail: iurchenko.m.nas@ukr.net

PhD student  
<https://orcid.org/0009-0000-7307-6039>

Institute of Renewable Energy, NAS of  
Ukraine, Kyiv, Ukraine

**Анотація.** *The article considers the effect of temperature on the efficiency of photovoltaic modules and analyzes the methods of their cooling. It is shown that increasing the operating temperature of solar panels leads to a decrease in voltage, output power and accelerated degradation of photovoltaic elements, and that various approaches are used to reduce the operating temperature and increase efficiency. An overview of various cooling methods for increasing the productivity of photovoltaic panels is presented - passive, active and combined systems for cooling photovoltaic systems using air, water, phase transition materials and nanofluids as working agents and other methods. Depending on the intended use, it is advisable to use the appropriate method to increase the efficiency of photovoltaic modules and/or to produce additional thermal energy. As a result, it was found that there is no universal method for cooling photovoltaic modules, and the choice of the optimal cooling system should be carried out taking into account climatic, structural, economic and operational factors.*

**Keywords:** *solar energy, methods for cooling photovoltaic systems, increasing the efficiency of photovoltaic systems, productivity, passive cooling, active cooling, PVT.*

### List of Symbols and Abbreviations

PV – photovoltaic  
PVT – photovoltaic thermal  
V – voltage

I – current  
STC – Standard Test Conditions  
NOCT – Normal Operating Cell Temperature  
PCM – phase change materials

**Introduction.** One of the most widespread types of renewable energy is solar energy. Its advantages include wide availability in many regions, low operating costs, and the possibility of application in small, decentralized energy supply systems [1].

The conversion of solar energy into electrical energy is carried out using photovoltaic (PV) solar cells. However, the absorbed solar radiation that is not converted into electricity contributes to an increase in the temperature of the solar cells, thereby reducing their conversion efficiency [2].

Solar panels are tested under Standard Test Conditions (STC), namely: incident solar irradiance of 1000 W/m<sup>2</sup>, photovoltaic cell temperature of 25°C, wind speed of 0 m/s, and an air mass solar spectrum of 1.5. Standard Test Conditions (STC) rarely occur under real outdoor operating conditions; in particular, the temperature of a solar panel is usually much higher, especially in hot climates. Therefore, the characteristics of solar panels under STC cannot be used to evaluate the actual performance and electrical energy generation of a photovoltaic system under real operating conditions [3].

During operation, especially in hot weather, solar panels heat up. An increase in the surface temperature of a solar module negatively affects its technical and operational characteristics [4]. This dependence is described by the temperature coefficients of voltage and current. The

optimal operating temperature for photovoltaic cells is considered to be 25°C. At temperatures above the optimal value, the open-circuit voltage decreases, while the short-circuit current increases slightly [3]. Figure presents, as an example, the current-voltage characteristic of a solar panel from one of the modern manufacturers at different temperatures of photovoltaic modules.

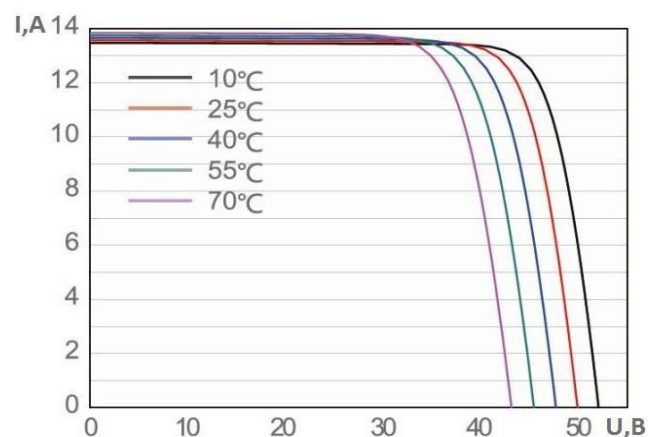


Figure. Volt-ampere characteristics of the solar panel JAM72S30-540/MR at different temperatures

To evaluate the performance of solar panels under conditions close to real-world operating environments, additional parameters were adopted, namely the temperature

corresponding to the Normal Operating Cell Temperature (NOCT) - the nominal operating temperature of a solar cell.

The nominal operating cell temperature (NOCT) is measured at a solar irradiance of 800 W/m<sup>2</sup>, ambient air temperature of 20°C, and wind speed of 1 m/s. The lower the NOCT value, the more efficiently the module will operate under real-world conditions. NOCT is not an operating condition for a solar panel; however, it is one of the important parameters used to assess the quality of a photovoltaic module. The characteristics specified under NOCT provide a more accurate understanding of the expected panel temperature and its performance under actual operating conditions [3].

Another factor affecting the reduction in the efficiency of photovoltaic cells and solar panels is their degradation. Degradation is the process of deterioration of solar module characteristics over time, involving a gradual decline in quality and structural deterioration caused by environmental influences and aging. Over time, electricity generation gradually decreases [5].

During operation, monocrystalline and polycrystalline photovoltaic cells lose efficiency at an average rate of approximately 1% per year. Manufacturers usually guarantee about 90% of the initial performance for the first ten years and 80% after 25-30 years of operation. However, recent studies indicate that monocrystalline panels manufactured after 2000 may degrade at a rate as low as 0.4% per year. Manufacturers generally declare a service life of solar panels of 20-25 years [4].

One of the causes of solar panel degradation is the aggressive impact of environmental conditions, namely:

- overheating of solar panels;
- continuous temperature fluctuations, which lead to the formation of microcracks and consequently deterioration of electrical connections;
- strong wind gusts, which increase dynamic and mechanical loads;
- humidity, snow, and ice, which gradually contribute to battery aging [6].

Thus, an increase in temperature negatively affects the efficiency of converting solar radiation into electrical energy. Overheating leads to a reduction in the voltage generated by photovoltaic cells, which correspondingly decreases the output power of the system and also accelerates the degradation of photovoltaic modules, i.e., the deterioration of photovoltaic cell characteristics over time.

**Methods of Cooling Photovoltaic Modules.** There are various methods for cooling solar panels aimed at removing excess heat and reducing panel temperature. As a result, an increase in electricity generation efficiency can be expected.

Methods of cooling photovoltaic modules can conventionally be divided into passive, active, and combined (hybrid) methods [7]:

- passive methods do not require an additional energy source (for example, structural design solutions, finned surfaces, radiative/spectral cooling, and phase change materials (PCM));
- active methods involve the use of auxiliary equipment and additional energy consumption (for example, forced-air cooling, liquid cooling, spray cooling schemes, and thermoelectric coolers);
- combined (or hybrid) methods combine passive and active approaches or integrate cooling with useful heat recovery and additional energy generation (for example, photovoltaic-thermal systems (PVT systems)).

Each method has its own advantages and limitations, which depend on climatic conditions, system type, budget, and the scale of application, thereby determining its feasibility under specific operating conditions.

**Passive Cooling Methods.** Passive cooling methods do not require external energy sources and are based on natural physical processes such as convection, heat conduction, or radiative emission. Passive cooling is achieved solely through structural design features [8].

The most common technologies include:

- natural convection - cooling due to air movement around the PV module;
- structural solutions - fins on the rear surface of the photovoltaic module, thin-film thermally conductive substrates, ventilation gaps, and optimized mounting geometry;
- thermal energy storage - integration of phase change materials (PCM) into the photovoltaic module structure;
- radiative cooling through the use of specialized coatings.

Passive methods are considered economically feasible due to their simplicity of implementation and the absence of additional energy consumption. However, their effectiveness is limited by various operating conditions.

Structural solutions for solar panel cooling include fins, substrates, and ventilation gaps. Simple structural improvements often provide a cost-effective increase in efficiency: additional aluminum fins/heat sinks on the rear surface, thin-film thermally conductive layers, as well as providing a ventilation gap between the module and the mounting bracket - all these measures increase the heat exchange area and promote the intensification of natural convection. Experimental studies show that such measures can reduce local temperatures by several degrees (5-12°C) and provide a stable, although relatively small, increase in electricity generation [9].

Radiative cooling through specialized coatings rely on thermal radiation emitted into the surrounding environment, allowing the surface of the photovoltaic module to cool without additional energy consumption. For PV modules, an important consideration is that the coatings must be spectrally selective: they should exhibit high transparency in the visible and near-infrared spectral ranges in order not

to reduce electricity generation, while simultaneously possessing high emissivity in the mid- and long-wave infrared ranges to effectively dissipate heat. Experimental studies have demonstrated that polydimethylsiloxane (PDMS) films with pyramidal texturing can reduce the operating temperature of silicon cells by 5-15°C under standard solar irradiance, corresponding to a noticeable increase in electrical power output [10].

The integration of phase change materials (PCMs) into the photovoltaic module structure enables the accumulation of excess thermal energy during periods of peak solar irradiance through the enthalpy of fusion, followed by its gradual release at night. The role of PCM in PV structures is to smooth temperature peaks, reduce the amplitude of daily temperature fluctuations, and temporarily maintain a more favorable thermal regime for photovoltaic cells. In addition, the use of PCM materials (organic paraffins and salt hydrates) combined with nanofillers (metallic or oxide nanoparticles) can increase thermal conductivity and improve the rate of heat dissipation, thereby enhancing the efficiency of PCM-based solutions under real operating conditions. However, effectiveness strongly depends on the proper selection of PCM melting temperature, heat capacity, and regenerative properties of the chosen material [11].

Passive cooling methods for PV modules represent an attractive and cost-effective opportunity for reducing operating temperatures without additional energy consumption. However, no universal strategy exists. Radiative coatings perform better in dry regions with low cloud cover and high atmospheric optical transparency. PCMs demonstrate the best results in regions with pronounced daily temperature fluctuations. Structural solutions are the most economical for large-scale arrays, where material cost plays a decisive role. The key limitations of passive systems include dependence on weather conditions, degradation of coatings under ultraviolet radiation, limited cyclic stability of PCM materials, and integration challenges with existing panels. Therefore, the selection of passive cooling solutions should take into account the local climate, architectural constraints, and the life-cycle cost of the system.

Another of the least investigated aspects of the thermal regime of photovoltaic modules is the direct influence of solar panel orientation on their operating temperature. Typically, solar panel orientation is considered primarily as a method of maximizing solar radiation absorption, while insufficient attention is paid to the panel temperature under different tilt angles and azimuth directions. Meanwhile, orientation determines not only the amount of radiation incident on the panel, but also the nature of convective cooling, the angle of incidence of direct radiation, and the daily variation of the thermal regime of photovoltaic modules [12].

For conditions in the Northern Hemisphere, southward orientation of photovoltaic modules is generally considered optimal from the standpoint of maximizing annual electricity generation. In this case, maximum solar irradiance occurs during midday hours, when the Sun reaches its highest

elevation above the horizon. However, the concentration of solar radiation during the midday period also creates the most intense thermal load. During the summer season, the surface temperature of south-oriented panels can reach 60-70°C even when the ambient air temperature is 30°C. Such conditions are accompanied by significant temperature-related power losses [13].

Thus, in order to reduce the temperature of a photovoltaic module, it is also necessary to analyze and select the optimal tilt angle and azimuth for specific installation conditions and regional characteristics.

**Active cooling methods** utilize auxiliary equipment and require additional energy consumption. Compared with passive approaches, active methods provide a greater temperature difference between the cooling medium and the module; however, they require energy input, more complex equipment, and regular maintenance. Therefore, the selection of a specific solution requires a cost-benefit analysis for each particular application [14].

Active cooling methods for PV modules include:

- forced-air cooling using fans;
- liquid cooling - circulation of water or nanofluids through heat-exchange channels;
- systems with active cooling of phase change materials (PCM);
- liquid cooling with water spraying, or spray-cooling systems.

Each option has its own engineering characteristics: air-based systems are simpler and less expensive, liquid-based systems are more efficient in heat transfer, while spray systems provide the fastest local cooling when water resources are available [15].

Forced-air cooling is the simplest of the active approaches, increasing the heat transfer coefficient and reducing the operating temperature of photovoltaic cells. Its advantages include ease of integration and relatively low installation cost for small-scale systems [16]. The disadvantages include the energy consumption of fans and the reduction of the net useful gain in electricity generation, which may result in an unfavorable ratio between energy consumption and the benefit obtained. Studies emphasize that air-cooling schemes are advisable in cases where fan power consumption is low or where the fans can be powered partially by the PV system itself [7].

Liquid cooling systems represent the primary practical method of active cooling. Water or a modified heat-transfer fluid is pumped through channels on the rear surface or through collectors, ensuring a high rate of heat removal due to the high heat capacity of liquids. Calculations and experimental studies demonstrate that water cooling reduces temperature by several tens of degrees compared with non-cooled panels and significantly increases electrical energy output [14].

Nanofluids are also used for cooling purposes. Nanofluids are liquids containing nanoparticles dispersed within the heat-transfer medium, which improve the thermal conductivity of the coolant and enhance heat exchange efficiency. Research indicates that nanofluids (for example, those based on metal oxides) improve heat transfer and can reduce the temperature of PV modules more effectively than conventional water under the same hydraulic conditions. However, disadvantages such as agglomeration, increased hydraulic resistance, and issues related to the long-term stability of nanofluid suspensions must also be considered [17].

Spray-cooling systems involve spraying water onto the rear surface of the photovoltaic module or creating a thin evaporative water film. This is a highly effective method, especially in dry climates. Since evaporation absorbs a significant amount of heat during the phase transition process, noticeable local cooling can be achieved with a relatively small volume of water. However, this method also has disadvantages, including water consumption, salt deposition, and the need for water filtration [18].

When selecting active cooling systems, the key evaluation criterion is the balance between the useful increase in electricity generation and the energy consumption required to operate the cooling system itself. Practical studies show that water cooling and spray cooling provide the greatest temperature reduction and, accordingly, the highest increase in energy generation, but they also involve higher operational costs and additional equipment requirements, including fans, pumps, filters, and water supply systems [14].

**Combined (or Hybrid) Cooling Systems.** Combined (or hybrid) systems integrate the advantages of both passive and active cooling approaches or combine cooling with useful heat recovery (PVT systems). Such an approach makes it possible to simultaneously cool the panels and utilize the removed heat for domestic or industrial applications, thereby increasing the overall efficiency of the system [19].

Combined cooling systems for PV modules can be implemented in various ways:

- integration of passive and active methods - for example, heat-dissipating fins or spectral coatings combined with a liquid cooling circuit;
- cooling with heat utilization (PVT modules) - the module simultaneously generates electricity, while the extracted heat is used for water heating, space heating, or technological processes [20].

Both approaches are aimed at improving the overall energy efficiency of the installation.

Examples of combined passive and active approaches include systems that use spectrally selective coatings or PCM (phase change materials), supplemented by a water circuit or spray-cooling system only during periods of peak heating. Such an approach reduces the operating time and energy consumption of active cooling, thereby improving overall efficiency.

Hybrid photovoltaic-thermal (PVT) systems with heat recovery combine photovoltaic electricity generation with thermal energy extraction [21]. A heat-transfer fluid circulating beneath the PV module removes heat, lowers the panel temperature, and transfers thermal energy for useful consumption. Such systems significantly increase overall efficiency through the simultaneous production of electrical and thermal energy. Experimental studies of PVT systems have shown that the increase in total energy efficiency may reach 15–25% compared with a standalone PV panel without cooling [22].

When selecting the configuration of a combined system, important considerations include technical parameters (temperature difference, heat-transfer fluid flow rate, and heat-exchange area), economic feasibility, and operational complexity. Combined cooling methods for photovoltaic modules, especially those implemented in the form of PVT systems, represent a powerful tool for improving the efficiency of solar energy systems. They provide both active cooling and heat recovery, significantly increasing the overall energy output and efficiency of the installation [23]. Although such systems are more complex and demanding in terms of implementation, their long-term advantages may justify the associated costs, especially for high-capacity facilities or systems intended for integration with electrical and thermal energy networks.

As a result, it was established that no universal method for cooling photovoltaic modules exists. The selection of the optimal solution should be carried out taking into account climatic conditions, structural characteristics, and economic factors. Passive methods are appropriate for small-scale installations in moderate climates. Active methods provide a more stable cooling effect but require analysis of the energy balance, while combined methods possess the highest potential together with the highest complexity and capital costs. In addition, it is necessary to analyze and select the optimal tilt angle and azimuth direction of the panels from the standpoint of their influence on the operating temperature of photovoltaic modules.

In addition to their advantages, PVT solar collectors also possess several disadvantages. The thermal energy generated by such combined collectors is considered low-grade thermal energy. Specifically, the relatively low temperature of the obtained heat-transfer fluid can be utilized only in a limited number of thermal engineering processes for industrial or household applications, thereby restricting the range of possible applications. Furthermore, the influence of seasonal variability on the availability and potential of this additional thermal energy reduces the period during which such systems can be effectively utilized. Attempts to obtain a heat-transfer fluid with a higher temperature lead to a significant decrease in the efficiency of electricity generation by the photovoltaic module, which raises questions regarding the feasibility of using PVT systems in specific applications.

**Conclusions.** Thus, the operating temperature of solar panels is one of the factors influencing the efficiency and reliability of photovoltaic modules. Under conditions of intense solar radiation, a significant portion of the absorbed energy is converted into heat, which leads to an increase in the operating temperature of photovoltaic cells, a reduction in voltage, and a decrease in output power. In this regard, the application of various cooling methods can be considered a means of improving the efficiency of photovoltaic systems.

Methods of cooling photovoltaic modules can be classified as passive, active, and combined. Passive cooling methods are characterized by structural simplicity, high operational reliability, and no additional energy consumption. They are suitable for use in moderate climates and for small-scale photovoltaic installations; however, their effectiveness significantly depends on external factors such as ambient temperature, wind speed, solar irradiance, and the orientation of solar panels.

Active cooling methods, based on the forced circulation of air or liquid, provide greater temperature reduction of the modules and a more stable operating regime. At the same time, their implementation is associated with additional energy consumption, increased system complexity, and the need for regular maintenance. In this case, a comprehensive analysis of the system energy balance becomes necessary in order to determine the feasibility of applying active cooling under specific operating conditions.

Combined cooling methods integrate elements of passive and active approaches or combine the cooling process with useful thermal energy recovery in photovoltaic-thermal (PVT) systems. Such solutions offer the greatest potential for increasing overall energy efficiency, since they simultaneously optimize the electrical performance of photovoltaic modules while additionally utilizing the extracted heat. However, the complexity of design and the higher capital costs require careful techno-economic justification and optimization of structural parameters. In addition, the additionally obtained thermal energy is low-grade, which limits the range of its practical applications.

In summary, it can be concluded that no universal method for cooling photovoltaic modules exists. When selecting a cooling method and system, local climatic conditions, structural characteristics, and economic factors should be taken into account. The choice of the optimal solution should therefore be made with consideration of climatic conditions, structural and economic factors, as well as the required level of energy efficiency.

## REFERENCES

1. Madalina Barbu, George Darie, Monica Siroux. Analysis of a Residential Photovoltaic-Thermal (PVT) System in Two Similar Climate Conditions. *Energies*, 2019, 12 (19). DOI: <https://doi.org/10.3390/en12193595>
2. Ramos C. A. F., Alcaso A. N., Cardoso A. J. M. Photovoltaic-thermal (PVT) technology: Review and case study. *International Conference on New Energy and Future Energy System IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 354, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/354/1/012048>
3. Shklyar V. I., Dubrovska V. V., Karpenko D. S. Utilization of Solar Energy by Photovoltaic Systems. *Vidnovlyuvana enerhetyka*. 2014. No 3. C. 39-48 URL: <http://jnas.nbuv.gov.ua/uk/article/UJRN-0000943735>
4. Iurchenko M., Matyakh S. Improving the efficiency of photovoltaic modules. *Vidnovliuvana enerhetyka ta enerhoefektyvnist u XXI stolitti: Materialy XXV mizhnarodnoi naukopraktychnoi konferentsii (Kyiv, 22–24 travnia 2024 r.)*. Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NAN Ukrainy. 2024. Pp. 223–225 DOI: <https://doi.org/10.36296/renewable.conf.22-24.05.2024>
5. Rahman T., Mansur A.A., Hossain Lipu M.S., Rahman M.S., Ashique R.H., Houran M.A., Elavarasan R.M., Hossain E. Investigation of Degradation of Solar Photovoltaics: A Review of Aging Factors, Impacts, and Future Directions toward Sustainable Energy Management. *Energies* 2023, 16, 3706. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16093706>
6. Pramod Rajput , Digvijay Singh , K Y Singh , Alagar Karthick , Mohd Asif Shah , Radhey Shyam Meena , Musaddak Maher Abdul Zahra. A comprehensive review on reliability and degradation of PV modules based on failure modes and effect analysis. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2024, Vol. 19, Pp 922–937 DOI: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctad106>
7. Ewa Kozak-Jagieła, Piotr Cisek, Paweł Ochoń. Cooling techniques for PV panels: A review. *Scientiae Radices*. 2023, 2, 47-68 DOI: <https://doi.org/10.58332/scirad2023v2i1a03>
8. Ramkiran B., Sundarabalan CK, K. Sudhakar. Sustainable passive cooling strategy for PV module: A comparative analysis. *Case Studies in Thermal Engineering*. Volume 27, October 2021, 101317 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101317>
9. Mohamed Sharaf, Mohamed S. Yousef, Ahmed S. Huzayyin. Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022, 29, 26131-26159. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18719-9>
10. Ke Wang, Guoling Luo, Xiaowei Guo, Shaorong Li, Zhijun Liu, Cheng Yang. Radiative cooling of commercial silicon solar cells using a pyramid-textured

- PDMS film. *Solar Energy*. 2021. Vol. 225, 245-251  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.025>
10. Liang Tang, Yong Luo, Linlin Yin, Jinwei Li, Xiaoling Cao. Thermal-Management Performance of Phase-Change Material on PV Modules in Different Climate Zones. *Energies*. 2024, 17(23)  
DOI: <https://doi.org/10.3390/en17236200>
11. Mustafa Arslan, Mehmet Çunkaş. An experimental study on determination of optimal tilt and orientation angles in photovoltaic systems. *Journal of Engineering Research*. Volume 13, Issue 3, September 2025, 2689-2701  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.07.015>
2. Zhen Ye, André Nobre, Thomas Reindl, Joachim Luther, Christian Reise. On PV module temperatures in tropical regions. *Solar Energy*. Volume 88. 2013, 80-87  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X12003921>
12. Krzysztof Sornek, Wojciech Goryl, Rafał Figaj, Gabriela Dąbrowska, Joanna Brezdeń. Development and Tests of the Water Cooling System Dedicated to Photovoltaic Panels. *Energies*. 2022, 15.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/en15165884>
13. Yaareb Elias Ahmed, Mohammad Reza Maghami, Jagadeesh Pasupuleti, Suad Hassan Danook, Firas Basim Ismail. Overview of Recent Solar Photovoltaic Cooling System Approach. *Technologies*. 2024. 12(9), 171.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies12090171>
14. Bondarenko D., Matiakh S., Surzhyk T., Sheiko, I. Actual pathways for solar energy development based on the materials of the scientific and practical conference «Renewable energy and energy efficiency in the 21st century» 2025. *Vidnovluvana Energetika*, 3(82), 82–88.  
DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3\(82\).82-88](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3(82).82-88)
15. Suresh, A.K., Khurana S., Nandan G., Dwivedi G., Kumar G. Role on nanofluid in cooling solar photovoltaic cell to enhance overall efficiency. *Materials Today: Proceedings* 5 (2018) 20614–20620  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.442>
16. Mazlum Cengiz, İsmail Kayri, Hüseyin Aydın. A collated overview on the evaporative cooling applications for photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024, Vol. 197.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114393>
17. Cheng Wang, Fumin Guo, Huijie Liu, Gang Wang. A Comprehensive Review of Research Works on Cooling Methods for Solar Photovoltaic Panels. *Energies* 2025, 18(16), 4305.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/en18164305>
18. Mahdi Shakouri, Hossein Ebadi, Shiva Gorjian. Chapter 4 - Solar photovoltaic thermal (PVT) module technologies. *Photovoltaic Solar Energy Conversion. Technologies, Applications and Environmental Impacts*, 2020, p. 79-116  
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819610-6.00004-1>
19. Bondarenko D, Matiakh S., Surzhyk T., Sheiko I., Kravchenko M. Development trends of solar power engineering based on the materials of the scientific and practical conference «Renewable energy and energy efficiency in the 21st century» 2024. *Vidnovluvana Energetika*, 3(78), 76–83.  
DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3\(78\).76-83](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78).76-83)
20. Ihsan Okta Harmailil, Sakhr M. Sultan, Chih Ping Tso, Ahmad Fudholi, Masita Mohammad, Adnan Ibrahim. The State of the Art of Photovoltaic Module Cooling Techniques and Performance Assessment Methods. *Symmetry*. 2024, 16(4), 412.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/sym16040412>
21. Bondarenko D., Matiakh S., Surzhyk T., Sheiko I. Photovoltaic Thermal Solar Collector for Autonomous and Energy Cluster Modes. *Systems, Decision and Control in Energy VI*, vol. 552. Springer, Cham. Pp 373–384  
DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-67091-6\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-031-67091-6_16)