

УДК 621.311.243:502.171/658.5:620.9
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.1\(503\).2.25](https://doi.org/10.15589/znp2026.1(503).2.25)

ASSESSMENT OF THE CREATION OF PRODUCTION FACILITIES WITH A MINIMAL CARBON FOOTPRINT USING SOLAR ENERGY SYSTEMS

ОЦІНКА СТВОРЕННЯ ВИРОБНИЧИХ ОБ'ЄКТІВ ІЗ МІНІМАЛЬНИМ ВУГЛЕЦЕВИМ СЛІДОМ ЗА ДОПОМОГОЮ СОНЯЧНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

Liudmyla I. Demchuk
ke_dlm@ztu.edu.ua
ORCID: 0000-0001-5698-7113
Oksana M. Alpatova
ke_aom@ztu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-0803-9850

Л. І. Демчук,
канд. пед. наук, доцент
О. М. Алпатова,
канд. біол. наук, доцент

Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr

Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир

Abstract. The work considers an approach to the design and operation of modern production facilities aimed at a radical reduction of greenhouse gas emissions. The main focus is on the integration of photovoltaic systems as the main source of energy supply for enterprises to achieve the goals of "decarbonization" of industry.

The *purpose* of the work is to substantiate the technical and economic efficiency and develop a model for creating industrial facilities with a minimal carbon footprint by implementing highly efficient solar energy systems.

Method. The research used methods of system analysis to assess the energy balance of the enterprise, mathematical modeling of electricity generation and consumption processes (taking into account daily and seasonal fluctuations), as well as the life cycle assessment (LCA) method to calculate the total carbon footprint of the facility.

The results. Optimum configurations of hybrid solar systems (with the use of energy storage) have been determined, which allow to ensure uninterrupted production processes. A direct relationship has been established between the level of replacement of grid electricity by solar and the dynamics of reduction of specific CO₂ emissions per unit of production. It has been proven that the use of SES allows reducing the carbon footprint of production by 40–70%, depending on the industry.

Scientific novelty. For the first time, a comprehensive "production-generation" model is proposed, which takes into account not only direct savings of energy resources, but also ecological rent and potential benefits from carbon quotas. The approach to the selection of the power of solar stations has been improved, based on the schedules of peak loads of industrial equipment.

Practical significance. The results of the research can be used by engineering and design organizations and business owners to modernize existing factories or build new facilities according to "Green Factory" standards. The developed recommendations make it possible to increase the energy independence of enterprises and the competitiveness of products in markets with strict environmental regulation (for example, within the framework of the EU CBAM mechanism).

Key words: carbon footprint; solar energy systems (SES); decarbonization of industry; environmental assessment; renewable energy sources; energy efficiency; environmental management; sustainable development; environmental risk.

Анотація. У роботі розглядається підхід до проектування та функціонування сучасних виробничих потужностей, спрямований на радикальне зниження викидів парникових газів. Основна увага приділяється інтеграції фотоелектричних систем як основного джерела енергозабезпечення підприємств для досягнення цілей «декарбонізації» промисловості.

Мета роботи полягає в обґрунтуванні техніко-економічної ефективності та розробці моделі створення промислових об'єктів з мінімальним вуглецевим слідом шляхом впровадження високоефективних сонячних енергетичних систем.

Методика. У дослідженні використано методи системного аналізу для оцінки енергетичного балансу підприємства, математичне моделювання процесів генерації та споживання електроенергії (з урахуванням добових та

сезонних коливань), а також методику оцінки життєвого циклу (LCA) для розрахунку загального вуглецевого сліду об'єкта.

Результати. Визначено оптимальні конфігурації гібридних сонячних систем (з використанням накопичувачів енергії), які дозволяють забезпечити безперебійність виробничих процесів. Встановлено пряму залежність між рівнем заміщення мережевої електроенергії сонячною та динамікою зниження питомих викидів CO₂ на одиницю продукції. Доведено, що використання СЕС дозволяє знизити вуглецевий слід виробництва на 40–70% залежно від галузі.

Наукова новизна. Вперше запропоновано комплексну модель «виробництво-генерація», яка враховує не лише пряму економію енергоресурсів, а й екологічну ренту та потенційні вигоди від вуглецевого квотування. Удосконалено підхід до вибору потужності сонячних станцій, виходячи з графіків пікових навантажень промислового обладнання.

Практична значимість. Результати дослідження можуть бути використані інженерно-проектувальними організаціями та власниками бізнесу для модернізації існуючих заводів або будівництва нових об'єктів за стандартами "Green Factory". Розроблені рекомендації дозволяють підвищити енергонезалежність підприємств та конкурентоспроможність продукції на ринках із жорстким екологічним регулюванням (наприклад, у межах механізму СВММ ЄС).

Ключові слова: вуглецевий слід; сонячні енергетичні системи (СЕС); декарбонізація промисловості; екологічна оцінка; відновлювані джерела енергії; енергоефективність; екологічний менеджмент; сталий розвиток; екологічний ризик.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Оцінка створення виробничих об'єктів із мінімальним вуглецевим слідом – це комплексне завдання, що поєднує енергетичний менеджмент, екологічний моніторинг та економічне обґрунтування. Використання сонячних енергетичних систем (СЕС) є ключовим інструментом для досягнення цілей «Net Zero». Перш ніж впроваджувати сонячні системи, необхідно зрозуміти структуру споживання енергії виробництвом. Аналіз того, коли об'єкт споживає найбільше енергії (денні піки найкраще покриваються сонячною генерацією). Розрахунок корисної площі дахів, фасадів або прилеглих територій для встановлення фотоелектричних панелей. Вуглецевий слід розраховується відповідно до міжнародного стандарту GHG Protocol за трьома сферами охоплення (Scopes).

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Для нас енергоефективність – це здатність підприємства максимально ефективно використовувати енергетичні ресурси, тобто знижувати витрати, підвищуючи продуктивність і заощаджуючи енергію, забезпечуючи водночас максимальні результати при мінімальних ресурсах. Сучасні дослідження підтверджують, що підвищення рівня енергоефективності істотно зменшує енергетичні витрати, мінімізує викиди парникових газів і збільшує конкурентоспроможність компаній.

Аналіз останніх досліджень (станом на 2024–2025 роки) свідчить про зміщення фокусу з простого встановлення сонячних панелей на створення цілісних інтелектуальних екосистем. Сьогодні виробничі об'єкти розглядаються не просто як споживачі, а як активні вузли енергомережі. Останні публікації (наприклад, у виданнях MDPI Solar та звітах NREL за 2025 рік) виділяють перехід на нові типи

фотоелементів. Дослідження 2024 року підтвердили досягнення ККД понад 33,9%, що дозволяє генерувати більше енергії на обмежених площах заводських дахів.

TOPCon та HJT технології панелей стали стандартом для промисловості у 2025 році завдяки нижчому температурному коефіцієнту (ефективніше працюють при нагріванні даху виробничого цеху) та меншій деградації. Дослідження двосторонніх (Bi-facial) модулів показує, що їх використання на наземних ділянках промислових зон підвищує генерацію на 10–25% за рахунок відбитого світла від світлого покриття території.

Згідно зі звітами IEA (2025), ключовим трендом стало впровадження цифрових двійників (Digital Twins) для управління енергією. Дослідження 2024–2025 років зосереджені на створенні автономних промислових мереж, де сонячна енергія балансується системами накопичення (BESS).

Особлива увага в публікаціях 2025 року приділяється «чистоті» самих сонячних панелей. Вчені аналізують викиди під час видобутку кремнію та логістики модулів. Для об'єктів із «мінімальним вуглецевим слідом» тепер важливо вибирати панелі, виготовлені з використанням відновлюваної енергії.

Для українських та європейських підприємств публікації 2025 року часто фокусуються на механізмі вуглецевого коригування на кордоні. СЕС розглядається як головний інструмент зниження фінансових ризиків при експорті продукції в ЄС.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Тема є надзвичайно актуальною в контексті глобального переходу до сталого розвитку та декарбонізації промисловості. Для детального наукового аналізу або написання розділу статті, ми можемо виділити

кілька ключових аспектів, які зазвичай залишаються поза увагою у загальних дослідженнях. Більшість досліджень фокусуються на загальній кількості виробленої енергії за рік. Проте для виробничих об'єктів критичним є погодинний баланс. Створення математичних моделей, які враховують інерційність промислових процесів при коливаннях сонячної інсоляції. Мінімізація вуглецевого сліду не лише за рахунок обсягу «зеленої» енергії, а й через зменшення використання резервних потужностей мережі в пікові години.

Часто вуглецевий слід вважається нульовим під час експлуатації, але ігнорується «втілений вуглець» (embodied carbon) самих панелей та інверторів. Розробка методики оцінки терміну окупності вуглецевого сліду (Carbon Payback Period) саме для специфічних умов промислового будівництва.

Традиційно сонячні панелі розглядаються як додаток, а не як конструктивна частина будівлі. Оцінка зменшення вуглецевого сліду за рахунок заміни традиційних будівельних матеріалів (фасадів, дахів) активними фотоелектричними елементами (BIPV), що дозволяє уникнути «подвійного» вуглецевого навантаження.

Вплив локальних кліматичних аномалій на стабільність декарбонізації. Загальні моделі використовують усереднені метеодані. Прогнозування ризиків різкого зростання вуглецевого сліду об'єкта під час тривалих періодів низької інсоляції та розробка стратегій компенсації без використання викопного палива.

МЕТА

Полягає в обґрунтуванні техніко-економічної ефективності та розробці моделі створення промислових об'єктів з мінімальним вуглецевим слідом шляхом впровадження високоефективних сонячних енергетичних систем.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для такої комплексної теми ми використовували групу методів:

- метод аналізу життєвого циклу (LCA – Life Cycle Assessment) для кількісної оцінки викидів CO₂ на всіх етапах – від видобутку кремнію для панелей до утилізації обладнання та експлуатації самого заводу;
- математичне та комп'ютерне моделювання для прогнозування обсягів генерації енергії сонячними станціями залежно від локації, інсоляції та графіків навантаження виробництва;
- системний аналіз для вивчення взаємозв'язку між архітектурними рішеннями наприклад, BIPV – сонячні панелі в конструкціях, енергоефективністю та підсумковим вуглецевим слідом;
- порівняльно-аналітичний метод для порівняння традиційних схем енергопостачання промисловості з інноваційними сонячними системами за критеріями екологічності та окупності;

– статистичні методи для обробки метеорологічних даних та показників енергоспоживання реальних промислових підприємств.

Об'єкт дослідження – процес формування та функціонування енергозабезпечення промислових об'єктів на основі відновлюваних джерел енергії (зокрема сонячних систем) з метою мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище.

Предмет дослідження є методологічні підходи, моделі та техніко-економічні показники оцінки вуглецевого сліду виробничих об'єктів при впровадженні сонячних енергетичних систем протягом усього життєвого циклу.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Сонячна енергія є первинним невичерпним та відновлюваним джерелом енергії, що надходить на Землю у формі електромагнітного випромінювання (сонячної радіації), яке включає видиме світло, інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання. Цей потік енергії є фундаментальною основою для переважної більшості природних вторинних джерел енергії (гідроенергія, вітрова енергія, біомаса). Сонячна енергія є первинним невичерпним та відновлюваним джерелом енергії, що надходить на Землю у формі електромагнітного випромінювання (сонячної радіації), яке включає видиме світло, інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання. Цей потік енергії є фундаментальною основою для переважної більшості природних вторинних джерел енергії (гідроенергія, вітрова енергія, біомаса).

Константа, що визначає інтенсивність сонячного випромінювання на верхній межі атмосфери Землі (сонячна константа), становить приблизно 1367 Вт/м². Через процеси поглинання, розсіювання та відбиття в атмосфері (хмари, газ), інтенсивність сонячної радіації, що досягає поверхні Землі, значно варіюється. Фактична потужність, що досягає земної поверхні (інсоляція), залежить від географічної широти, часу доби та кліматичних умов, досягаючи пікових значень близько 1000 Вт/м² у чистий день поблизу екватора. Загальносвітовий енергетичний потенціал, який щодня надходить від Сонця, колосальний. У кількісному виразі, Сонце посилає на планету енергію, яка суттєво перевищує річне глобальне споживання. Середньорічний прихід сонячної енергії на одиницю площі поверхні Землі в різних регіонах варіюється, досягаючи показників приблизно 1000–1350 кВт·год/м². В Україні, за рівнем інтенсивності сонячної радіації, можна виділити чотири основні регіони, що мають різний потенціал для фотоелектричної генерації.

Використання сонячної енергії є критичним елементом глобальної стратегії декарбонізації та пом'якшення наслідків зміни клімату. Технологічне перетворення сонячної радіації на електричну (через фотоелектричний ефект) або теплову енергію не

супроводжується прямими операційними викидами парникових газів (CO_2), оксидів сірки (SO_x) або оксидів азоту (NO_x). Це робить сонячну енергетику одним із найбільш екологічно чистих альтернативних джерел та дозволяє замінювати енергію, вироблену спалюванням викопного палива, що є ключовим механізмом мінімізації операційного вуглецевого сліду виробничих об'єктів.

Децентралізований характер сонячної енергетики, обумовлений її доступністю практично в будь-якій точці планети, сприяє створенню стійких та гнучких локальних систем енергопостачання, знижуючи залежність від централізованих мереж. Сонячна енергія безпосередньо перетворюється на електричний струм (потік електронів), який можна використовувати для живлення пристроїв. Вона доступна практично в будь-якій точці планети, що дозволяє створювати децентралізовані системи енергопостачання і може бути перетворена у корисну енергію двома основними шляхами (табл. 1).

Сонячна енергія є важливим чинником у переході до сталого енергетичного майбутнього, надаючи екологічно чисте та економічно вигідне рішення для забезпечення сучасних енергетичних потреб і сприяючи зменшенню вуглецевого сліду виробництва.

Зважаючи на актуальність екологічних питань і зростаючу потребу в енергозбереженні, дедалі більше уваги приділяється впровадженню відновлювальних джерел енергії. Сонячна енергія є одним із найбільш універсальних варіантів, адже вона використовується не лише для генерації електроенергії, але й для отримання теплової енергії. Зокрема, застосування сонячних колекторів у системах гарячого водопостачання та опалення дає змогу отримувати енергію без шкоди для довкілля. Правильно спроектована сонячна система може забезпечити покриття до 50–60% від загальних витрат енергії, які раніше використовувалися для нагріву води.

Серед усіх видів відновлюваних джерел енергії сонячна енергетика є найперспективнішою для України. Попри збільшення загальної потужності сонячних електростанцій (СЕС) на території країни, існують втрати через те, що частина об'єктів залишилася на окупованій території АР Крим. Зокрема, розвиток галузі має суттєві переваги, бо завдяки здешевленню сонячного обладнання в останні роки і відносній простоті впровадження технологій, повноважний

проект можна реалізувати упродовж приблизно шести місяців, включаючи етап проектування. Хоча протягом 2021–2023 років виробництво електроенергії сонячними електростанціями зростало приблизно на 3,5% щорічно, середня кількість годин роботи СЕС на повну потужність знизилася до 928 годин на рік. Це відповідає коефіцієнту використання встановленої потужності на рівні 10,6%.

Розвиток сонячної енергетики в Україні демонструє її важливу роль у створенні екологічно чистого енергетичного сектору та підкреслює значні можливості для економічного зростання в майбутньому.

Виробництво електроенергії за допомогою СЕС (сонячних електростанцій) ґрунтується на фотоелектричному ефекті – прямому перетворенні енергії сонячного випромінювання (фотонів) на електричну енергію (рис. 1).

Цей процес складається з кількох ключових етапів, починаючи від поглинання світла до видачі готової до використання електроенергії у мережу або на споживання. Виробництво починається на рівні окремої фотоелектричної комірки (PV-елемента). Коли сонячне світло (потік фотонів) потрапляє на поверхню кремнієвого напівпровідника (P-N переходу), енергія фотонів поглинається, вибиваючи електрони з атомних зв'язків. Електричне поле, створене на межі P-N переходу, розділяє ці вивільнені електрони, змушуючи їх рухатися в одному напрямку. Цей рух електронів генерує постійний струм (DC). Одиначна комірка генерує дуже малу напругу (0.5–0.8 В). Це збірка з десятків фотоелектричних комірок, з'єднаних послідовно та паралельно, які герметично закриті захисним склом та рамкою. Вони генерують більш високу напругу і потужність.

Таким чином, СЕС забезпечує чисте, беземісійне виробництво електроенергії, що є основою для зменшення вуглецевого сліду виробничих об'єктів.

Сонячна енергетика (фотовольтаїка, PV) є домінуючою технологією у світовому розширенні відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). У 2024 році було встановлено рекордну кількість сонячних потужностей, що демонструє стрімке зростання цього сектору. На сонячну енергію припадає близько 81% усіх нових потужностей ВДЕ, доданих у всьому світі у 2024 році. Світова встановлена потужність сонячної PV-енергетики до кінця 2024 року досягла позначки приблизно 2,2 терават (ТВт).

Таблиця 1. Основні шляхи перетворення сонячної енергії у корисну енергію

Метод перетворення	Технологія	Вихідний продукт	Застосування
Фотоелектричний (ФЕ)	Фотоелектричні (сонячні) панелі	Електрична енергія	Живлення будівель, промислових об'єктів, зарядка пристроїв, комунальні СЕС.
Термодинамічний (Тепловий)	Сонячні колектори (пласкі, вакуумні)	Теплова енергія	Нагрівання води (ГВП), підтримка опалення, підігрів басейнів.
Концентрована сонячна енергія (CSP)	Системи дзеркал та лінз	Пара (для турбін)	Виробництво електроенергії у великих масштабах (СЕС баштового чи параболічного типу).

Світові лідери за встановленою потужністю сонячної енергетики є висококонцентрованим та нерівномірним, причому Азійсько-Тихоокеанський регіон забезпечує близько 70% нових потужностей. Абсолютні лідери за обсягом нових установок у 2024 році не лише загальною встановленою потужністю, а й рекордними темпами приросту.

У 2024 році частка ВДЕ у загальному розширенні потужностей досягла 81%. Китайські компанії займають провідні позиції у виробництві та постачанні сонячних панелей, технології яких постійно оновлюються. Такі країни, як США (через IRA) та країни Латинської Америки (через високі роздрібні ціни та підтримку великих установок), використовують політичні та економічні стимули для прискорення розширення сонячної PV. У таких країнах, як Італія, важливу роль відіграють малі сонячні електростанції (потужністю до 20 кВт), які складають значну частину встановленої потужності. Очікується, що глобальні річні додатки відновлюваної потужності зростуть до майже 935 ГВт до 2030 року, причому сонячна PV-енергетика становитиме майже 80% цього розширення. Загальна встановлена потужність сонячної PV, за прогнозами, перевищить 7 ТВт до 2030 року. Сучасна енергетика значною мірою залежить від невідновлюваних джерел енергії, запаси яких обмежені та вичерпні, що не дозволяє забезпечити сталий розвиток світової енергетики у довготривалій перспективі. Крім того, їхнє використання є одним із ключових факторів, які спричиняють глобальне погіршення стану довкілля та екологічну кризу. Наразі структура світового енергетичного сектору на дві третини базується на викопному паливі, зокрема вугіллі, нафті та природному газі. За прогнозами експертів, до 2040 року частка джерел енергії з нульовими викидами CO₂ у загальній структурі енергетики сягне 56%. Відновлювані джерела енергії становитимуть близько 60% із 9786 ГВт нових енергогенеруючих потужностей, які будуть введені в експлуатацію

протягом наступних 25 років. Загальні інвестиції у відновлювану енергетику складатимуть дві третини від загального обсягу вкладень в енергосектор, які оцінюються у 12,2 трлн доларів США.

Усе більше країн світу активно диверсифікують свої енергетичні ресурси, прагнучі посилити енергетичну безпеку та інтегрувати відповідні цілі у стратегії державного планування. Забезпечення енергетичної безпеки є важливим стимулом для розробки нових енергетичних технологій, як-от створення доступних джерел енергії чи здешевлення існуючих. Розвинена технологічна база та резерви у сфері енергетики надають країнам додаткові конкурентні переваги на світових ринках. Водночас для країн, що розвиваються, міжнародний трансфер технологій відіграє ключову роль у забезпеченні низьковуглецевого зростання та впровадженні чистих виробничих технологій. Сьогодні відновлювані джерела енергії демонструють стрімке зростання. Серед усіх сегментів саме виробництво електроенергії у секторі ВДЕ може й повинно стати основою майбутньої глобальної енергосистеми. Використання сонячної та вітрової енергії стає економічно вигідним завдяки залученню місцевих екологічно чистих ресурсів і сучасних технологій. Це дозволяє спрямовувати інвестиції в локальну економіку, скорочувати залежність від імпорту викопних ресурсів і зменшувати негативний вплив на клімат.

Особливу увагу розвитку альтернативної енергетики приділяють провідні країни світу, до яких належать як розвинені держави, так і ті, що перебувають на шляху економічного зростання. Щороку обсяг інвестицій у цей сектор зростає приблизно на 15,5%. З них значна частина спрямовується насамперед на розвиток сонячної енергетики.

У світовому рейтингу ефективності впровадження альтернативних джерел енергії лідером залишається Європа, за якою слідують Північна Америка та Азія (рис. 2).

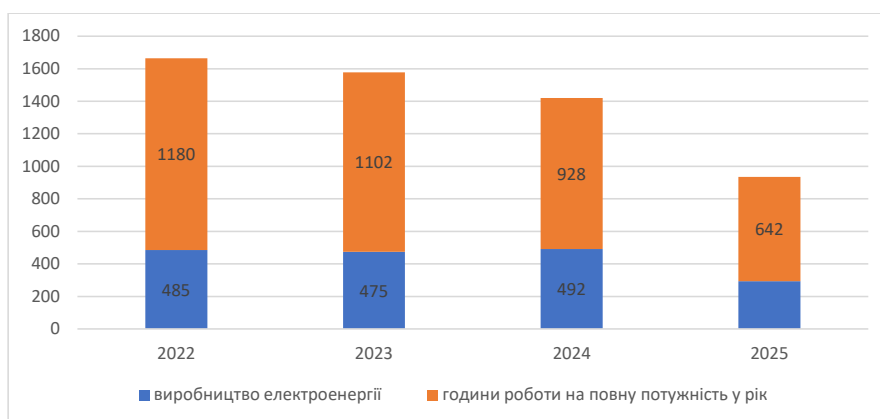


Рис. 1. Перетворення енергії сонячного випромінювання на електричну енергію

На рис. 2 ілюструє динаміку зростання встановленої потужності сонячної енергетики (фотовольтаїки) у вибраних регіонах та країнах світу, а також в Україні, станом на початок 2024 року. Також на рисунку наведено стовпчасту діаграму, яка порівнює абсолютну встановлену потужність PV-енергетики на січень 2024 року та приріст цієї потужності протягом 2022 та 2023 років для кількох ключових гравців світового ринку. Останнім часом сонячні електростанції в Україні ростуть, як гриби після дощу. За три роки введено в експлуатацію 115, а домашні СЕС встановило майже 1400 родин. За статистикою Держагентства з енергоефективності та енергозбереження, за чотири з половиною роки дії «зеленого тарифу» в сонячну енергетику інвестовано приблизно 2 млрд євро.

Україна займає сьоме місце, серед країн Європи за темпами розвитку сонячної енергетики, тому пропонуємо вам дізнатись більше про 10 нових найпотужніших СЕС України. Десятиліття тому сонячні електростанції були побудовані тільки на півдні нашої країни. Зараз це спільний бізнес, який розвивається практично у всіх регіонах. Іноземних та вітчизняних інвесторів приваблюють високі (зелені тарифи) ставки. Найбільші сонячні електростанції в Україні зосереджені в наступних областях:

- Дніпропетровськ – потужністю 290 МВт;
 - Одеса – із загальною потужністю всієї СЕС 240 МВт;
 - 2000 промислових сонячних електростанцій.
- На – Дніпропетровської області в Україні працює потужна сонячна електростанція 840 тис. сонячних панелей Покровської СЕС у Нікопольському районі виробляють 240 МВт електроенергії. Цього достатньо для 200 тис. домогосподарств. У Нікопольському районі є ще одна велика СЕС поблизу села Старозаводське. СЕС звели за гроші інвесторів – китайського підприємства China Machinery Engineering Corporation і вітчизняної компанії ДТЕК. Дана електростанція має 75 тис. сонячних панелей, що розташовані на території площею приблизно 400 га. та потужністю майже 200 МВт. Кількість електроенергії, що видобувається

на даній СЕС достатньо щоб забезпечити потреби двох невеликим містечок.

Проаналізуємо 3 найпотужніших сонячних електростанцій в Україні.

Аналізуючи енергетичну політику різних країн, можна зробити висновок, що держави ЄС активно зацікавлені у впровадженні новітніх технологій. Це обумовлено не лише прагненням покращити екологічний стан планети та зменшити залежність від таких невідновлюваних ресурсів, як нафта, газ чи кам'яне вугілля, а й намаганням забезпечити собі провідні позиції у світовій енергетичній сфері. Розробка і продаж інноваційних технологій дозволяє таким країнам зміцнювати свою економічну міць у довгостроковій перспективі. Незважаючи на те, що будівництво подібних станцій вимагає значних фінансових вкладень і має обмежений термін експлуатації, такі інвестиції цілком виправдані завдяки їх потенціалу та перспективності.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Сонце – найпотужніший джерело енергії. Є два основних напрямки експлуатації даного джерела електроенергії.

По-перше, побудувати сонячні котли. Вода в них кипить і випаровується за допомогою сонячної енергії, що спрямовується дзеркалами, а пара обертає турбіни. Сонячні котли вимагають значних територій, наприклад, одна електростанція потужністю 80 мегават складається з 852 котлів, кожен діаметром 100 метрів. Другий спосіб – використовувати панелі з елементами, які перетворюють сонячну енергію безпосередньо в електрику. Даний вид панелей не забруднюють навколишнє природне середовище, але створюють екологічні проблеми, коли стають відходами. Сонячні батареї можуть бути адаптовані до індивідуальних потреб, що робить їх придатними для використання на фермі. Найефективніше вони працюють у пустелі.

Основу сонячних батарей складають фотоелементи – напівпровідники, які перетворюють сонячне випромінювання в електрику. Для більшості панелей

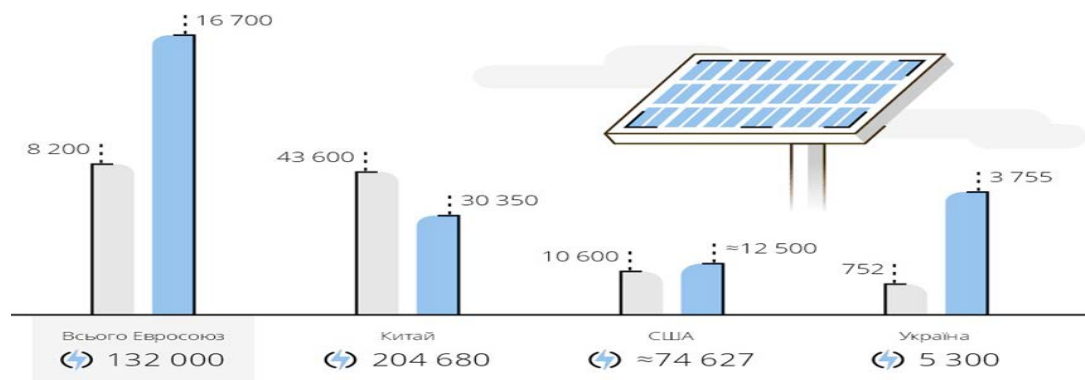


Рис. 2. Встановлені потужності СЕС і їх приріст в деяких країнах Світу [28]

CEC Tokmak Solar Energy



Потужність – 50 МВт, площа – 96,4 га, знаходиться – м. Токмак, Запорізька область, рік запуску – 2018. Електростанція Токмак є найбільшою в Україні. Потужності станції вистачає на освітлення Оріхівського, Гуляйпільського, Пологівського та частково Чернігівського районів Запорізької області. За весь час роботи не було жодної позаштатної ситуації. Сонячна електростанція принесла в Токмацький регіон додаткові 1,2 млрд грн інвестицій. А щорічне надходження до бюджетів усіх рівнів склало понад 100 млн грн.

CEC Терновиця



Потужність – 20 МВт, площа – 12 га, знаходиться – с. Терновиця Яворівського району Львівської області, рік запуску – 2018. Минулого року в селі Терновиця дали старт роботі нової екологічної сонячної електростанції, у проект якої вклали 149 млн грн інвестицій компанії “Greenville Energy”. CEC Терновиця зможе забезпечити енергією п’ять тисяч домашніх помешкань. Це є важливим кроком вперед у напрямку зеленої енергетики, яка дає Україні великі перспективи.

ФЕС Костогризове



Потужність – 18 МВт, площа – 30 га, знаходиться – с. Костогризове Олешківського району Херсонської області, рік запуску – 2018. Генеральним підрядником ФЕС (сонячна фотоелектростанція) Костогризове є ТОВ “Енерго-сила”. За словами інвесторів, кліматичні умови Херсонщини привабливі для розвитку геліоенергетики. А створення нових електростанцій дозволить створити нові робочі місця для жителів району та отримувати вагомні кошти за оренду землі.

основним використовуваним матеріалом є дешевий кремній. Такі фотоелектричні комірки становлять близько 80% ринку продажів. В решті модулів використовуються плівки на основі органіки, рідкісноземельних хімічних елементів та їх різні сполуки. Для виготовлення цього типу сонячних батарей застосовують кадмій, галій, германій та миш’як, які небезпечні для здоров’я. Шкода від сонячних батарей для навколишнього середовища залежить від різноманітності використовуваних токсичних елементів, а також технологічних процесів їх виробництва та утилізації. Саме тому на заводах з виготовлення фотоелементів важливо не допустити потрапляння канцерогенних хімічних елементів у навколишню атмосферу та ґрунт, що може призвести до серйозних проблем зі здоров’ям для всіх живих організмів.

Виробництво електроенергії з використанням сонячних панелей запобігає забрудненню повітря в порівнянні з виробництвом електроенергії тепловими електростанціями і скоротити викиди парникових газів. Під час експлуатації сонячної електростанції унеможливується вплив на хімічний склад атмосферного повітря. Коронні розряди можуть викликати невелике утворення озону (O_3) біля проводів в сиру погоду. Під час утворення електроенергії та передачі їх до споживача не використовуються водні ресурси. Тому зберігаються існуючі гідрологічний та гідробіологічний режими поверхневих та підземних вод.

Сонячні електростанції мають низький вплив на навколишнє середовище завдяки наступним фактам:

- їх виготовлення не потребує залучення екологічно небезпечних речовин;
- робота сонячних панелей жодним чином не впливає на атмосферу, оскільки енергія генерується фізичними процесами без викидів;
- монтаж електростанцій не шкодить ґрунту та його поверхні;
- технічне обслуговування сонячних панелей здійснюється за допомогою простих і нешкідливих дій, процесів (ремонт, миття панелей водою);
- тривалий час роботи акумулятора та ремонтпридатність позитивно впливають на навколишнє середовище.

Отже, виробництво електроенергії з використанням сонячних панелей запобігає забрудненню повітря в порівнянні з виробництвом електроенергії тепловими електростанціями і скоротити викиди парникових газів.

Під час експлуатації сонячної електростанції унеможливується вплив на хімічний склад атмосферного повітря. Коронні розряди можуть викликати невелике утворення озону (O_3) біля проводів в сиру погоду.

Традиційні способи вироблення електроенергії пов’язані з негативними глобальним і локальним впливом на довкілля, спричиненим:

- викидом в атмосферу таких шкідливих речовин, як оксиди сірки й азоту, моноокси вуглецю, тверді частинки золи, концентровані органічні речовини, зокрема банз(а)пірен та ін.;

– викидом величезних кількостей діоксиду вуглецю, що є основним чинником виникнення «парникового ефекту»;

- тепловим забрудненням довкілля;
- споживанням у великих об'ємах кисню і води;
- скиданням мінералізованих і нагрітих вод.

Географічне положення України сприятливе для реалізації проєктів щодо застосування сонячних панелей для виготовлення електроенергії. Для клімату України характерна велика кількість сонячних днів: за ступенем інсоляції Україна значно випереджає визнаного європейського лідера у галузі сонячної енергетики – Німеччину. Державою також декларується всебічна підтримка проєктів з відновлювальної енергетики. Але на практиці втілення таких проєктів вимагає врахування низки нюансів, без яких ініціатор проєкту може зіткнутися з серйозними обмеженнями та ризиком не отримати цільових показників.

Для широкого прийняття використання сонячної енергії в енергетиці Україна повинна розумно оцінити свій потенціал. Оцінка сонячного потенціалу енергії базується на загальних принципах для всіх альтернативних джерел енергії. Це комплекс стохастичних процесів характерним для яких є прояв певної мінливості. Оцінюючи потенціал сонячної енергії, необхідно враховувати закономірності отриманого випромінювання на поверхню рельєфу через постійне обертання Землі навколо Сонця, і стохастичні зміни кліматичних умов – хмарність, вологість повітря, прозорість атмосфера. Крім того, необхідно враховувати особливості ймовірності кліматичних умови, засновані на даних спостережень.

За даними Flanders Investment&Trade [29], відновлювальні джерела в Україні потенційно можуть

задовольнити 78% потреби виробництва електроенергії якщо будуть введені в дію нові об'єкти сонячної енергетики.

Оцінка ресурсів сонячної електростанції здійснюється на основі багаторічних спостереження головних характеристик сонячного випромінювання. В результаті, формується набір кількісних показників, що характеризують змінний характер отримання цього виду енергії і особливості цих змін. Кліматичне обґрунтування розташування і експлуатації сонячних електростанцій має врахувати особливості розподілу сонячної енергії в конкретній галузі. Основні показники радіаційного режиму, які широко використовуються в сонячній енергетиці, є тривалість сонячного світла і хмарність. Негативний фактором в експлуатації СЕС є непостійність в надходженні сонячної радіації, яка стає причиною втрати значної частини потенційної електрики. Хмарність, як індикатор радіаційного режиму, відображає мінливість фізичних перешкод, отримувати достатньо енергії на фотоелектричних пластинах, викликаючи нерівномірність роботи сонячної електростанції протягом дня.

За даними Національної академії наук України і Держкомітету України з енергозбереження [13], середньорічна кількість всього сонячного випромінювання отримано на 1 м² поверхні, на території України знаходиться в межах: від 1070 в північній частині України до 1400 кВт·год / м² в південних регіонах. Оцінний потенціал сонячної енергії в Україні є достатньо високим для широкого застосування як теплового, так і фотоелектричного обладнання практично в усіх областях. Період ефективної роботи сонячної електростанції в південних регіонах

Таблиця 2. Сумарний річний потенціал сонячної енергії в окремих областях на території України

№	Область	Потенціал сонячної енергії, МВт * год / рік		
		Загальний потенціал(10 ⁹)	Технічний потенціал(10 ⁷)	Економічний потенціал(10 ⁶)
1.	Вінницька	30,8	14,8	2,3
2.	Волинська	21,8	10,5	1,6
3.	Дніпропетровська	37,6	18	2,8
4.	Житомирська	32,3	15,5	2,4
5.	Закарпатська	15,5	7,5	1,2
6.	Київська	31,5	15,5	2,4
7.	Миколаївська	32,5	15,6	2,4
8.	Одеська	45,4	21,8	3,4
9.	Полтавська	31,9	15,3	2,4
10.	Рівненська	21,8	10,5	1,6
11.	Сумська	26	12,5	2,0
12.	Херсонська	38,4	18,4	2,9
13.	Хмельницька	24,3	11,6	1,8
14.	Черкаська	24,2	11,6	1,8
15.	Чернівецька	9,6	4,6	0,7
16.	Чернігівська	34,2	16,4	2,6
Всього		718,4	345,1	53,8

проходять сім місяців – з квітня по жовтень. В північних регіонів на два місяці менше – з травня по вересень. Таким чином, сонячні системи в Україні працюють протягом всього календарного року, але зі змінною ефективністю (табл. 3).

Згідно з табл. 2, найбільший внесок у ці показники роблять такі області: 1. Одеська область має найвищий економічний потенціал ($3,4 \cdot 10^{50}$ МВт·год/рік). 2. Херсонська область посідає друге місце ($2,9 \cdot 10^{50}$ МВт·год/рік). 3. Дніпропетровська область замикає трійку лідерів ($2,8 \cdot 10^{50}$ МВт·год/рік). Найменший показник зафіксовано у Чернівецькій області ($0,7 \cdot 10^{50}$ МВт·год/рік).

Розглядаючи дані енергетичного потенціалу зважаючи на частину кожного регіону в узагальнених показниках по країні, слід зазначити, що середнє значення для регіонів становить 4,4% на область. Найбільшу перевагу має Одеська та інші південні області, де спостерігається позитивне відхилення від медіани з максимальним 6,3% в Одеській області.

Незважаючи на те, що освітлення території України достатньо для потужного розвитку сонячної

енергетики в загальному виробництві енергії, альтернативні джерела становлять незначну частину – за даними Державного Агентства з енергоефективності та енергозбереження України, показник – не перевищує 2% за результатами 2021 року, але потенціал зростання ринку, приєднавшись до Європейського енергетичного співтовариства, Україна взяла зобов'язання довести частку відновлюваної енергії в енергетичному балансі країни до 11% в 2024 році. Однак Україна в 2024 році зіткнулася з різким скороченням вкладень у проекти з відновлювальної енергетики, коли в державі почалось знищення енергоресурсів.

Це дуже чітко відображає ступінь розвитку сонячної енергії в Україні той факт, що в середньому в країнах ЄС на одного жителя припадає $33,7 \text{ м}^2$ колекторні поверхні, а в Україні – $0,001 \text{ м}^2$ [30].

Як і в більшості країн, державна політика в цілому по Україні встановлює позитивний вектор розвитку виробництва електроенергії з використанням відновлюваних джерел, також одним з головних стимулів є так званий «зелений» тариф – спеціальне тарифне розмежування, відповідно до якого держава купує



Рис. 3. Структура виробництва електроенергії в Україні з відновлювальних джерел

Таблиця 3. SWOT-аналіз розвитку сонячної енергетики України

	Переваги:	Недоліки:
Внутрішні фактори	Сильні сторони: – можливість будувати електростанції різних потужностей (модульність конструкції); – значний потенціал генерації в існуючих географічних та кліматичних умовах.	Слабкі сторони: – нерівномірне вироблення енергії в просторі та часі; – слабкий розвиток вітчизняних технологій на промисловому рівні; – необхідність створення відповідної інфраструктури (дороги, лінії електропередачі, трансформаторні підстанції).
Зовнішні фактори	Можливості: – додаткове вироблення енергії для потреб споживачів; – значне зниження забруднення навколишнього середовища; – широкі можливості для міжнародних інвестицій; – наявність необхідних умов в географічному ландшафті (степ).	Загрози: – технічні нюанси при підключенні до загального електромережі; – нефіксований тариф на електроенергію; – політична нестабільність; – високі процентні ставки; – бюрократичні перешкоди.

у комерційних організацій та приватних осіб енергія, що виробляється з використанням відновлюваних джерел енергії. Активізація процесу впровадження сонячної енергетики в Україні потребує ретельного вивчення всіх можливостей для розвитку індустрії. Для цього систематизуємо оброблені дані та проведемо SWOT-аналіз сонячної енергетики в Україні (табл. 3).

Розвиток сучасних технологій не дозволяє приймати залежність від не відновлюваної електроенергії краще, навпаки, сприяє систематичності залучаючи значну частину цих ресурсів у процес суспільного виробництва, що залишається в розпорядженні людини. Енергетичне питання, як і будь-яку проблему, не можна вирішити, тому що для цього потрібно пройти число етапів від збору даних, вивчення ситуації, вироблення гіпотез до практичної перевірки результатів та повномасштабна реалізація механізм вирішення проблеми.

Енергоефективність та економія енергії основні напрямки наукових досліджень як засновані на науково-дослідницькому. Дві найважливіші складові успішного розвитку України є: сучасні підходи до енергетики та сільського господарства. Як у сільськогосподарському виробництві, так і у використанні відновлюваних джерел енергії та енергоефективних засобів управління господарством наша держава має величезний потенціал. Україна – одна з п'яти країн з найпотужнішим науково-технічним та технологічним потенціалом для подальшого розвитку сонячної енергетики.

ВИСНОВКИ

Провели детальний аналіз поняття альтернативних джерел енергії з акцентом на сутності та характеристиках сонячної енергії. Альтернативна енергетика

є ключовим елементом світової та національної стратегії енергетичної безпеки та декарбонізації. Вона охоплює ресурси, які є відновлюваними (сонце, вітер, вода, біомаса, геотермальні джерела) і мають значно менший вплив на довкілля порівняно з викопним паливом. Сонячна енергія (Solar Energy) є найбільш доступним і розподіленим джерелом серед ВДЕ, ґрунтуючись на перетворенні електромагнітного випромінювання Сонця на електричну (через фотоелектричні модулі – ФЕМ) або теплову енергію. Отже, сутність сонячної енергії полягає у використанні фотоелектричного ефекту – процесу, в якому енергія фотонів вивільняє електрони в напівпровідниковому матеріалі (найчастіше кремнії), створюючи постійний електричний струм. Технічні характеристики ФЕМ продовжують покращуватися, забезпечуючи зростання ефективності перетворення (до 20–22% і вище для комерційних рішень) та зниження вартості.

Визначили роль і значення сонячної енергетики в загальному енергетичному балансі України, враховуючи сучасний стан електроенергетичної галузі. Роль сонячної енергетики в Україні є стратегічно важливою і зростаючою, незважаючи на проблеми військового часу та зниження «зеленого» тарифу, СЕС залишаються одним із найбільш швидко впроваджуваних та децентралізованих джерел генерації. Сонячні електростанції сприяють децентралізації енергосистеми, що критично важливо в умовах частих атак на централізовану інфраструктуру. Проаналізували переваги та обмеження використання сонячних джерел енергії, включаючи екологічні, економічні та технічні аспекти.

REFERENCES

- [1] Abhilash, P., Kumar, R.N., & Kumar, R.P. (2021). Solar powered water pump with single axis tracking system for irrigation purpose. *Materials Today: Proceedings*, 39, 553-557. doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.336.
- [2] Andrusiv, U., Simkiv, L., Dovgal, O., Demchuk, N., Potryvaieva, N., Cherchata, A., Popadynets, I., Tkachenko, G., Serhieieva, O., & Sydor, H. (2020). Analysis of economic development of Ukraine regions based on taxonomy method. *Management Science Letters*, 10(3), 515-522. doi: 10.5267/j.msl.2019.9.029.
- [3] Ashraf, A., & Jamil, K. (2022). Solar-powered irrigation system as a nature-based solution for sustaining agricultural water management in the Upper Indus Basin. *Nature-Based Solutions*, 2, article number 100026. doi: 10.1016/j.nbsj.2022.100026.
- [4] Bezhenar, I.M. (2023). Prospects for green business in Ukrainian farms. In *Proceedings of the VII international scientific and practical conference "Practical and theoretical issues of science and education development"* (pp. 20-28). Lviv: Lviv Scientific Forum.
- [5] Bytko, D., & Krylova, I. (2022). Alternative energy sources as a key to the efficient functioning of agricultural enterprises. In *Materials of the IX all-Ukrainian scientific and practical conference "Environmental and social aspects of economic development in the context of European integration"* (pp. 234-236). Mykolaiv: Mykolaiv National Agrarian University.
- [6] Dovgal, O., Potryvaieva, N., Bilichenko, O., Kuzoma, V., & Borko, T. (2024). Agricultural sector circular economy development: Agroecological approach. *Ekonomika APK*, 31(4), 10-22. doi: 10.32317/ekon.apk/4.2024.10.
- [7] Dyer, J., & Shapiro, J. (2023). Pumps, prosperity and household power: Experimental evidence on irrigation pumps and smallholder farmers in Kenya. *Journal of Development Economics*, 163, article number 103034. doi: 10.1016/j.jdeveco.2022.103034.
- [8] Froter, O.S., & Revutska, A.O. (2024). Ecological innovations as a basis for the restoration and development of the agricultural sector of Ukraine. In *Proceedings of the VII international scientific and practical conference "Competitive model of innovative development of the Ukrainian economy"* (pp. 291-292). Kropyvnytskyi: Central Ukrainian National Technical University.
- [9] Glovatskii, O., Dzhrabekov, A., Sadiev, U., Rustamov, S., Rashidov, J., & Saparov, A. (2023). Improving the efficiency of irrigation pumps. *AIP Conference Proceedings*, 2612, article number 020030. doi: 10.1063/5.0113295.

- [10] Gorjian, S., Calise, F., Kant, K., Ahamed, M.S., Copertaro, B., Najafi, G., Zhang, X., Aghaei, M., & Shamshiri, R.R. (2021a). A review on opportunities for implementation of solar energy technologies in agricultural greenhouses. *Journal of Cleaner Production*, 285, article number 124807. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124807.
- [11] Gorjian, S., Ebadi, H., Trommsdorff, M., Sharon, H., Demant, M., & Schindele, S. (2021b). The advent of modern solar-powered electric agricultural machinery: A solution for sustainable farm operations. *Journal of Cleaner Production*, 292, article number 126030. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126030.
- [12] Havrysh, V., Hruban, V., Sadovoy, O., Batsurovska, I., Fedorchuk, V., & Yablunovskaya, K. (2020). Energy saving technologies for automatic move irrigation equipment. In *Proceedings of the problems of automated electrodrive. Theory and practice* (pp. 1-4). Kremenchuk: IEEE. doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240881.
- [13] Hilarydoss, S. (2023). Suitability, sizing, economics, environmental impacts and limitations of solar photovoltaic water pumping system for groundwater irrigation – a brief review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(28), 71491-71510. doi: 10.1007/s11356-021-12402-1.
- [14] Holovnia, O., & Chemerys, Y. (2024). Current innovative trends of the agricultural equipment market in the global environment. *Economy and Society*, 66. doi: 10.32782/2524-0072/2024-66-18.
- [15] Hossain, M.S., Abboodi Madlool, N., Al-Fatlawi, A.W., & El Haj Assad, M. (2023). High penetration of solar photovoltaic structure on the grid system disruption: An overview of technology advancement. *Sustainability*, 15(2), article number 1174. doi: 10.3390/su15021174.
- [16] International Energy Agency. (2024). World energy outlook 2024. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>.
- [17] International Renewable Energy Agency. (2024). Renewable power generation costs in 2023. Retrieved from <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023>.
- [18] Ismanzhanov, A.I., & Tashiev, N.M. (2016). Development and research of the technology for powdering agricultural products using solar energy. *Applied Solar Energy* (English translation of *Geliotekhnika*), 52(4), 256-258. doi: 10.3103/S0003701X16040101.
- [19] Ismanzhanov, A.I., Murzakulov, N.A., & Azimzhanov, O.A. (2012). Investigation on heat exchange in interlayer space of multilayer greenhouses. *Applied Solar Energy* (English translation of *Geliotekhnika*), 48(2), 118-120. doi: 10.3103/S0003701X12020107.
- [20] Kalinichenko, A., & Havrysh, V. (2019). Feasibility study of biogas project development: Technology maturity, feedstock, and utilization pathway. *Archives of Environmental Protection*, 45(1), 68-83. doi: 10.24425/aep.2019.126423.
- [21] Kalysh, S.A. (2024). Ecological and economic prospects of energy saving processes in the field of crop production. Luts'k: Lesya Ukrainka Volyn National University.
- [22] Kryvokhyzha, Ye.M., Reznichenko, V.P., & Kyselov, O.M. (2024). Resource management strategies in the agricultural sector of Ukraine under the conditions of the energy crisis. *Podilian Bulletin: Agriculture, Engineering, Economics*, 45(4), 16-27. doi: 10.37406/2706-9052-2024-4.2.
- [23] Kumar, C.M., et al. (2023). Solar energy: A promising renewable source for meeting energy demand in Indian agriculture applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 55, article number 102905. doi: 10.1016/j.seta.2022.102905.
- [24] Lazarenko, V. (2024). Post-war recovery of the agricultural sector of the economy in the context of achieving the goals of "sustainable development". In *Collection of abstracts of reports the 2nd international scientific and practical conference "Sustainable development trajectories of Ukraine and the world: Challenges and drivers"* (pp. 82-83). Kyiv: International European University.
- [25] Lingayat, A., Balijepalli, R., & Chandramohan, V.P. (2021). Applications of solar energy based drying technologies in various industries – A review. *Solar Energy*, 229, 52-68. doi: 10.1016/j.solener.2021.05.058.
- [26] Majeed, Y., Khan, M.U., Waseem, M., Zahid, U., Mahmood, F., Majeed, F., Sultan, M., & Raza, A. (2023). Renewable energy as an alternative source for energy management in agriculture. *Energy Reports*, 10, 344-359. doi: 10.1016/j.egyr.2023.06.032.
- [27] Mikhnenko, S. (2024). Agro-photovoltaics – a new European trend. Retrieved from <https://aw-therm.com.ua/agri-pv-agrofotovoltayika-novij-yevropejskij-trend/>.
- [28] Встановлена потужність СЕС в країнах Європи по відношенню до їх площі – дослідження <https://aseu.org.ua/vstanovlena-potuzhnist-ses-v-krainakh-ievropy-po-vidnoshenniu-do-ikh-ploshchi-doslidzhennia/>
- [29] Bloomberg New Energy Finance: UN Environment: 2019. URL: <https://about.bnef.com/> (дата звернення: 10.10.2025).
- [30] Solar Magazine: експертна оцінка Energytrend: 2017. URL: <https://kreston-gcg.com/wpcontent/uploads/2018/01> (дата звернення: 2.11.2025).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Abhilash, P., Kumar, R.N., & Kumar, R.P. (2021). Водяний насос на сонячній енергії з одноосьовою системою стеження для зрошення. *Materials Today: Proceedings*, 39, 553-557. doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.336.
- [2] Андрусів, У., Сімків, Л., Довгал, О., Демчук, Н., Потривасва, Н., Черчата, А., Попадинець, І., Ткаченко, Г., Сергєєва, О., & Сидор, Г. (2020). Аналіз економічного розвитку регіонів України на основі методу таксономії. *Management Science Letters*, 10(3), 515-522. doi: 10.5267/j.msl.2019.9.029.
- [3] Ашраф, А., та Джаміль, К. (2022). Сонячна система зрошення як природне рішення для сталого управління водними ресурсами в сільському господарстві у верхній частині басейну Інду. *Природні рішення*, 2, номер статті 100026. doi: 10.1016/j.nbsj.2022.100026.

- [4] Безженар, І.М. (2023). Перспективи зеленого бізнесу в українських фермерських господарствах. У Матеріалах VII міжнародної науково-практичної конференції «Практичні та теоретичні питання розвитку науки і освіти» (с. 20-28). Львів: Львівський науковий форум.
- [5] Битко, Д., & Крилова, І. (2022). Альтернативні джерела енергії як запорука ефективного функціонування сільськогосподарських підприємств. У Матеріали IX Всеукраїнської науково-практичної конференції «Екологічні та соціальні аспекти економічного розвитку в контексті європейської інтеграції» Миколаїв. Миколаївський національний аграрний університет. с. 234-236.
- [6] Довгал, О., Потривасва, Н., Біліченко, О., Кузома, В., & Борко, Т. (2024). Розвиток циркулярної економіки в аграрному секторі: агроекологічний підхід. Економіка АПК, 31(4), 10-22. doi: 10.32317/ekon.apk/4.2024.10.
- [7] Дієр, Дж., Шапіро, Дж. (2023). Насоси, процвітання та енергозабезпечення домогосподарств: експериментальні дані про зрошувальні насоси та дрібних фермерів у Кенії. Журнал економіки розвитку, 163, номер статті 103034. doi: 10.1016/j.jdevco.2022.103034.
- [8] Фротер, О.С., & Ревуцька, А.О. (2024). Екологічні інновації як основа відновлення та розвитку сільськогосподарського сектору України. У матеріалах VII міжнародної науково-практичної конференції «Конкурентна модель інноваційного розвитку української економіки» (с. 291-292). Кропивницький: Центральний український національний технічний університет.
- [9] Гловацький, О., Джурабеков, А., Садієв, У., Рустамов, С., Рашидов, Дж., Сапаров, А. (2023). Підвищення ефективності зрошувальних насосів. Матеріали конференції AIP, 2612, номер статті 020030. doi: 10.1063/5.0113295.
- [10] Горджіан, С., Калісе, Ф., Кант, К., Ахамед, М.С., Копертаро, Б., Наджафі, Г., Чжан, С., Агаї, М., & Шамшірі, Р.Р. (2021a). Огляд можливостей впровадження технологій сонячної енергії в сільськогосподарських теплицях. Журнал «Чисте виробництво», 285, номер статті 124807. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124807.
- [11] Gorjian, S., Ebadi, H., Trommsdorff, M., Sharon, H., Demant, M., & Schindele, S. (2021b). Поява сучасних сільськогосподарських машин, що працюють на сонячній енергії: рішення для сталого ведення сільського господарства. Journal of Cleaner Production, 292, номер статті 126030. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126030.
- [12] Havrysh, V., Hruban, V., Sadovoy, O., Batsurovska, I., Fedorchuk, V., & Yablunovskaya, K. (2020). Енергозберігаючі технології для автоматичного переміщення зрошувального обладнання. У Матеріалах з проблем автоматизованого електроприводу. Теорія і практика (с. 1-4). Кременчук: IEEE. doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240881.
- [13] Hilarydoss, S. (2023). Придатність, розміри, економічність, вплив на навколишнє середовище та обмеження сонячної фотоелектричної системи водопостачання для зрошення ґрунтових вод – короткий огляд. Дослідження в галузі екологічних наук та забруднення навколишнього середовища, 30(28), 71491-71510. doi: 10.1007/s11356-021-12402-1.
- [14] Holovnia, O., & Chemerys, Y. (2024). Сучасні інноваційні тенденції ринку сільськогосподарського обладнання в глобальному середовищі. Економіка та суспільство, 66. doi: 10.32782/2524-0072/2024-66-18.
- [15] Hossain, M.S., Abboodi Madlool, N., Al-Fatlawi, A.W., & El Haj Assad, M. (2023). Високий рівень проникнення сонячних фотоелектричних структур у порушення роботи енергосистеми: огляд технологічного прогресу. Сталий розвиток, 15(2), номер статті 1174. doi: 10.3390/su15021174.
- [16] Міжнародне енергетичне агентство. (2024). Світовий енергетичний прогноз на 2024 рік. Отримано з <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>.
- [17] Міжнародне агентство з відновлюваних джерел енергії. (2024). Вартість виробництва відновлюваної енергії у 2023 році. Завантажено з <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023>.
- [18] Ісманжанов, А.І., & Ташієв, Н.М. (2016). Розробка та дослідження технології подрібнення сільськогосподарської продукції з використанням сонячної енергії. Applied Solar Energy (англійський переклад Geliotekhnika), 52(4), 256-258. doi: 10.3103/S0003701X16040101.
- [19] Ісманжанов, А.І., Мурзакулов, Н.А., & Азімжанов, О.А. (2012). Дослідження теплообміну в міжшаровому просторі багатощарових теплиць. Прикладна сонячна енергія (англійський переклад Геліотехніка), 48(2), 118-120. doi: 10.3103/S0003701X12020107.
- [20] Калиниченко, А., та Гавриш, В. (2019). Техніко-економічне обґрунтування розробки проекту з виробництва біогазу: зрілість технології, сировина та шляхи утилізації. Архів охорони навколишнього середовища, 45(1), 68-83. doi: 10.24425/aep.2019.126423.
- [21] Калиш, С.А. (2024). Екологічні та економічні перспективи енергозберігаючих процесів у галузі рослинництва. Луцьк: Волинський національний університет імені Лесі Українки.
- [22] Кривохижа, С.М., Резніченко, В.П., & Киселов, О.М. (2024). Стратегії управління ресурсами в аграрному секторі України в умовах енергетичної кризи. Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка, 45(4), 16. С. 16-27.
- [23] Kumar, S.M., et al. (2023). Сонячна енергія: перспективне відновлюване джерело для задоволення енергетичних потреб індійського сільського господарства. Технології та оцінки сталого енергоспоживання, 55, номер статті 102905. doi: 10.1016/j.seta.2022.102905.
- [24] Лазаренко, В. (2024). Післявоєнне відновлення сільськогосподарського сектору економіки в контексті досягнення цілей «сталого розвитку». Збірник тез доповідей 2-ї міжнародної науково-практичної конференції «Траєкторії сталого розвитку України та світу: виклики та рушії» Київ: МСУ. С. 82-83.
- [25] Лінгайт, А., Баліджепаллі, Р., та Чандрамохан, В.П. (2021). Застосування технологій сушіння на основі сонячної енергії в різних галузях промисловості – огляд. Сонячна енергія, 229, 52-68. doi: 10.1016/j.solener.2021.05.058.

- [26] Маджид, Ю., Хан, М.У., Васім, М., Захід, У., Махмуд, Ф., Маджид, Ф., Султан, М., & Раза, А. (2023). Відновлювана енергія як альтернативне джерело для управління енергією в сільському господарстві. Енергетичні звіти, 10, 344-359. doi: 10.1016/j.egy.2023.06.032.
- [27] Mikhnenko, S. (2024). Агрофотовольтаїка – новий європейський тренд. Отримано з <https://aw-therm.com.ua/agri-pv-agrofotovoltayika-novij-yevropejskij-trend/>.
- [28] Встановлена потужність СЕС в країнах Європи по відношенню до їх площі – дослідження <https://aseu.org.ua/vstanovlena-potuzhnist-ses-v-krainakh-ievropy-po-vidnoshenniu-do-ikh-ploshchi-doslidzhennia/>
- [29] Bloomberg New Energy Finance: UN Environment: 2019. URL: <https://about.bnef.com/> (accessed on 10.10.2025).
- [30] Solar Magazine: expert assessment by Energytrend: 2017. URL: <https://kreston-gcg.com/wpcontent/uploads/2018/01> (accessed on 2.11.2025).

© Демчук Л. І., Алпатова О. М.

Дата першого надходження статті до видання: 06.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)