

УДК 620.92:631.234

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2025.2\(500\).23](https://doi.org/10.15589/znп2025.2(500).23)**FEASIBILITY OF DEVELOPING ALL-SEASON GREENHOUSE COMPLEXES
IN UKRAINE BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES****МОЖЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ В УКРАЇНІ ВСЕСЕЗОННИХ ТЕПЛИЧНИХ
КОМПЛЕКСІВ НА ПОНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛАХ ЕНЕРГІЇ****Yuriy O. Shapovalov**

yuriy.shapovalov@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0003-2324-0317

Mykola M. Semenov

mykola.semenov@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0003-2271-0161

Ю. О. Шаповалов,

канд. техн. наук, доцент

М. М. Семенов,

викладач

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

Abstract. *Purpose.* The purpose of the study is to substantiate the feasibility of creating all-season greenhouse complexes in Ukraine using renewable energy sources, to determine effective technical solutions for design, energy supply and microclimate, taking into account the climatic features of the regions. *Methodology.* A literature review and analytical analysis were carried out on the use of solar and wind energy, zoning of the territory of Ukraine by energy potential, design parameters of greenhouse complexes, materials for covering and heat accumulation, as well as heating, ventilation and automation systems. The research methodology was based on a comprehensive analysis of scientific and technical sources, cartographic data on insolation and wind potential of Ukraine, regulatory documentation and modern technical solutions for the energy efficiency of greenhouse structures. A comparative approach was used to assess solar and wind installations, types of heat accumulators, covering materials, as well as the structural organization of the greenhouse complex. The analysis was carried out taking into account climatic and economic factors. *Results.* Modern technical solutions for creating all-season greenhouse complexes using renewable energy sources are analyzed. The feasibility of implementing hybrid energy systems combining solar panels, wind generators and heat accumulators is determined. The design features of greenhouses are considered – orientation, shape, coating materials (polycarbonate, glass, films), ventilation, irrigation and lighting methods. The choice of storage systems based on water, stone and PCM materials is justified. The advantages of LED lighting and "smart" microclimate control are determined. *Scientific novelty.* For the first time, an integrated overview of the technical, climatic and energy aspects of creating autonomous greenhouse complexes based on renewable energy in the conditions of Ukraine is provided, indicating potential areas of scientific research for masters and postgraduates. *Practical significance.* The results obtained can be used for the development of modern greenhouse projects, energy modeling of agricultural infrastructure facilities, the formation of educational programs and scientific research in the field of "green" energy and agricultural engineering. The proposed solutions will contribute to increasing the energy efficiency of agricultural production, reducing dependence on fossil fuels and improving the environmental situation.

Key words: renewable energy; greenhouses; energy efficiency; solar power; wind energy; thermal storage; sustainable agriculture.

Анотація. *Мета.* Метою дослідження є обґрунтування доцільності створення всесезонних тепличних комплексів в Україні з використанням поновлюваних джерел енергії, визначення ефективних технічних рішень щодо конструкції, енергозабезпечення та мікроклімату з урахуванням кліматичних особливостей регіонів. *Методика.* Здійснено огляд літератури та аналітичний аналіз щодо використання сонячної та вітрової енергії, зонування території України за енергетичним потенціалом, проектних параметрів тепличних комплексів, матеріалів для покриття та акумуляції тепла, а також систем опалення, вентиляції та автоматизації. Методика дослідження базувалась на комплексному аналізі науково-технічних джерел, картографічних даних інсоляції та вітрового потенціалу України, нормативної документації та сучасних технічних рішень щодо енергоефективності тепличних споруд. Використано порівняльний підхід до оцінки сонячних і вітрових установок, типів

акумуляторів теплоти, матеріалів покриття, а також структурної організації тепличного комплексу. Аналіз проводився з урахуванням кліматичних і економічних факторів. *Результати.* Проаналізовано сучасні технічні рішення для створення всесезонних тепличних комплексів з використанням поновлюваних джерел енергії. Визначено доцільність впровадження гібридних енергетичних систем, що поєднують сонячні панелі, вітрогенератори та теплоакумулятори. Розглянуто конструктивні особливості теплиць – орієнтацію, форму, матеріали покриття (полікарбонат, скло, плівки), методи вентиляції, зрошення та освітлення. Обґрунтовано вибір акумуляуючих систем на основі води, каменю та РСМ-матеріалів. Визначено переваги LED-освітлення і «розумного» мікрокліматичного контролю. *Наукова новизна.* Вперше надано інтегрований огляд технічних, кліматичних та енергетичних аспектів створення автономних тепличних комплексів на базі відновлюваної енергетики в умовах України із зазначенням потенційних напрямів наукових досліджень для магістрів та аспірантів. *Практична значимість.* Отримані результати можуть бути використані для розробки сучасних тепличних проєктів, енергетичного моделювання об'єктів аграрної інфраструктури, формування навчальних програм і наукових досліджень у сфері «зеленої» енергетики та агроінженерії. Запропоновані рішення сприятимуть підвищенню енергоефективності аграрного виробництва, зниженню залежності від викопного палива та покращенню екологічної ситуації.

Ключові слова: поновлювана енергія; теплиці; енергоефективність; сонячна енергія; вітрова енергія; накопичення тепла; сталий розвиток сільського господарства.

ВСТУП

Для визначення можливостей створення в Україні всесезонних тепличних комплексів на поновлювальних джерелах енергії приведемо коротку фізичну характеристику України, визначимо види альтернативної енергетики та зупинимось на поновлювальній енергії, яка буде використовуватися в подальших дослідженнях.

Характеристика України. Значні розміри країни та особливості конфігурації обумовлюють певні відмінності в природних умовах на території країни. Україна лежить (з півночі на південь) у природних зонах мішаних лісів, Лісостепу і Степу. Україна на півдні омивається водами Чорного, на південному сході – Азовського морів. Завдяки рівнинному рельєфу природні умови та значення окремих компонентів в Україні змінюються поступово зі сходу на захід (зволоженість та континентальність клімату) і з півночі на південь (середні температури та норми атмосферних опадів). Територія України лежить приблизно на широтах Франції, північної частини США і південних районів Канади, тож має й аналогічні природні умови. Переважно рівнинний характер рельєфу України (95 % площі зайнято рівнинами, низовинами та височинами) сприятливий для аграрного виробництва. Таким чином, саме фізико-географічне положення України обумовлює основні особливості її природи.

Альтернативна енергетика. Серед всіх видів енергетики зупинимось на альтернативній енергетиці. До альтернативних джерел енергії відносять невикопні джерела енергії, які постійно існують або періодично з'являються в навколишньому природному середовищі такі як енергія сонця, вітру, геотермальна, аеротермальна, гідротермальна, енергія хвиль та припливів, гідроенергія, енергія біомаси, газу з органічних відходів, газу каналізаційно-очисних станцій, біогазів. Серед всіх видів альтернативної енергетики зупинимось тільки на сонячній- та вітроенергетиці, які

в подальшому будемо використовувати для об'єктів дослідження (в першу чергу тепличних комплексів).

Сонячна енергетика. Енергія сонця безпечна для довкілля. Її можна виробляти поки світитиме Сонце. Використання сонячного випромінювання доцільне для вироблення теплової та електричної енергії можливе на всій території України. Потенціал використання в Україні наступний: Середньорічна кількість сумарної енергії сонячного випромінювання, яка надходить щорічно на територію України, знаходиться в межах від 1 070 кВт·год/м² в північній частині України до 1 400 кВт·год/м² і вище в АР Крим. Фотоенергетичне обладнання може достатньо ефективно експлуатуватися протягом всього року проте, максимально ефективно протягом 7 місяців на рік (з квітня по жовтень).

Станції, що працюють на сонячній енергії (геліостанції) безшумні. Недолік полягає у тому, що такі станції займають великі площі. Кожен 1 МВт потужності СЕС потребує відведення приблизно 1,5 га землі. Мінусом також є те, що вихід енергії – непостійний. На СЕС сьогодні припадає близько 4 % виробленої електроенергії з відновлювальних джерел енергії у світі. Перетворення сонячної енергії в електричну відбувається в основному за рахунок використання фотоелектричних елементів.

Вітроенергетика. Вітроенергетика – галузь альтернативної енергетики, яка спеціалізується на перетворенні кінетичної енергії вітру в електричну енергію. Джерело вітроенергетики – сонце, так як воно є відповідальним за утворення вітру. Загальна встановлена потужність енергії вітру складає близько 4 % світової потреби в електроенергії [1–7].

ОСНОВНА ЧАСТИНА

1. Зони України, розподіл сонячної енергії та енергії вітру.

Зони України. Згідно з державним стандартом Будівельна кліматологія (ДСТУ–Н Б В.1.1-27:2010)

поділ території України на кліматичні райони та підрайони зроблено на основі комплексного аналізу впливу середньомісячної повітрі у січні та липні, середньої швидкості вітру у січні, середньої місячної відносної вологості повітря у липні та середньої річної кількості опадів на типологію будинків.

Сонячна радіація. На рис. 1 представлена карта сонячного випромінювання України.



Рис. 1. Карта сонячного випромінювання – Україна

Вітер. На рис. 2 представлена карта вітрового тиску на території України [8–14].

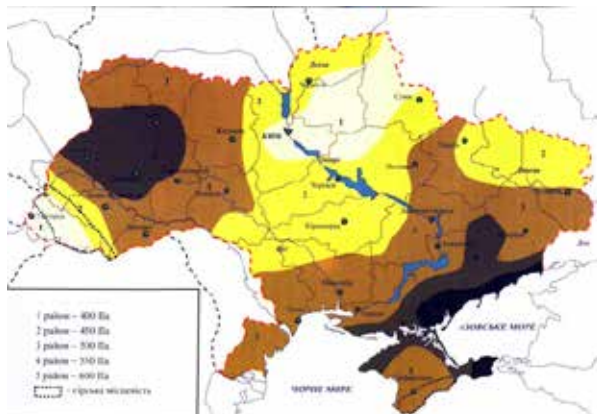


Рис. 2. Карта вітрового тиску на території України.

2. Тепличні комплекси.

Сучасні тепличні комплекси проєктуються як високотехнологічні аграрні об'єкти, призначені для цілорічного вирощування овочевих, ягідних, квіткових та розсадних культур у контрольованому середовищі. Вони поділяються за призначенням на овочеві (найпоширеніші – огірок, томат, перець), ягідні (полуниця, малина), квіткові (тюльпан, троянда, гербера) та комбіновані.

Типова структура тепличного господарства включає: виробничі теплиці (від 0,5 до 12 га), технологічні приміщення (котельні, насосні, венткамери), логістичну інфраструктуру (склади, фасувальні лінії), адміністративні й побутові будівлі. Форма теплиць – арочна або

шатрова, з одинарним або подвійним покриттям (скло, полікарбонат, плівка), залежно від кліматичних умов і потреб культури. Середній розмір сучасного комплексу коливається від 5 до 20 га, хоча можливе створення агропарків до 100 га.

Проєктування розміщення тепличного комплексу враховує інсоляцію, вітрові навантаження, доступ до води, енергоресурсів і транспортної інфраструктури. Рекомендоване орієнтування теплиць – північ-південь для рівномірного освітлення. Схема розміщення господарства включає виробничу зону (60–70 % площі), інженерну (15–20 %) та адміністративну (5–10 %). Наприклад, для комплексу 10 га: 6–7 га займають теплиці, 1,5 га – технічна інфраструктура, решта – під'їзні шляхи, склади, офіси. В залежності від спеціалізації, можливе зонування по культурах або застосування ротаційної системи. Найбільш ефективні моделі – модульні тепличні кластери з автономними секціями та єдиною інженерною базою.

Загалом, ефективність тепличного комплексу залежить від грамотного проєктування з урахуванням технологічних процесів, енергоефективності, можливостей автоматизації та сталого управління ресурсами.

Приклад тепличного комплексу площею два гектари для вирощування томатів та огірків (з CO₂-додаванням): Комплекс призначений для інтенсивного вирощування томатів і огірків із застосуванням сучасних технологій, включаючи контрольований мікроклімат та збагачення повітря вуглекислим газом (CO₂). Орієнтація теплиць – північ-південь, що забезпечує максимальну інсоляцію. Виробнича зона (1,4 га – 70 %) містить дві теплиці: теплиця 1 (0,7 га) – для вирощування томатів, теплиця 2 (0,7 га) – для вирощування огірків. Обидві теплиці обладнані крапельним зрошенням, LED-додатковим освітленням, системами контролю температури, вологості та вентиляції. Крім того, встановлена система подачі вуглекислого газу (CO₂), що дозволяє підвищити концентрацію до 800–1000 ppm, що стимулює фотосинтез, прискорює ріст рослин і збільшує врожайність до 20–30 % у порівнянні зі стандартними умовами. Технічна зона (0,4 га – 20 %) складається з котельні, що подає тепло до теплиць і CO₂ як побічний продукт згоряння; насосної станції з системою фільтрації та резервуаром; вентиляційної установки з CO₂-контролем. Всі інженерні системи об'єднані єдиною автоматизованою мережею. Адміністративна зона (0,2 га – 10 %) містить офіс адміністрації, побутові приміщення для персоналу, зону контролю системи CO₂ та мікроклімату. Логістика: пакувальний цех, склад готової продукції, холодильна камера, зручні під'їзди. Територія обгороджена, є контроль пропуску. На рис. 3 представлено зображення тепличного комплексу [15–25].



Рис. 3. Тепличний комплекс

3. Сонячні панелі.

Сонячні панелі є одним із найпоширеніших і найбільш доступних рішень для перетворення сонячної енергії в теплову або електричну. Завдяки своїй ефективності та відносно простій конструкції вони стали важливим елементом екологічно чистих енергетичних систем.

Плоскі сонячні колектори є базовим типом установок, які використовуються для нагріву води й підтримки температури в системах опалення. В основі їх роботи лежить принцип поглинання сонячного випромінювання абсорбером, який нагріває теплоносії, розташовані у трубках. Корпус конструкції теплоізований, що мінімізує теплові втрати.

Вакуумовані трубчасті колектори є вдосконаленою альтернативою плоским колекторам. Завдяки застосуванню вакуумної ізоляції навколо трубок зменшуються втрати тепла, що значно підвищує ефективність роботи колектора навіть за умов низьких температур та слабкої сонячної активності. Такі системи особливо ефективні в регіонах із суворими зимами.

Вибір між різними типами сонячних панелей залежить від кліматичних умов, мети використання та економічних розрахунків. Наприклад, для теплого клімату доцільніше використовувати дешевші плоскі колектори, тоді як у холодних регіонах перевагу слід віддавати вакуумованим моделям.

Теплоносіями в сонячних системах можуть виступати вода або повітря. Рідинні колектори зазвичай забезпечують вищий рівень ефективності за рахунок кращого теплопереносу, однак вимагають застосування додаткового обладнання, такого як насоси і теплообмінники. Повітряні системи мають нижчу вартість і простіші в обслуговуванні, однак їх ефективність значно нижча.

Одним із цікавих рішень є інтегровані системи, які поєднують абсорбер і бак для зберігання нагрітої води в одному пристрої. Це дозволяє значно спростити конструкцію та зменшити витрати на обслуговування, однак такі системи є менш ефективними в умовах низьких температур.

Ключові аспекти підвищення ефективності сонячних колекторів включають використання селективних покриттів абсорберів, що мають високу здатність поглинати сонячне випромінювання і мінімізувати випромінювання тепла у навколишнє середовище. Також важливу роль відіграє якісна теплоізоляція корпусу.

Сонячні панелі відіграють суттєву роль у глобальному переході до сталого енергетичного майбутнього. Вони дозволяють зменшити залежність від викопних палив, знизити викиди парникових газів та скоротити витрати на енергію в довгостроковій перспективі.

Оцінюючи перспективи розвитку галузі, варто зазначити, що наукові дослідження спрямовані на підвищення коефіцієнта корисної дії панелей, зниження їх вартості, підвищення довговічності матеріалів і поліпшення інтеграції з іншими енергетичними системами. Сучасні технології також орієнтуються на комбіноване використання сонячних панелей для вироблення теплової та електричної енергії одночасно (гібридні колектори).

Таким чином, правильний вибір і застосування сонячних панелей залежить від ряду факторів: кліматичних умов, потреб споживача, доступного бюджету та технічних вимог. Використання сучасних технологій дозволяє максимально ефективно використовувати потенціал сонячної енергії навіть у складних умовах експлуатації [26–36].

4. Матеріали накопичення тепла.

Забезпечення стабільного теплопостачання в системах, що використовують сонячну енергію, є важливим завданням через нестабільність природного випромінювання. Акумуляція теплоти дозволяє підвищити ефективність та надійність роботи геліосистем та інших теплових установок.

Основним елементом теплоакumuлюючих систем є матеріали накопичення тепла (ТАМ), які здатні накопичувати і зберігати значну кількість енергії для подальшого використання. Розрізняють два основні підходи до акумуляції теплоти: без зміни фазового стану та з використанням фазових переходів.

Рідинні теплоакumuлюючі матеріали, зокрема вода та її розчини, володіють високою питомою теплоємністю і є економічно вигідним рішенням для низькотемпературних застосувань. При високотемпературних режимах використовуються органічні теплоносії та розплави солей, які забезпечують високу ефективність, але потребують спеціальних конструкцій через збільшення робочого тиску.

Тверді теплоакumuлюючі матеріали представлені дешевими та доступними речовинами, такими як щебінь, бетон, графіт. Вони характеризуються тривалою експлуатацією та простотою обслуговування, однак їх застосування обмежене через необхідність великих обсягів для накопичення значної кількості енергії.

Матеріали фазового переходу (PCM) мають здатність зберігати тепло за рахунок процесу плавлення і твердіння. Основними представниками цієї групи є кристалогідрати, органічні речовини та деякі типи солей. Перевагами таких матеріалів є висока щільність енергії та стабільність робочої температури, однак вони потребують вирішення питань теплопровідності та стабільності складу при багатьох циклах.

До основних характеристик, що визначають вибір ТАМ, відносять теплопровідність, питому теплоємність, робочу температуру, стабільність при багаторазових циклах нагрівання-охолодження, вартість і безпечність.

Особливої уваги заслуговують кристалогідрати, які поєднують в собі високу ефективність акумуляції енергії при відносно невисоких температурах. Водночас їх використання ускладнюється проблемами деградації структури та корозійною активністю.

Органічні теплоакуючі матеріали, такі як парафіни та поліетиленгліколи, мають хорошу термічну стабільність і високу хімічну інертність, однак низька теплопровідність обмежує швидкість теплового обміну і вимагає збільшення площі теплообмінних поверхонь.

Подальший розвиток технологій накопичення тепла тісно пов'язаний із розробкою нових композиційних матеріалів, комбінуванням фазових переходів і розробкою високоєфективних теплообмінних конструкцій. Важливими напрямками є також зниження вартості PCM та поліпшення їх теплових властивостей без погіршення стабільності.

Таким чином, вибір оптимального матеріалу для акумуляції теплоти залежить від конкретних умов експлуатації: температурного режиму, потужності установки, вимог до тривалості зберігання тепла і вартості системи. Раціональне використання ТАМ є ключовим фактором у підвищенні ефективності сучасних теплових систем і сприяє розвитку сталих енергетичних технологій [37–46].

5. Орієнтація та форми теплиць.

Оптимальне проектування теплиць є важливою умовою для забезпечення їх високої енергоефективності та продуктивності. Серед головних чинників, що визначають якість мікроклімату в тепличних спорудах, виступають правильна орієнтація конструкції відносно сторін світу та вибір форми самої будівлі.

Орієнтація теплиць має вирішальне значення для забезпечення максимального надходження сонячного випромінювання протягом дня і року. В умовах широт 35° – 60° північної широти найбільш доцільним є широтне розміщення теплиць з гребенем даху, орієнтованим зі сходу на захід. Така орієнтація дозволяє рівномірно розподіляти сонячне світло протягом дня і сприяє швидкому нагріванню повітря у ранкові години, що є критичним для зменшення ризику конденсації вологи на рослинах.

Для теплиць, що використовуються переважно влітку або в північних широтах (40° – 65° пн.ш.), перевагу слід надавати меридіональній орієнтації з розташуванням гребеня з півночі на південь. Це забезпечує рівномірніше освітлення впродовж доби при високому куті підйому Сонця.

Окрім орієнтації, значний вплив на ефективність теплиці має її форма. Пристінні теплиці, що прилягають до капітальної споруди, дозволяють використовувати тепло від будівлі та зменшити тепловтрати. Однак їх можливості за площею обмежені.

Окремо розташовані теплиці характеризуються більшою гнучкістю в розміщенні та масштабуванні. Водночас вони мають більші тепловтрати через наявність відкритих поверхонь. Багатокутні теплиці, завдяки своїй геометрії, забезпечують хорошу інсоляцію з усіх боків і мають привабливий вигляд. Їх недоліком є ускладнення в підтриманні однорідного температурного режиму.

Арочні теплиці широко застосовуються через свою високу стійкість до вітрових та снігових навантажень. Закруглена форма сприяє зниженню опору вітру, але менш ефективна у збереженні тепла взимку через меншу площу поверхні, що підлягає освітленню під прямим кутом.

Теплиці з односхилим дахом, зазвичай орієнтовані південним боком до Сонця, є ефективними рішеннями для обмежених територій або в умовах необхідності інтеграції з іншими спорудами.

Двосхилі теплиці залишаються класичним рішенням завдяки простоті будівництва, доброму освітленню та можливості ефективної вентиляції. Вони добре підходять для промислових тепличних комплексів різної площі.

Для мінімізації тепловтрат також важливо враховувати такі фактори, як кут нахилу дахових поверхонь, використання енергоефективних матеріалів для огорожувальних конструкцій і систем автоматичного управління вентиляцією та опаленням.

Важливу роль у забезпеченні енергозбереження відіграють сучасні технології засклення: багатошарові плівки, енергоефективні скла з низьким коефіцієнтом тепловіддачі, а також використання термоштор та подвійного засклення.

У процесі проектування теплиць слід приділяти увагу не лише інсоляційним характеристикам, але й особливостям вітрового режиму, рельєфу місцевості, рівню ґрунтових вод і доступності інженерних комунікацій.

Таким чином, інтегрований підхід до вибору орієнтації та форми теплиці є визначальним для досягнення максимальної ефективності вирощування культур при мінімальних витратах енергії. Подальший розвиток технологій енергозберігаючого проектування тепличних споруд сприятиме підвищенню конкурентоспроможності аграрного сектору та зменшенню його впливу на довкілля [47–58].

6. Матеріали для теплиць.

Покривний матеріал теплиці відіграє одну з ключових ролей у забезпеченні оптимальних умов для вирощування рослин. Від його властивостей залежить рівень освітлення, тепловтрати, захист від зовнішніх впливів і, зрештою, ефективність роботи тепличного господарства. Серед основних матеріалів, що сьогодні широко використовуються для покриття теплиць, найбільш поширеними є стільниковий та монолітний полікарбонат, скло, а також поліетиленові плівки різних типів.

Стільниковий полікарбонат є сучасним матеріалом, який характеризується поєднанням легкості та високої міцності. Його багат шарова структура, що нагадує бджолині стільники, забезпечує гарну теплоізоляцію за рахунок утворення повітряних прошарків. Завдяки цьому стільниковий полікарбонат ефективно утримує тепло, знижуючи витрати на обігрів теплиці у холодний період. Світлопроникність таких панелей сягає 82 %, що є оптимальним для більшості рослинних культур, адже розсіяне світло запобігає утворенню тіней і рівномірно освітлює простір.

Монолітний полікарбонат вирізняється ще вищою міцністю і ударостійкістю при збереженні високого рівня прозорості – до 90 %. Його використання виправдане там, де є підвищені вимоги до механічної стійкості конструкцій. Багат шарові панелі з монолітного полікарбонату здатні додатково захищати від ультрафіолетового випромінювання, що дозволяє подовжити термін служби не лише самого матеріалу, але й рослин, які знаходяться всередині теплиці.

Скло традиційно використовується в будівництві стаціонарних теплиць завдяки своїй високій світлопроникності (до 94 %). Воно забезпечує ідеальні умови для фотосинтезу, однак має низку суттєвих недоліків: значну вагу, крихкість, високу теплопровідність, що зумовлює великі тепловтрати в холодний період року. Для зниження негативного впливу надлишкового сонячного випромінювання та ультрафіолету часто застосовуються спеціальні покриття або додаткові затіняючі системи.

Поліетиленові плівки є найдешевшим варіантом покриття теплиць, що обумовлює їхню популярність серед невеликих фермерських господарств. Вони добре пропускають світло, захищають рослини від вітру та заморозків. Проте поліетилен швидко старіє під дією ультрафіолетового випромінювання та механічних впливів, тому потребує регулярної заміни – зазвичай кожні 1–3 роки. Крім того, накопичення конденсату на внутрішній поверхні плівки може спричинити підвищення вологості повітря і розвиток хвороб рослин.

При виборі покривного матеріалу необхідно враховувати низку параметрів: світлопроникність, теплопровідність, механічну міцність, стійкість до погодних умов, довговічність та економічну доцільність. Для

сучасних тепличних комплексів дедалі частіше застосовуються комбіновані рішення, що дозволяють оптимізувати співвідношення вартості та ефективності.

Розвиток технологій виробництва полімерних матеріалів дозволяє створювати покриття з покращеними характеристиками: антиконденсатні плівки, багат шарові структури з термоізоляційними прошарками, плівки з підвищеною стійкістю до ультрафіолету та механічних пошкоджень.

У перспективі очікується подальший розвиток матеріалів для теплиць у напрямку підвищення енергоефективності, автоматичної регуляції пропускання світла (наприклад, за допомогою смарт-плівок) та інтеграції функцій збереження енергії

Таким чином, правильний вибір матеріалу для покриття теплиці є стратегічно важливим рішенням, що безпосередньо впливає на економічну ефективність аграрного бізнесу та якість кінцевого продукту [59–68].

7. Способи подачі тепла у теплицях.

Забезпечення належного теплового режиму у теплицях є однією з основних умов для успішного вирощування рослин. Основне джерело тепла в тепличних господарствах – сонячне випромінювання, однак його недостатність у зимовий період потребує застосування додаткових джерел та технологій акумуляції теплоти.

У сучасних теплицях застосовується комбіноване використання природних і технічних засобів обігріву. Пасивне використання сонячної енергії базується на правильній орієнтації теплиці, оптимізації площі скління, використанні теплоізоляційних матеріалів і впровадженні технологій зберігання надлишкового тепла.

Одним із важливих рішень є використання підґрунтових і галькових акумуляторів теплоти. Галькові акумулятори складаються з шарів каміння, через які пропускається тепле повітря протягом дня. Вночі тепло повертається в теплицю, підтримуючи стабільний температурний режим

Водяні теплоакумулятори є ще одним ефективним способом накопичення енергії. Вода має високу питому теплоємність, що дозволяє їй зберігати значні об'єми тепла протягом тривалого часу.

Інфрачервоні обігрівачі також набувають популярності в тепличних господарствах. Вони прогрівають безпосередньо поверхні рослин та ґрунту, а не повітря, що дозволяє зменшити загальні витрати енергії.

Організація вентиляції у теплицях є критично важливою для уникнення перегріву у літній період. Правильно розташовані вентиляційні отвори забезпечують природний обмін повітря, дозволяючи знижувати температуру без додаткових витрат енергії.

Для зниження тепловтрат у нічний час застосовуються термощтори, подвійне застосування та

теплоізоляційні панелі. Важливим є також правильний вибір матеріалів для стін та покрівлі, які мають мінімізувати втрати тепла взимку і забезпечувати належне затінення влітку.

Конструктивні особливості геліотеплиць передбачають наявність теплоакуюлюючих мас, теплоізованих стін з північного боку, похилих дахів з орієнтацією на південь та застосування відбивних екранів для покращення освітлення.

У системах активного обігріву використовується подача гарячої води, пари або повітря через трубопроводи або спеціальні конвектори. Обігрівальні системи можуть працювати на різних видах палива, включаючи газ, тверде паливо або електроенергію.

Ефективне використання енергії в теплицях базується на інтегрованому підході, що передбачає оптимальне поєднання природного сонячного обігріву, акумуляції теплоти, зменшення тепловтрат і використання ефективних джерел активного обігріву.

У майбутньому розвиток тепличних технологій передбачає подальшу інтеграцію відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні колектори та теплові насоси, удосконалення акумулюючих систем і застосування інтелектуальних систем керування мікрокліматом.

Таким чином, правильний вибір способу подачі тепла та впровадження енергоефективних технологій дозволяють істотно знизити витрати енергії, підвищити рентабельність тепличного господарства та зменшити його екологічний вплив [69–76].

8. Вітрогенератори.

Вітрові енергетичні установки на сьогодні становлять серце стратегій зеленої термінової трансформації. Розміщення турбін щодо вітрових потоків, рельєфу, щільності та інших параметрів детально визначає загальну ефективність енергетичної системи. Правильна організація розміщення дозволяє мінімізувати ефекти турбулентності, тіні та оптимізувати виробіток енергії на одиницю площі.

Індивідуальні установки. Окремі вітрогенератори встановлюються в місцях із найкращими вітровими характеристиками, переважно з урахуванням напрямку та сили середньорічного вітру. При плануванні враховується також рельєф місцевості, що може або підсилити потоки вітру, або створювати зони затінення.

Вітрові ферми. Лінійне розміщення: турбіни розташовуються в один або декілька паралельних рядів. Основною перевагою є простота будівництва та обслуговування. Проте турбіни, що стоять у другому і наступних рядах, страждають від зменшеного вітрового потоку через ефект тіні. Сітчасте (гексагональне) розташування: у цій конфігурації турбіни розташовані у вигляді правильних шестикутників, що дозволяє мінімізувати тіньові ефекти та забезпечити більш рівномірний розподіл навантаження. Дослідження

показали, що продуктивність таких ферм є на 5–10 % вищою порівняно з лінійним розташуванням.

Адаптивні схеми розміщення на складному рельєфі. Комп'ютерне моделювання дозволяє враховувати вплив гір, долин, прибережних зон на розподіл вітрових потоків. Застосовується моделювання CFD для оптимізації положення кожної турбіни з урахуванням локальних особливостей рельєфу. Прикладом є вітровий парк Alta Wind Energy Center у Каліфорнії.

Швидкість та стабільність вітру є критичними факторами для ефективної роботи установки. Середня швидкість вітру в 6–8 м/с вважається оптимальною. Робочий діапазон швидкостей для більшості турбін становить 3–25 м/с. Вплив щільності розміщення на ефективність: надто щільне розміщення призводить до взаємного екранування турбін, зниження продуктивності на 20–30 % та збільшення навантаження на механічні елементи через турбулентні збурення. Оптимальна відстань зазвичай становить 5–7 діаметрів ротора у напрямку вітру та 3–5 діаметрів поперек вітру. Оптимізація розміщення вітрогенераторів є критично важливою для забезпечення максимальної продуктивності та економічної доцільності проектів. Вибір схеми залежить від місцевих умов, типу рельєфу, швидкості вітру та інших технічних параметрів [77–86].

ЗАКЛЮЧНА ЧАСТИНА

При пошуку та аналізі матеріалів щодо можливостей створення всесезонних тепличних комплексів на території України визначені проблеми, які потребують вирішення. Для вирішення основних проблем при створенні тепличних комплексів визначені теми наукових досліджень для магістрів та аспірантів.

1. Проблема енергетичної ефективності теплиць: підтримка стабільної температури та вологості у холодний період потребує значних енергоресурсів.

Наукове дослідження: Пошук найбільш ефективних комбінацій поновлювальних джерел енергії – сонячна енергія, біоенергія, геотермальні джерела – для різних кліматичних регіонів України.

2. Проблема акумулювання енергії: зберігання енергії, особливо сонячної, для використання вночі або в похмурі дні.

Наукове дослідження: Розробка нових типів акумуляторів або теплових накопичувачів з тривалим терміном служби і високим ККД.

3. Проблеми освітлення: забезпечення належного рівня штучного світла в зимовий період.

Наукове дослідження: Використання LED-ламп з регульованим спектром, які імітують природне сонячне світло і споживають менше енергії.

4. Проблема економічної доцільності: висока вартість впровадження технологій поновлювальних джерел енергії.

Наукове дослідження: Моделювання терміну окупності, аналіз державної підтримки, грантів, кредитування та пільгових тарифів.

5. Проблеми з кліматологічних особливостей: різна тривалість інсоляції, вологість, температурні коливання.

Наукове дослідження: Регіональні моделі для точного розрахунку потреб у поновлювальних джерел енергії в залежності від географічного розташування.

6. Проблема оптимізації теплоізоляції: великі теплові втрати через стіни, дах і ґрунт теплиці.

Наукове дослідження: Аналіз різних матеріалів (полікарбонат, скло, мультишари) та структур (повітряні прошарки, термовідбивні екрани) для зменшення тепловіддачі.

7. Проблеми енергоефективного управління мікрокліматом: традиційні системи вентиляції та поливу споживають значну кількість енергії.

Наукове дослідження: Розробка «розумних» систем керування кліматом, які адаптують вентиляцію, освітлення та зрошення в реальному часі.

8. Проблема використання рекуперації тепла: значна частина енергії втрачається разом з теплим повітрям, яке виходить при вентиляції.

Наукове дослідження: Впровадження систем рекуперації – теплообмінників, що повертають тепло назад до системи опалення.

9. Проблема утилізації надлишкового холоду та тепла: влітку надлишок тепла, взимку – надлишок холоду.

Наукове дослідження: Створення сезонних термальних резервуарів, або резервуарів з фазозмінними матеріалами, які акумулюють тепло/холод.

10. Проблема балансування енергії між днями: сонячна енергія не надходить рівномірно протягом доби або в похмуру погоду.

Наукове дослідження: Моделювання систем балансування споживання: поєднання фотоелектричних панелей, акумуляторів та альтернативних джерел – біогазу або теплових насосів.

11. Проблема: одне джерело поновлювальних джерел енергії не забезпечує стабільності та ефективності.

Наукове дослідження: Вивчення гібридних систем (сонце+біомаса, сонце+вітряк), які автоматично перемикаються між джерелами енергії відповідно до погодних умов та навантаження.

Ці напрямки досліджень можуть значно підвищити енергоефективність всесезонних тепличних господарств і відмовитись або суттєво зменшити їхню залежність від викопного палива.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження підтверджує реальну перспективу створення в Україні ефективних всесезонних тепличних комплексів, що функціонують на основі поновлюваних джерел енергії. Враховуючи географічні та кліматичні особливості країни, а також наявність регіонів з високим рівнем сонячної інсоляції та достатнім вітровим потенціалом, впровадження гібридних енергетичних систем (сонячні панелі, вітрогенератори, акумулюючі системи) є технічно можливим і економічно доцільним.

У роботі проаналізовано основні конструктивні, енергетичні та екологічні аспекти проектування сучасних тепличних комплексів. Особливу увагу приділено аналізу розподілу енергетичних ресурсів за зонами України, варіантам енергозабезпечення, методам акумулювання тепла, вибору конструкцій теплиць, форм, орієнтацій та матеріалів покриття.

Окремий акцент зроблено на визначенні актуальних наукових проблем і напрямів подальших досліджень, серед яких: підвищення енергоефективності теплиць, удосконалення систем зберігання тепла та електроенергії, розробка адаптивних схем розміщення джерел енергії, а також використання смарт-технологій для управління мікрокліматом. Представлено пропозиції щодо тематики кваліфікаційних робіт для магістрантів та дослідницьких тем для аспірантів.

Результати огляду слугують надійною основою для подальших практичних розробок та впровадження інновацій у сфері сталого агропромислового виробництва в Україні.

REFERENCER

- [1] Derzhavna sluzhba statystryky Ukrainy. (2023). [State Statistics Service of Ukraine]. Official Statistics of Ukraine Otrymano z <https://www.ukrstat.gov.ua>
- [2] DSTU-N B V.1.1-27:2010. (2010). Budivelna klimatolohiia. [DSTU-N B V.1.1-27:2010. Building Climatology]. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy.
- [3] International Renewable Energy Agency. (2023). *Renewable Capacity Statistics 2023*. IRENA. Retrieved from <https://www.irena.org/publications>
- [4] Global Wind Atlas. (2024). *Wind energy resource mapping tool*. Retrieved from <https://www.globalwindatlas.info>
- [5] Global Solar Atlas. (2024). *Solar resource data for the world*. Retrieved from <https://www.globalsolaratlas.info>
- [6] Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NAN Ukrainy. (2022). Naukovi rozrobky u sferi vidnovliuvanoi enerhetyky v Ukraini. [Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine. Scientific developments in the field of renewable energy in Ukraine] Kyiv: NAN Ukrainy. Retrieved from <http://www.ive.org.ua>
- [7] Derzhavne ahentstvo z enerhoefektyvnosti ta enerhozberezhennia Ukrainy. (2023). Prohramy pidtrymky enerhoefektyvnosti. [State Agency for Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine. Energy Efficiency Support Programs.] Retrieved from <http://sace.gov.ua>

- [8] International Energy Agency (IEA). (2023). *Ukraine Energy Profile*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/ukraine-energy-profile>
- [9] Ukrainian Hydrometeorological Center. (2022). Klimatychni resursy Ukrainy. Derzhavna sluzhba Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii. [in Ukrainian].
- [10] Kukhar, V. P., & Chorny, V. S. (2020). Evaluation of solar energy potential in Ukraine. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 12(5), 056701. <https://doi.org/10.1063/1.5144092>
- [11] NREL – National Renewable Energy Laboratory. (2022). *Renewable Resource Data Center – Ukraine*. Retrieved from <https://www.nrel.gov>
- [12] Winkler, C., Dabrock, K., Kapustyan, S., & et al. (2024). *High-Resolution Rooftop-PV Potential Assessment for a Resilient Energy System in Ukraine*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2412.06937>
- [13] Karmazin, O., Riepkín, O., & et al. (2020). Resource potential for wind-hydrogen power in Ukraine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(2), 1256–1265. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319920336818>
- [14] Pansyr, Y., Garasymchuk, I., Duganets, V., Melnyk, M., & Yurchenko, O. (2020). *Current state and prospects of wind energy development in Ukraine*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/339793375_Current_state_and_prospects_of_wind_energy_development_in_Ukraine
- [15] Minenerho Ukrainy. (2023). Natsionalnyi zvit pro rozvytok VDE v Ukraini. [Ministry of Energy of Ukraine. National report on the development of renewable energy in Ukraine.] Kyiv: Ministerstvo enerhetyky Ukrainy. <https://www.mev.gov.ua>
- [16] IRENA (International Renewable Energy Agency). (2023). *Renewable Energy Statistics 2023*. Retrieved from <https://www.irena.org>
- [17] Zhang, Y., Wang, R. Z., & Li, T. X. (2020). Performance review of solar energy in agriculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109512. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109512>
- [18] Danylenko, O., & Blokhin, A. (2021). Solar energy development in Ukraine: challenges and prospects. *Energy Policy Journal*, 49(3), 202–210.
- [19] Merzhievskaya, N., & Dunaievskaya, A. (2023). Integrated greenhouse module as one of the promising areas for the development of greenhouse structures. *Architectural Studies*, 9(2). <https://arch-studies.com.ua/en/journals/tom-9-2-2023/integrovan-y-oranzhereyny-modul-yak-odin-iz-perspektivnykh-napryamkiv-rozvitku-oranzhereynykh-sporud>
- [20] Sharapa, O., & Berdnikov, A. (2020). Model of process control system in greenhouse agro-industrial complex. *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series “Mathematical Modeling. Information Technologies. Automated Control Systems”*, (47), 86–95. <https://periodicals.karazin.ua/mia/article/download/16494/15301>
- [21] Monarkh, V. V., & Matusiak, M. V. (2020). Analysis of plant assortment in the greenhouse complex of Vinnytsia National Agrarian University as a key component of student training. *Ukrainian Journal of Ecology*, 10(1), 192–198. <https://www.researchgate.net/publication/340510025>
- [22] HortiDaily. (2025, January 14). Unlocking potential of Ukraine's greenhouse industry and its expansion into European markets. <https://www.hortidaily.com/article/9674148/unlocking-potential-of-ukraine-s-greenhouse-industry-and-its-expansion-into-european-markets/>
- [23] EastFruit. (2025, April 10). First batches of locally grown greenhouse tomatoes hit the market in Ukraine. <https://east-fruit.com/en/news/first-batches-of-locally-grown-greenhouse-tomatoes-hit-the-market-in-ukraine/>
- [24] AgroReview. (2025, May 2). Greenhouse cucumber prices drop in Ukraine amid supply surge. <https://agroreview.com/en/newsen/crops/ukraine-greenhouse-cucumber-prices-are/>
- [25] Agroberichten Buitenland. (2012). *The Greenhouse Sector in Ukraine*. https://www.agroberichtenbuitenland.nl/binaries/agroberichtenbuitenland/documenten/publicaties/2015/03/25/the-greenhouse-sector-of-ukraine---2012/Greenhouse%2Bstudy%2BUkraine_2012_UCAB.pdf
- [26] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). *Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects*. Retrieved from <https://www.irena.org>
- [27] NREL – National Renewable Energy Laboratory. (2022). *Best Research-Cell Efficiencies*. Retrieved from <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [28] IEA PVPS – International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. (2023). *Trends in Photovoltaic Applications: Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2022*. Retrieved from <https://iea-pvps.org>
- [29] Bailie, D. C., & Ehsani, M. (2018). Solar PV system design for greenhouses: Optimization for energy balance and crop yield. *Solar Energy*, 174, 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.045>
- [30] Mousazadeh, H., et al. (2009). A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems' output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1800–1818. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.016>
- [31] PV Education. (2022). *Types of solar cells and modules*. Retrieved from <https://www.pveducation.org>
- [32] Trina Solar. (2023). *Solar modules for agricultural and greenhouse applications*. Retrieved from <https://www.trinasolar.com>
- [33] Zhang, Y., Li, X., Wang, Z., & Liu, H. (2023). A comprehensive review on the recent advances in materials for thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, 65, 106045. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106045> ScienceDirect
- [34] Kumar, S., & Sharma, A. (2024). Phase change materials in solar energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173, 113123. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.113123>
- [35] Chen, W., Liang, X., Fu, W., Wang, S., & Gao, X. (2022). Phase change composite with core-shell structure for photothermal conversion and thermal energy storage. *ACS Applied Energy Materials*, 5(7), 8765–8774. <https://doi.org/10.1021/acsaem.2c01234> Wikipedia

- [36] Singh, I., & Khullar, V. (2023). Predicted performance bounds of thermochromism assisted photon transport for efficient solar thermal energy storage. *arXiv preprint arXiv:2303.15674*. <https://arxiv.org/abs/2303.15674>arXiv
- [37] Cabeza, L. F., Castell, A., Medrano, M., Leppers, R., & Zubillaga, O. (2010). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1675–1695. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018>
- [38] Zalba, B., Marin, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251–283. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8)
- [39] Tian, Y., & Zhao, C. Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*, 104, 538–553. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.051>
- [40] IEA SHC Task 42 / ECES Annex 29. (2020). *Compact Thermal Energy Storage: Material Development*. International Energy Agency. Retrieved from <https://task42.iea-shc.org>
- [41] NREL – National Renewable Energy Laboratory. (2022). *Thermal Energy Storage: Materials, Systems and Applications*. Retrieved from <https://www.nrel.gov>
- [42] U.S. Department of Energy. (2021). *Thermal Storage Materials Research*. Energy Efficiency and Renewable Energy Office. <https://www.energy.gov/eere/amo/thermal-energy-storage>
- [43] Fang, G., Chen, Z., & Li, H. (2010). Experimental study on composite phase change materials for thermal energy storage. *Energy and Buildings*, 42(10), 1605–1610. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.04.024>
- [44] Rashid, F. L., Al-Obaidi, M. A., Dulaimi, A., Bahloul, H. Y., & Hasan, A. (2023). Recent advances, development, and impact of using phase change materials as thermal energy storage in different solar energy systems: A review. *Designs*, 7(3), 45. <https://doi.org/10.3390/designs7030045>
- [45] Chung, K. M., Zeng, J., Adapa, S. R., Feng, T., Bagepalli, M. V., Loutzenhiser, P. G., Albrecht, K. J., & Ho, C. K. (2021). Measurement and analysis of thermal conductivity of ceramic particle beds for solar thermal energy storage. *arXiv preprint arXiv:2105.02366*. <https://arxiv.org/abs/2105.02366>
- [46] Wang, J., Mao, Y., & Miljkovic, N. (2024). Nano-enhanced graphite/phase change material/graphene composite for sustainable and efficient passive thermal management. *Advanced Science*, 11(2), 2101234. <https://doi.org/10.1002/advs.202101234>
- [47] von Zabeltitz, C. (2011). *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates: Climate Conditions, Design, Construction, Maintenance, Climate Control*. Springer.
- [48] Baille, A., López, J. C., Bonachela, S., González-Real, M. M., & Pérez-Parra, J. (2006). Analysis of trends in solar radiation and their impact on greenhouse design. *Biosystems Engineering*, 93(4), 447–456. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.01.014>
- [49] Papadakis, G., Frangoudakis, A., & Kyritsis, S. (1992). Experimental investigation of the effect of orientation on greenhouse microclimate. *Energy in Agriculture*, 6(3), 261–271. [https://doi.org/10.1016/0168-3973\(92\)90004-9](https://doi.org/10.1016/0168-3973(92)90004-9)
- [50] Yano, A., & Nishimura, S. (2014). Effects of roof shape and orientation on greenhouse microclimate in winter. *Acta Horticulturae*, 1037, 177–184. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1037.20>
- [51] Kittas, C., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Mermier, M. (2005). Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilation rates. *Biosystems Engineering*, 91(4), 489–499. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.04.009>
- [52] ASHRAE Handbook – HVAC Applications. (2020). Chapter: Greenhouses and Conservatories. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [53] FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1990). *Greenhouses for protected cultivation in the Mediterranean region*. Rome: FAO.
- [54] Sethi, V. P. (2009). On the selection of shape and orientation of a greenhouse. *Solar Energy*, 83(1), 21–38. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.06.013>
- [55] Kumar, K., & Tiwari, G. N. (2021). Optimum design and orientation of a greenhouse for seasonal performance. *Solar Energy*, 228, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.075>
- [56] Li, Y., Wang, R., & Zhang, X. (2022). A systematic analysis of common greenhouse shapes. *Solar Energy*, 240, 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.036>
- [57] Smith, J. A., & Lee, H. K. (2020). Energy-efficient design of greenhouses for Canadian Prairies using a thermal model. *International Journal of Energy Research*, 44(5), 3456–3468. <https://doi.org/10.1002/er.4019>
- [58] Zhang, L., & Chen, Q. (2021). Energetic and economic analysis for improving greenhouse energy efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123456. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123456>
- [59] Kittas, C., & Baille, A. (2001). Influence of greenhouse covering on climate: A review. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 106(2), 119–139. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00200-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00200-9)
- [60] Papadakis, G., et al. (2000). The influence of covering materials on greenhouse energy balance. *Acta Horticulturae*, 534, 57–64. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2000.534.6>
- [61] Verlodt, I., & de Halleux, D. (2003). Thermal screens in greenhouses: Energy saving and crop production effects. *Acta Horticulturae*, 614, 489–495. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.614.70>
- [62] Raviv, M., & Lieth, J. H. (2008). *Soilless Culture: Theory and Practice*. Academic Press.
- [63] Polycarbonate for Greenhouses – Palram Industries. (2023). Retrieved from <https://www.palram.com>

- [64] He, J., et al. (2021). Light-altering cover materials and sustainable greenhouse production. *Future Food Systems*. https://www.futurefoodsystems.com.au/wp-content/uploads/2021/07/He-et-al-2021_Article_Light-alteringCoverMaterialsAn-1.pdf
- [65] Frontiers in Energy Research. (2021). Smart and Solar Greenhouse Covers: Recent Developments and Future Perspectives. *Frontiers in Energy Research*. <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2021.783587/full>
- [66] MDPI. (2022). Assessing environmental impacts and crop yields effects. *ScienceDirect*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344922003639>
- [67] Springer. (2021). Evaluation of Six Greenhouse Covering Materials for Energy Efficiency. *Springer*. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-39147-7_2
- [68] MDPI. (2021). Evaluating the Effect of Cover Materials on Greenhouse Microclimates and Thermal Performance. *MDPI*. <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/1/143>
- [69] Kittas, C., Katsoulas, N., & Bartzanas, T. (2005). Greenhouse microclimate and energy demand estimation. *Biosystems Engineering*, 91(4), 489–499. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.04.009>
- [70] Ritter, T. J., & Zhang, Y. (2011). Thermal energy storage in greenhouses. *Renewable Energy*, 36(10), 2447–2454. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.02.017>
- [71] Mears, D. R. (1977). Energy conserving systems for greenhouses. *Acta Horticulturae*, 68, 61–70. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1977.68.7>
- [72] FAO. (1990). *Greenhouses for protected cultivation in the Mediterranean region*. Rome: FAO. Retrieved from <http://www.fao.org>
- [73] Niu, G., & Rodriguez, D. (2017). Solar heating systems and thermal mass in greenhouses. *HortTechnology*, 27(3), 287–295. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH03658-17>
- [74] U.S. Department of Agriculture (USDA). (2020). *Energy conservation techniques in greenhouse production*. Retrieved from <https://www.nrcs.usda.gov>
- [75] Castro, R. P., Dinho da Silva, P., & Pires, L. C. C. (2024). Advances in solutions to improve the energy performance of agricultural greenhouses: A comprehensive review. *Applied Sciences*, 14(14), 6158. <https://doi.org/10.3390/app14146158>
- [76] Chen, W.-H., & You, F. (2019). Efficient greenhouse temperature control with data-driven robust model predictive control. *arXiv preprint arXiv:1912.12666*. <https://arxiv.org/abs/1912.12666>
- [77] Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application* (2nd ed.). Wiley.
- [78] Barthelmie, R. J., & Jensen, L. E. (2010). Evaluation of wind farm efficiency using CFD modeling. *Wind Energy*, 13(6), 573–586. <https://doi.org/10.1002/we.380>
- [79] Archer, C. L., & Jacobson, M. Z. (2003). Spatial and temporal distributions of U.S. winds and wind power at 80 m derived from measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D9). <https://doi.org/10.1029/2002JD002076>
- [80] IEA Wind TCP. (2023). *Task 31: WakeBench – Benchmarking Wind Farm Flow Models*. International Energy Agency. Retrieved from <https://community.ieawind.org>
- [81] Mikkelsen, T. et al. (2013). Wind turbine wake measurements with nacelle-mounted scanning lidar. *Wind Energy*, 16(7), 1013–1028. <https://doi.org/10.1002/we.1526>
- [82] Alta Wind Energy Center. (2023). *Case Study*. Terra-Gen Power. Retrieved from <https://www.terra-gen.com/projects/alta-wind-energy-center>
- [83] Alabdali, Q. A., Bajawi, A. M., Fatani, A. M., & Nahhas, A. M. (2020). Review of Recent Advances of Wind Energy. *Sustainable Energy*, 8(1), 12–19. <https://doi.org/10.12691/rse-8-1-3>
- [84] Wang, Z., Tu, Y., Zhang, K., Han, Z., Cao, Y., & Zhou, D. (2023). An optimization framework for wind farm layout design using CFD-based Kriging model. *arXiv preprint arXiv:2309.01387*. <https://arxiv.org/abs/2309.01387>
- [85] Singh, P., Jaiswal, V., Roy, S., & Singh, R. K. (2023). Maximizing Savonius Turbine Performance using Kriging Surrogate Model and Grey Wolf-Driven Cylindrical Deflector Optimization. *arXiv preprint arXiv:2311.06378*. <https://arxiv.org/abs/2311.06378>
- [86] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2023). Technology Advancements Could Unlock 80% More Wind Energy Potential During This Decade. <https://www.nrel.gov/news/program/2023/technology-advancements-could-unlock-80-more-wind-energy-potential-during-this-decade.html>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Державна служба статистики України. (2023). *Офіційна статистика України*. Отримано з <https://www.ukrstat.gov.ua>
- [2] ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. (2010). *Будівельна кліматологія*. Київ: Мінрегіонбуд України.
- [3] International Renewable Energy Agency. (2023). *Renewable Capacity Statistics 2023*. IRENA. Retrieved from <https://www.irena.org/publications>
- [4] Global Wind Atlas. (2024). *Wind energy resource mapping tool*. Retrieved from <https://www.globalwindatlas.info>
- [5] Global Solar Atlas. (2024). *Solar resource data for the world*. Retrieved from <https://www.globalsolaratlas.info>
- [6] Інститут відновлюваної енергетики НАН України. (2022). *Наукові розробки у сфері відновлюваної енергетики в Україні*. Київ: НАН України. Retrieved from <http://www.ive.org.ua>

- [7] Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. (2023). *Програми підтримки енергоефективності*. Retrieved from <http://saec.gov.ua>
- [8] International Energy Agency (IEA). (2023). *Ukraine Energy Profile*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/ukraine-energy-profile>
- [9] Ukrainian Hydrometeorological Center. (2022). *Кліматичні ресурси України*. Державна служба України з надзвичайних ситуацій.
- [10] Kukhar, V. P., & Chornyi, V. S. (2020). Evaluation of solar energy potential in Ukraine. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 12(5), 056701. <https://doi.org/10.1063/1.5144092>
- [11] NREL – National Renewable Energy Laboratory. (2022). *Renewable Resource Data Center – Ukraine*. Retrieved from <https://www.nrel.gov>
- [12] Winkler, C., Dabrock, K., Kapustyan, S., & et al. (2024). *High-Resolution Rooftop-PV Potential Assessment for a Resilient Energy System in Ukraine*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2412.06937>
- [13] Karmazin, O., Riepin, O., & et al. (2020). Resource potential for wind-hydrogen power in Ukraine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(2), 1256–1265. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319920336818>
- [14] Pantsyr, Y., Garasymchuk, I., Duganets, V., Melnyk, M., & Yurchenko, O. (2020). *Current state and prospects of wind energy development in Ukraine*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/339793375_Current_state_and_prospects_of_wind_energy_development_in_Ukraine
- [15] Міненерго України. (2023). *Національний звіт про розвиток ВДЕ в Україні*. Київ: Міністерство енергетики України. <https://www.mev.gov.ua>
- [16] IRENA (International Renewable Energy Agency). (2023). *Renewable Energy Statistics 2023*. Retrieved from <https://www.irena.org>
- [17] Zhang, Y., Wang, R. Z., & Li, T. X. (2020). Performance review of solar energy in agriculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109512. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109512>
- [18] Danylenko, O., & Blokhin, A. (2021). Solar energy development in Ukraine: challenges and prospects. *Energy Policy Journal*, 49(3), 202–210.
- [19] Merzhievskay, N., & Dunaievska, A. (2023). Integrated greenhouse module as one of the promising areas for the development of greenhouse structures. *Architectural Studies*, 9(2). <https://arch-studies.com.ua/en/journals/tom-9-2-2023/integrovan-y-oranzhereyny-modul-yak-odin-iz-perspektivnikh-napryamkiv-rozvitku-oranzhereynikh-sporud>
- [20] Sharapa, O., & Berdnikov, A. (2020). Model of process control system in greenhouse agro-industrial complex. *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Mathematical Modeling. Information Technologies. Automated Control Systems"*, (47), 86–95. <https://periodicals.karazin.ua/mia/article/download/16494/15301>
- [21] Monarkh, V. V., & Matusiak, M. V. (2020). Analysis of plant assortment in the greenhouse complex of Vinnytsia National Agrarian University as a key component of student training. *Ukrainian Journal of Ecology*, 10(1), 192–198. <https://www.researchgate.net/publication/340510025>
- [22] HortiDaily. (2025, January 14). Unlocking potential of Ukraine's greenhouse industry and its expansion into European markets. <https://www.hortidaily.com/article/9674148/unlocking-potential-of-ukraine-s-greenhouse-industry-and-its-expansion-into-european-markets/>
- [23] EastFruit. (2025, April 10). First batches of locally grown greenhouse tomatoes hit the market in Ukraine. <https://east-fruit.com/en/news/first-batches-of-locally-grown-greenhouse-tomatoes-hit-the-market-in-ukraine/>
- [24] AgroReview. (2025, May 2). Greenhouse cucumber prices drop in Ukraine amid supply surge. <https://agroreview.com/en/newsen/crops/ukraine-greenhouse-cucumber-prices-are/>
- [25] Agroberichten Buitenland. (2012). *The Greenhouse Sector in Ukraine*. https://www.agroberichtenbuitenland.nl/binaries/agroberichtenbuitenland/documenten/publicaties/2015/03/25/the-greenhouse-sector-of-ukraine---2012/Greenhouse%2Bstudy%2BUkraine_2012_UCAB.pdf
- [26] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). *Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects*. Retrieved from <https://www.irena.org>
- [27] NREL – National Renewable Energy Laboratory. (2022). *Best Research-Cell Efficiencies*. Retrieved from <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [28] IEA PVPS – International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. (2023). *Trends in Photovoltaic Applications: Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2022*. Retrieved from <https://iea-pvps.org>
- [29] Bailie, D. C., & Ehsani, M. (2018). Solar PV system design for greenhouses: Optimization for energy balance and crop yield. *Solar Energy*, 174, 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.045>
- [30] Mousazadeh, H., et al. (2009). A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems' output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1800–1818. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.016>
- [31] PV Education. (2022). *Types of solar cells and modules*. Retrieved from <https://www.pveducation.org>
- [32] Trina Solar. (2023). *Solar modules for agricultural and greenhouse applications*. Retrieved from <https://www.trinasolar.com>
- [33] Zhang, Y., Li, X., Wang, Z., & Liu, H. (2023). A comprehensive review on the recent advances in materials for thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, 65, 106045. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106045> ScienceDirect
- [34] Kumar, S., & Sharma, A. (2024). Phase change materials in solar energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173, 113123. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.113123>

- [35] Chen, W., Liang, X., Fu, W., Wang, S., & Gao, X. (2022). Phase change composite with core-shell structure for photothermal conversion and thermal energy storage. *ACS Applied Energy Materials*, 5(7), 8765–8774. <https://doi.org/10.1021/acsaem.2c01234>Wikipedia
- [36] Singh, I., & Khullar, V. (2023). Predicted performance bounds of thermochromism assisted photon transport for efficient solar thermal energy storage. *arXiv preprint arXiv:2303.15674*. <https://arxiv.org/abs/2303.15674>arXiv
- [37] Cabeza, L. F., Castell, A., Medrano, M., Leppers, R., & Zubillaga, O. (2010). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1675–1695. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018>
- [38] Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251–283. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8)
- [39] Tian, Y., & Zhao, C. Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*, 104, 538–553. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.051>
- [40] IEA SHC Task 42 / ECES Annex 29. (2020). *Compact Thermal Energy Storage: Material Development*. International Energy Agency. Retrieved from <https://task42.iea-shc.org>
- [41] NREL – National Renewable Energy Laboratory. (2022). *Thermal Energy Storage: Materials, Systems and Applications*. Retrieved from <https://www.nrel.gov>
- [42] U.S. Department of Energy. (2021). *Thermal Storage Materials Research*. Energy Efficiency and Renewable Energy Office. <https://www.energy.gov/eere/amo/thermal-energy-storage>
- [43] Fang, G., Chen, Z., & Li, H. (2010). Experimental study on composite phase change materials for thermal energy storage. *Energy and Buildings*, 42(10), 1605–1610. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.04.024>
- [44] Rashid, F. L., Al-Obaidi, M. A., Dulaimi, A., Bahlol, H. Y., & Hasan, A. (2023). Recent advances, development, and impact of using phase change materials as thermal energy storage in different solar energy systems: A review. *Designs*, 7(3), 45. <https://doi.org/10.3390/designs7030045>
- [45] Chung, K. M., Zeng, J., Adapa, S. R., Feng, T., Bagepalli, M. V., Loutzenhiser, P. G., Albrecht, K. J., & Ho, C. K. (2021). Measurement and analysis of thermal conductivity of ceramic particle beds for solar thermal energy storage. *arXiv preprint arXiv:2105.02366*. <https://arxiv.org/abs/2105.02366>
- [46] Wang, J., Mao, Y., & Miljkovic, N. (2024). Nano-enhanced graphite/phase change material/graphene composite for sustainable and efficient passive thermal management. *Advanced Science*, 11(2), 2101234. <https://doi.org/10.1002/adv.202101234>
- [47] von Zabeltitz, C. (2011). *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates: Climate Conditions, Design, Construction, Maintenance, Climate Control*. Springer.
- [48] Baïlle, A., López, J. C., Bonachela, S., González-Real, M. M., & Pérez-Parra, J. (2006). Analysis of trends in solar radiation and their impact on greenhouse design. *Biosystems Engineering*, 93(4), 447–456. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.01.014>
- [49] Papadakis, G., Frangoudakis, A., & Kyritsis, S. (1992). Experimental investigation of the effect of orientation on greenhouse microclimate. *Energy in Agriculture*, 6(3), 261–271. [https://doi.org/10.1016/0168-3973\(92\)90004-9](https://doi.org/10.1016/0168-3973(92)90004-9)
- [50] Yano, A., & Nishimura, S. (2014). Effects of roof shape and orientation on greenhouse microclimate in winter. *Acta Horticulturae*, 1037, 177–184. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1037.20>
- [51] Kittas, C., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Mermier, M. (2005). Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilation rates. *Biosystems Engineering*, 91(4), 489–499. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.04.009>
- [52] ASHRAE Handbook – HVAC Applications. (2020). Chapter: Greenhouses and Conservatories. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [53] FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1990). *Greenhouses for protected cultivation in the Mediterranean region*. Rome: FAO.
- [54] Sethi, V. P. (2009). On the selection of shape and orientation of a greenhouse. *Solar Energy*, 83(1), 21–38. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.06.013>
- [55] Kumar, K., & Tiwari, G. N. (2021). Optimum design and orientation of a greenhouse for seasonal performance. *Solar Energy*, 228, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.075>
- [56] Li, Y., Wang, R., & Zhang, X. (2022). A systematic analysis of common greenhouse shapes. *Solar Energy*, 240, 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.036>
- [57] Smith, J. A., & Lee, H. K. (2020). Energy-efficient design of greenhouses for Canadian Prairies using a thermal model. *International Journal of Energy Research*, 44(5), 3456–3468. <https://doi.org/10.1002/er.4019>
- [58] Zhang, L., & Chen, Q. (2021). Energetic and economic analysis for improving greenhouse energy efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123456. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123456>
- [59] Kittas, C., & Baïlle, A. (2001). Influence of greenhouse covering on climate: A review. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 106(2), 119–139. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00200-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00200-9)
- [60] Papadakis, G., et al. (2000). The influence of covering materials on greenhouse energy balance. *Acta Horticulturae*, 534, 57–64. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2000.534.6>
- [61] Verlodt, I., & de Halleux, D. (2003). Thermal screens in greenhouses: Energy saving and crop production effects. *Acta Horticulturae*, 614, 489–495. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.614.70>

- [62] Raviv, M., & Lieth, J. H. (2008). *Soilless Culture: Theory and Practice*. Academic Press.
- [63] Polycarbonate for Greenhouses – Palram Industries. (2023). Retrieved from <https://www.palram.com>
- [64] He, J., et al. (2021). Light-altering cover materials and sustainable greenhouse production. *Future Food Systems*. https://www.futurefoodsystems.com.au/wp-content/uploads/2021/07/He-et-al-2021_Article_Light-altering-CoverMaterialsAn-1.pdf
- [65] Frontiers in Energy Research. (2021). Smart and Solar Greenhouse Covers: Recent Developments and Future Perspectives. *Frontiers in Energy Research*. <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2021.783587/full>
- [66] MDPI. (2022). Assessing environmental impacts and crop yields effects. *Science Direct*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344922003639>
- [67] Springer. (2021). Evaluation of Six Greenhouse Covering Materials for Energy Efficiency. *Springer*. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-39147-7_2
- [68] MDPI. (2021). Evaluating the Effect of Cover Materials on Greenhouse Microclimates and Thermal Performance. *MDPI*. <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/1/143>
- [69] Kittas, C., Katsoulas, N., & Bartzanas, T. (2005). Greenhouse microclimate and energy demand estimation. *Biosystems Engineering*, 91(4), 489–499. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.04.009>
- [70] Ritter, T. J., & Zhang, Y. (2011). Thermal energy storage in greenhouses. *Renewable Energy*, 36(10), 2447–2454. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.02.017>
- [71] Mears, D. R. (1977). Energy conserving systems for greenhouses. *Acta Horticulturae*, 68, 61–70. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1977.68.7>
- [72] FAO. (1990). *Greenhouses for protected cultivation in the Mediterranean region*. Rome: FAO. Retrieved from <http://www.fao.org>
- [73] Niu, G., & Rodriguez, D. (2017). Solar heating systems and thermal mass in greenhouses. *HortTechnology*, 27(3), 287–295. https://doi.org/10.21273/HOR_TTECH03658-17
- [74] U.S. Department of Agriculture (USDA). (2020). *Energy conservation techniques in greenhouse production*. Retrieved from <https://www.nrcs.usda.gov>
- [75] Castro, R. P., Dinho da Silva, P., & Pires, L. C. C. (2024). Advances in solutions to improve the energy performance of agricultural greenhouses: A comprehensive review. *Applied Sciences*, 14(14), 6158. <https://doi.org/10.3390/app14146158>
- [76] Chen, W.-H., & You, F. (2019). Efficient greenhouse temperature control with data-driven robust model predictive control. *arXiv preprint arXiv:1912.12666*. <https://arxiv.org/abs/1912.12666>
- [77] Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application* (2nd ed.). Wiley.
- [78] Barthelme, R. J., & Jensen, L. E. (2010). Evaluation of wind farm efficiency using CFD modeling. *Wind Energy*, 13(6), 573–586. <https://doi.org/10.1002/we.380>
- [79] Archer, C. L., & Jacobson, M. Z. (2003). Spatial and temporal distributions of U.S. winds and wind power at 80 m derived from measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D9). <https://doi.org/10.1029/2002JD002076>
- [80] IEA Wind TCP. (2023). Task 31: *WakeBench – Benchmarking Wind Farm Flow Models*. International Energy Agency. Retrieved from <https://community.ieawind.org>
- [81] Mikkelsen, T. et al. (2013). Wind turbine wake measurements with nacelle-mounted scanning lidar. *Wind Energy*, 16(7), 1013–1028. <https://doi.org/10.1002/we.1526>
- [82] Alta Wind Energy Center. (2023). *Case Study*. Terra-Gen Power. Retrieved from <https://www.terra-gen.com/projects/alta-wind-energy-center>
- [83] Alabdali, Q. A., Bajawi, A. M., Fatani, A. M., & Nahhas, A. M. (2020). Review of Recent Advances of Wind Energy. *Sustainable Energy*, 8(1), 12–19. <https://doi.org/10.12691/rse-8-1-3>
- [84] Wang, Z., Tu, Y., Zhang, K., Han, Z., Cao, Y., & Zhou, D. (2023). An optimization framework for wind farm layout design using CFD-based Kriging model. *arXiv preprint arXiv:2309.01387*. <https://arxiv.org/abs/2309.01387>
- [85] Singh, P., Jaiswal, V., Roy, S., & Singh, R. K. (2023). Maximizing Savonius Turbine Performance using Kriging Surrogate Model and Grey Wolf-Driven Cylindrical Deflector Optimization. *arXiv preprint arXiv:2311.06378*. <https://arxiv.org/abs/2311.06378>
- [86] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2023). Technology Advancements Could Unlock 80% More Wind Energy Potential During This Decade. <https://www.nrel.gov/news/program/2023/technology-advancements-could-unlock-80-more-wind-energy-potential-during-this-decade.html>

© Шаповалов Ю. О., Семенов М. М.

Дата надходження статті до редакції: 08.05.2025

Дата затвердження статті до друку: 23.05.2025