УДК 620.92:631.234
DOI https://doi.org/10.15589/znp2026.3(506).33

COMPARATIVE ANALYSIS OF TRANSPARENT ROOFING MATERIALS FOR GREENHOUSE COMPLEXES

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СВІТЛОПРОЗОРИХ ПОКРИВНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ТЕПЛИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

Danylo V. Svarychevskyi
danylo.shipbuilder@gmail.com
ORCID: 0009-0000-1803-8902

Volodymyr P. Shostak
shostakvolodymyr7@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4745-4734

В. П. Шостак,
канд. техн. наук, професор

Д. В. Сваричевський,
аспірант

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

Abstract. The modern development of greenhouse farming is characterized by increasing requirements for energy efficiency, microclimate stability, and reduction of operating costs, which determines the necessity of improving translucent enclosing structures of greenhouses. Particular importance is attached to the selection of covering materials for all-season greenhouse complexes under the climatic conditions of Ukraine and the continuous growth of energy prices. *Purpose*. The aim of the study is to conduct a comparative analysis of modern translucent materials for greenhouse structures and to substantiate the prospects of using energy-efficient glass materials and multifunctional insulated glazing units in all-season greenhouse complexes. *Method*. The study employs methods of system analysis, comparison of physical, technical and thermal characteristics of materials, generalization of modern scientific research results in the field of energy-efficient translucent structures, as well as methods of analytical assessment of the energy efficiency of covering materials. *Results*. An analysis of polyethylene films, cellular polycarbonate, traditional glass, and modern combined glass materials has been carried out. The features of ultraviolet-stabilized, infrared, anti-condensation and light-diffusing coatings have been considered. It has been established that traditional polymer materials are characterized by limited service life and insufficient thermal insulation properties for efficient year-round operation. It has been shown that the most promising solutions are multifunctional insulated glazing units with low-emissivity, selective and diffuse coatings, which provide high light transmission, reduced heat losses and stabilization of the greenhouse microclimate. *Scientific novelty*. The scientific novelty of the work lies in the systematization of the characteristics of modern translucent materials according to the criteria of energy efficiency, light transmission, heat conservation, and suitability for use in all-season greenhouse complexes in Ukraine. *Practical importance*. The practical significance of the obtained results consists in the possibility of their application in the design of energy-efficient greenhouse complexes, selection of optimal translucent enclosing structures, and reduction of energy consumption of heating and ventilation systems.
Key words: greenhouse complexes; translucent structures; energy efficiency; heat losses; insulated glazing units; cellular polycarbonate; Low-E glass; diffuse glass.

Анотація. Сучасний розвиток тепличного господарства характеризується зростанням вимог до енергетичної ефективності, стабільності мікроклімату та зниження експлуатаційних витрат, що обумовлює необхідність удосконалення світлопрозорих огороджувальних конструкцій теплиць. Особливого значення набуває вибір покривних матеріалів для всесезонних тепличних комплексів в умовах кліматичних особливостей України та постійного зростання вартості енергоресурсів. *Мета*. Метою дослідження є проведення порівняльного аналізу сучасних світлопрозорих матеріалів для тепличних конструкцій та обґрунтування перспективності використання енергоефективних скломатеріалів і багатофункціональних склопакетів у всесезонних тепличних комплексах. *Методика*. У роботі використано методи системного аналізу, порівняння фізико-технічних та теплотехнічних характеристик матеріалів, узагальнення результатів сучасних наукових досліджень у галузі енергоефективних світлопрозорих конструкцій. *Результати*. Проведено аналіз поліетиленових плівок, стільникового полікарбонату, традиційного скла та сучасних комбінованих скломатеріалів. Розглянуто особливості ультрафіолетово-стабілізованих, інфрачервоних, антиконденсатних і світлорозсіювальних покриттів. Встанов-

лено, що традиційні полімерні матеріали характеризуються обмеженим терміном експлуатації та недостатніми теплоізоляційними властивостями для ефективного всесезонного використання. Показано, що найбільш перспективними є багатофункціональні склопакети з низькоемісійними, селективними та дифузними покриттями, які забезпечують високе світлопропускання, зниження теплових втрат та стабілізацію мікроклімату теплиці. *Наукова новизна* роботи полягає у систематизації характеристик сучасних світлопрозорих матеріалів за критеріями енергоефективності, світлопропускання, теплозбереження та придатності до використання у всесезонних тепличних комплексах України. *Практична значимість* отриманих результатів полягає у можливості їх використання при проєктуванні енергоефективних тепличних комплексів, виборі оптимальних світлопрозорих огороджувальних конструкцій та зниженні енергоспоживання систем опалення і вентиляції.
Ключові слова: тепличні комплекси; світлопрозорі конструкції; енергоефективність; тепловтрати; стільниковий полікарбонат; склопакети; Low-E скло; дифузне скло.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сучасні тепличні комплекси України функціонують в умовах постійного зростання вартості енергоресурсів, сезонної нестабільності кліматичних умов та необхідності забезпечення цілорічного вирощування сільськогосподарської продукції. Одним із ключових факторів, що визначають енергетичну ефективність теплиці, є тип світлопрозорого покриття, через яке відбувається основна частина теплових втрат. Традиційні покривні матеріали не забезпечують одночасно високих показників світлопропускання, теплозбереження, довговічності та стабільності тепличного мікроклімату. У зв'язку з цим виникає необхідність комплексного аналізу сучасних полімерних, полікарбонатних та скляних матеріалів з метою визначення найбільш ефективних рішень для всесезонних тепличних комплексів, адаптованих до кліматичних умов України.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є проведення комплексного порівняльного аналізу сучасних світлопрозорих матеріалів для тепличних конструкцій та обґрунтування доцільності використання енергоефективних комбінованих скломатеріалів і багатофункціональних склопакетів у всесезонних тепличних комплексах з урахуванням їх теплотехнічних, оптичних та експлуатаційних характеристик.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Використано методи системного аналізу, порівняння фізико-технічних характеристик матеріалів, узагальнення сучасних наукових публікацій та теплотехнічного аналізу світлопрозорих конструкцій.

Об'єктом дослідження є сучасні світлопрозорі покривні матеріали всесезонних тепличних комплексів.

Предметом дослідження є закономірності впливу фізико-технічних характеристик світлопрозорих покриттів на енергетичну ефективність всесезонних тепличних комплексів.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Сучасний стан світового та вітчизняного сільського господарства характеризується стрімким розвитком технологій закритого ґрунту, що відбувається на тлі глобальних кліматичних змін та нестабільності світового енергетичного ринку [1]. Це вимагає від тепличних господарств переходу на новий рівень енергоефективності, оскільки зростання цін на енергоносії стає одним із головних факторів, що обмежують рентабельність виробництва [2, 3]. У таких умовах будівництво енергоефективних комплексів стає стратегічною необхідністю для забезпечення економічної стійкості галузі.

Однією з найбільш критичних точок енергобалансу будь-якої теплиці є її огороджувальна конструкція. Згідно з науковими дослідженнями в галузі агроінженерії, до 80 % усіх теплових втрат теплиці може припадати саме на світлопрозорий покривний матеріал [4]. Це пояснюється тим, що таке огородження має високий коефіцієнт теплопередачі та велику площу контакту із зовнішнім середовищем. Застосування енергоощадних світлопрозорих матеріалів є критичним для енерго-економічної стійкості господарств [5, 6, 7]. Таким чином, вибір матеріалу покриття безпосередньо визначає рівень експлуатаційних витрат та загальну конкурентоспроможність господарства [8, 9].

Традиційні підходи до вибору покриття, що базуються переважно на мінімізації початкових капіталовкладень (наприклад, використання поліетиленових плівок), у довгостроковій перспективі виявляються економічно ризикованими [10] для цілорічних комплексів через високі втрати тепла та недовговічність матеріалів. Водночас застосування одинарного скління або полікарбонату має свої обмеження – від низької енергоефективності до поступової деградації оптичних властивостей. Саме раціональний вибір світлопрозорого покриття дозволяє оптимізувати мікроклімат та знизити витрати енергії в тепличних комплексах [11, 12, 13].

1. Поліетиленові плівки

Вибір конкретного типу полімерного покриття визначає не тільки його термін служби, але й енергетичний баланс та інтенсивність фотосинтетично активної радіації (ФАР), що потрапляє до рослин [14, 15, 16].

1.1 Нестабілізована поліетиленова плівка низької щільності

Поліетилен високого тиску або низької щільності (LDPE – Low-Density Polyethylene) історично є першим

полімерним матеріалом, що масово застосовувався для захищеного ґрунту. З точки зору фізичної хімії, цей матеріал є термопластичним полімером, отриманим шляхом радикальної полімеризації етилену.

LDPE характеризується високим ступенем розгалуженості молекулярних ланцюгів (довгі та короткі бічні відгалуження), що перешкоджає щільній упаковці молекул. Це зумовлює його ключові фізичні властивості: високу еластичність, низьку температуру крихкості та відносно низьку щільність (0,910–0,940 г/см^3) [17]. Однак саме наявність великої кількості третинних атомів вуглецю в місцях розгалуження ланцюгів робить матеріал надзвичайно чутливим до окислювальних процесів. Поліетилен низької щільності (LDPE) характеризується специфічною молекулярною структурою, яка визначає його механічну поведінку.

З точки зору світлофізіології рослин, чистий LDPE має наступні показники: інтегральне пропускання (Visible Light Transmission) – у свіжому стані плівка товщиною 150 мкм пропускає до 88–91 % прямої сонячної радіації, матеріал практично повністю прозорий для ФАР. На відміну від скла, чистий поліетилен вільно пропускає ультрафіолетове випромінювання (UV-B, 280–315 нм), що може бути корисним для синтезу вітамінів у рослинах, але є фатальним для самої структури полімеру.

Основним недоліком нестабілізованого LDPE є процес фотоокислювальної деструкції. Під дією квантів УФ-випромінювання з довжиною хвилі 290–400 нм відбувається розрив зв'язків C—C та C—H, матеріал втрачає еластичність (показник подовження при розриві падає з 500 % до 10 %), стає крихким, покривається мікротріщинами, в яких накопичується пил, що знижує світлопроникність на 20–40 % за кілька місяців [18].

У теплотехнічному аспекті чистий поліетилен є вкрай неефективним покриттям. Коефіцієнт емісії для LDPE він становить 0,70–0,85. Це означає, що плівка інтенсивно випромінює теплову енергію в навколишнє середовище. Плівка має високий показник пропускання (50–60 %) в довгохвильовому інфрачервоному спектрі (7–14 мкм). Внаслідок цього в ясні ночі спостерігається ефект «радіаційного вихолоджування», температура всередині теплиці може опускатися нижче температури зовнішнього повітря за рахунок прямого випромінювання енергії ґрунтом у відкритий простір через таке покриття [19].

Така плівка має: межу міцності на розрив 15–25 МПа, коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 0{,}33$ Вт/(м · К), температурний діапазон експлуатації від –50 °C до +60 °C.

1.2 УФ-стабілізована багаторічна плівка

На відміну від стандартного LDPE, УФ-стабілізовані плівки являють собою складні композиційні системи, до складу яких входять інтегровані спеціальні хімічні агенти – стабілізатори. Їх впровадження обумовлене необхідністю подолання фундаментального недоліку поліолефінів – низької фотохімічної стійкості до сонячної радіації в діапазоні довжин хвиль 290–400 нм.

В сучасній агроінженерії найвищу ефективність демонструють просторово-ускладнені аміни (HALS – Hindered Amine Light Stabilizers) [20]. На відміну від звичайних УФ-абсорберів, які просто поглинають випромінювання, HALS діють як циклічні інгібітори. Вони блокують алкільні та пероксильні радикали, що виникають при розриві ланцюгів поліетилену. У процесі роботи молекули HALS здатні відновлюватися (цикл Денісова), що забезпечує довготривалий захист матеріалу навіть при критичних рівнях інсоляції. Це запобігає злипанню або розщепленню полімерних ланцюгів, що зберігає механічну міцність і еластичність плівки на термін від 3 до 6 років (залежно від концентрації стабілізатора та географічної широти використання) [21, 22].

Завдяки стабілізації, плівка зберігає свої первинні властивості протягом усього терміну експлуатації. Показник відносного подовження при розриві (elongation at break) у стабілізованих плівок залишається на рівні понад 50 % від початкового значення навіть після 36–48 місяців експлуатації, тоді як у звичайних плівок цей показник падає до критичних значень вже за 4–6 місяців. Сучасні високотехнологічні стабілізатори розробляються з урахуванням резистентності до сірки (S) та хлору (Cl), які часто використовуються в теплицях для фумігації та можуть інактивувати стабілізатори попередніх поколінь [21].

УФ-стабілізація вносить певні корективи в оптичні властивості покриття, стабілізатори можуть відсікати найбільш жорстку частину ультрафіолетового спектру (UV-B), що захищає не лише плівку, а й біомасу рослин від надмірного стресу, спричиненого жорстким випромінюванням. Завдяки відсутності мікротріщин на поверхні (які виникають при деградації), стабілізована плівка набагато менше схильна до запилення. Це дозволяє підтримувати рівень пропускання ФАР на рівні 85–88 % протягом кількох сезонів.

Хоча сама по собі УФ-стабілізація не змінює суттєво коефіцієнт теплопровідності матеріалу, вона опосередковано впливає на енергоефективність теплиці. Відсутність деградації поверхні запобігає втраті герметичності (мінімізація інфільтраційних втрат через розриви) та зберігає цілісність повітряного прошарку у випадку використання декількох шарів плівки.

Термін експлуатації такої плівки становить від 4 до 10 сезонів в залежності від марки плівки, міцність на розрив – не менше 18–22 МПа.

1.3 Теплоутримуюча інфрачервона плівка

Теплоутримуюча або антитермічна плівка (IR-film), є одним із найбільш технологічних рішень

у сегменті гнучких покриттів. Її розробка була спрямована на вирішення фундаментальної проблеми попередньо розглянутих плівок – високої прозорості в інфрачервоному діапазоні, що призводить до значних втрат теплової енергії в темний час доби.

Принцип роботи IR-плівки базується на модифікації спектральної прозорості полімеру. До складу поліетилену вводяться спеціальні інфрачервоні абсорбенти та відбивачі – мінеральні наповнювачі (наприклад, силікати алюмінію, каолін) або кополімери, такі як етиленвінілацетат (EVA). Ці компоненти створюють бар'єр, який поглинає або відбиває теплове випромінювання назад у внутрішній простір теплиці. В результаті прозорість полімеру в тепловому діапазоні суттєво зменшується.

Застосування таких плівок дозволяє підтримувати температуру всередині споруди на 2–5 градусів Цельсія вищою, ніж під звичайним покриттям, без додаткових витрат на паливо [23]. У холодні ночі градієнт температури між внутрішнім повітрям та поверхнею покриття зменшується, що знижує загальний коефіцієнт теплопередачі конструкції. Завдяки повільнішому вистиганню ґрунту, рослини мають вищі шанси на виживання під час короткочасних весняних заморозків без включення систем аварійного обігріву.

Незважаючи на введення мінеральних наповнювачів, сучасні IR-плівки зберігають високі показники прозорості. Коефіцієнт пропускання у діапазоні ФАР зазвичай становить 82–85 %. Деяке зниження прозорості порівняно з чистим LDPE компенсується покращеним розсіюванням світла, що нівелює проблему затінення. Завдяки утриманню тепла, температурні коливання в теплиці протягом доби стають менш різкими, що знижує фізіологічний стрес у рослин та сприяє стабільному росту біомаси.

Хоча вартість IR-плівки на 15–25 % вища за стандартну УФ-стабілізовану, її застосування в цілорічних або ранньовесняних теплицях окупається протягом першого ж опалювального сезону. Економія енергоресурсів (газу, електроенергії, біопалива) може досягати 15–20 % залежно від герметичності конструкції.

Пропускання ІЧ-випромінювання (теплового) у такої плівки менше 15–20 %, коефіцієнт теплопередачі – 4,2–4,8 Вт/(м^2 · К), оптимальна товщина для застосування – 150–200 мкм.

1.4 Антиконденсатна плівка з гідрофільними властивостями

Проблема конденсації водяної пари на внутрішній поверхні покриття є однією з найбільш гострих у тепличному господарстві, оскільки вона безпосередньо впливає на світлопроникність конструкції та рівень захворюваності культур. Антиконденсатні плівки (Anti-Fog або Anti-Drip) розроблені для зміни поведінки конденсованої вологи на поверхні плівки.

Чистий поліетилен за своєю природою є гідрофобним матеріалом. Це призводить до того, що конденсована волога збирається у вигляді дискретних напівсферичних крапель. Через високий кут змочування краплі тривалий час утримуються на поверхні, а при досягненні критичної маси – хаотично падають на рослини. До складу антиконденсатної плівки додаються спеціальні поверхнево-активні речовини (ПАР). Вони мігрують до поверхні полімеру та знижують його поверхневий натяг, роблячи матеріал гідрофільним. Замість крапель волога розподіляється по поверхні тонким, плоскопаралельним та безперервним шаром води. Під дією гравітації цей шар рівномірно стікає по нахилу покрівлі до стічних жолобів [24].

З точки зору фізичної оптики, заміна крапель на суцільний шар води має вирішальне значення. Сферичні краплі працюють як мікролінзи, які відбивають значну частину світла назад назовні або фокусують промені, що може викликати опіки листя. Гідрофільний шар, навпаки, практично не змінює хід сонячних променів, підвищуючи реальну світлопроникність теплиці на 15–20 % у вологому стані. Суцільний шар водяної плівки сам по собі має здатність частково поглинати інфрачервоне випромінювання, що створює додатковий, хоч і незначний, теплозахисний екран.

Важливо зазначити непрямі переваги даного типу покриття: зниження вологості внаслідок ефективного відведення конденсату в дренажну систему дозволяє підтримувати відносну вологість повітря на оптимальному рівні; відсутність падіння крапель на листя запобігає поширенню збудників грибкових та бактеріальних інфекцій (таких як сіра гниль або фітофтороз), що значно знижує потребу у використанні фунгіцидів [25].

Слід враховувати, що дія антифог-агентів має обмежений термін, оскільки ПАР поступово вимиваються конденсованою водою. Ефективність гідрофільного шару може знижуватися через 2–3 роки експлуатації. В сучасних багатошарових плівках (3-х та 5-ти шарових) антиконденсатні добавки вводяться саме у внутрішній шар, що дозволяє пролонгувати їхню дію.

Технічні параметри такої плівки наступні: кут змочування поверхні менше 20–30 градусів (у звичайної плівки – понад 70–90 градусів); збереження світлопропускання при конденсації до 95–98 % від номіналу. При монтажу антиконденсатна сторона повинна бути строго спрямована всередину теплиці (маркується виробником).

1.5 Світлорозсіювальна дифузійна плівка

Світлорозсіювальна плівка являє собою високотехнологічне покриття, що змінює геометричну структуру світлового потоку, який потрапляє всередину теплиці. У той час як традиційні покриття фокусуються на максимізації прямого пропускання, дифузійні плівки спрямовані на перетворення прямих сонячних променів на розсіяне (дифузне) випромінювання.

Ефект розсіювання досягається шляхом введення в полімерну матрицю (LDPE) специфічних мікроскопічних частинок-дифузорів. Це можуть бути порожнисті скляні мікросфери, мінеральні добавки або спеціальні суміші полімерів з різними показниками заломлення. Коли прямий сонячний промінь зустрічає дифузор, він заломлюється і розпадається на безліч променів, спрямованих під різними кутами. Показник дифузії (Haze factor) це ключовий параметр, який визначає відсоток світла, що відхиляється від прямої лінії більше ніж на 2,5 градуси. У професійних дифузійних плівках цей показник може варіюватися від 30 % до 70 %. Важливо зазначити, що дифузія не означає значного зменшення загальної кількості світла, вона лише перерозподіляє його в просторі.

З точки зору біофізики рослин, розсіяне світло має суттєві переваги над прямим. Пряме світло інтенсивно освітлює лише верхнє листя, залишаючи нижні яруси в глибокій тіні. Розсіяне світло здатне проникати крізь густе листя, освітлюючи рослину з усіх боків. Це активує фотосинтез нижніх листків, що призводить до збільшення загальної біомаси. Прямі промені в зеніті можуть викликати перегрів і фотоінтоксикацію (опіки) верхівок рослин. Дифузійна плівка рівномірно розподіляє енергію світла, нівелюючи ризик термічного стресу. Оскільки світло стає менш концентрованим, температура поверхні листків у верхній частині рослин знижується, що оптимізує процес транспірації [26, 27].

Дифузійні плівки доцільно застосовувати у регіонах з високим рівнем сонячної інсоляції, а також для вирощування високорослих культур (томати, огірки, декоративні квіти тощо). У теплицях з розсіювальним покриттям тіні від елементів каркасу стають розмитими або майже зникають, що забезпечує більш рівномірний світловий режим по всій площі. Такі плівки часто мають матовий або перламутровий вигляд, що є візуальною ознакою наявності дифузійних агентів.

Технічні параметри таких плівок наступні: коефіцієнт дифузії (Haze) – 35 %, 55 % або 75 % (залежно від призначення); загальна світлопроникність (Total Light Transmission) – 86–89 %; рівномірність освітлення – на 25–40 % вище в порівнянні зі звичайною плівкою.

2. Стільниковий полікарбонат

Стільниковий (комірчастий) полікарбонат – це багатошаровий полімерний матеріал, отриманий методом екструзії, який став стандартом для капітальних фермерських теплиць завдяки унікальному поєднанню механічної жорсткості та низької теплопровідності [28, 29]. У структурі матеріалу між паралельними пластинами розташовані ребра жорсткості, що утворюють замкнені повітряні камери. Саме повітря, будучи теплоізолятором, визначає енергоефективність панелей [30].

2.1 Однокамерний стільниковий полікарбонат (2R – Two walls)

Однокамерний полікарбонат (маркування 2R або Two-Wall) є базовою та найбільш розповсюдженою конфігурацією комірчастого пластику. Його конструкція складається з двох паралельних зовнішніх листів, з'єднаних між собою вертикальними ребрами жорсткості, що утворюють поздовжні повітряні канали прямокутного або квадратного перерізу.

Для панелі товщиною 4 мм коефіцієнт теплопередачі (U-value) становить приблизно 3,9 Вт/(м^2 · К), що на 35–40 % ефективніше за звичайну плівку та одинарне скло.

Структура 2R є еталонною серед полікарбонатів за рівнем світлопроникності, через мінімальну кількість перешкод (лише два шари полімеру), інтегральне пропускання ФАР досягає 82–86 % [19]. Вертикальні перегородки виконують роль оптичних призм, які заломлюють промені, що падають під гострим кутом. Це створює світлові смуги всередині теплиці, забезпечуючи краще освітлення рослин у ранкові та вечірні години. Завдяки пласкій поверхні зовнішніх листів, втрати на дзеркальне відбиття сонячної енергії мінімальні.

Це найлегший вид полікарбонату (від 0,8 до 1,5 кг/м^2 залежно від щільності), що дозволяє використовувати полегшені алюмінієві або оцинковані профілі для каркасу теплиці. Однокамерні листи мають найменший мінімальний радіус вигину (наприклад, для 4 мм – близько 700 мм), що робить їх ідеальними для арочних конструкцій, де натяг матеріалу створює додаткову жорсткість покрівлі [31]. Велика площа внутрішніх камер може сприяти накопиченню конденсату, якщо торці не загерметизовані належним чином. Наявність води в камерах однокамерного листа може знизити його світлопроникність на 15–20 %.

Технічні параметри структури 2R наступні: товщини листів – 4 мм, 6 мм, 8 мм, 10 мм; звукоізоляція – 15–18 дБ.

Такий полікарбонат застосовують для невеликих приватних теплиць та теплиць весняно-осіннього вирощування, де світло є більш критичним фактором, ніж збереження тепла [32].

2.2 Багатокамерний та посилений полікарбонат (структури 3R, 5W, 6W, X-структури)

Перехід від однокамерної до багатокамерної структури в агроінженерії обумовлений необхідністю радикального зниження теплових втрат у капітальних спорудах. Багатокамерні листи складаються з трьох і більше шарів полімеру, розділених додатковими горизонтальними та діагональними перегородками [31].

У теплотехнічному аспекті багатокамерність вирішує проблему теплових втрат. Додаткові внутрішні шари розділяють загальну товщину панелі на кілька ізольованих прошарків (3–5 мм кожен). У таких

малих об'ємах сили в'язкості повітря переважають над силами плавучості, що практично повністю зупиняє внутрішні конвективні потоки. Тепловий потік змушений долати кілька послідовних бар'єрів «полімер-повітря-полімер». Оскільки повітря в стані спокою має вкрай низьку теплопровідність (приблизно 0,024–0,026 Вт/(м · К)), опір теплопередачі суттєво зростає. Для 16-міліметрової 3-камерної панелі коефіцієнт теплопередачі становить близько 2,3 Вт/(м^2 · К), а для 25-міліметрової 5-камерної – до 1,6 Вт/(м^2 · К).

Посилені панелі з діагональними ребрами (X-structure) розроблені для екстремальних навантажень. Діагональні зв'язки працюють як ферми в будівництві, розподіляючи можливе снігове навантаження рівномірно по всій площині листа. Це дозволяє збільшити крок між прогонами каркасу теплиці, зменшуючи металоємність споруди. Х-подібні ребра створюють трикутні комірки, які ще ефективніше запобігають руху повітря, ніж прямокутні стільники, через складнішу геометрію для зародження конвективних вихрів.

Збільшення кількості камер неминуче впливає на світловий баланс. Кожна додаткова стінка – це ще дві поверхні розділу середовищ, на яких відбувається дзеркальне відбиття. В результаті світлопроникність багатокамерних листів (16–25 мм) становить 60–72 %. Велика кількість внутрішніх граней сприяє сильному розсіюванню світла. Це робить такі панелі ідеальними для культур, чутливих до прямих сонячних променів, але вимагає додаткового штучного досвічування в зимовий період.

Багатокамерні листи значно важчі (2,5–3,8 кг/м^2) ніж однокамерні. Складна внутрішня структура робить видалення випадкового конденсату майже неможливим, тому герметизація торців таких листів є обов'язковою.

Багатокамерні полікарбонати мають наступні технічні параметри: товщини – 16 мм, 20 мм, 25 мм, 32 мм; звукоізоляція – 18–24 дБ.

Такий полікарбонат застосовують для цілорічних тепличних комплексів в північних регіонах.

2.3 Полікарбонат з антиконденсатним покриттям (No-Drop / Anti-Fog)

У процесі експлуатації теплиць різниця температур між внутрішнім насиченим вологою повітрям та холодною поверхнею полікарбонату призводить до неминучої конденсації. Для стільникових структур це створює подвійну проблему: погіршення зовнішньої інсоляції та ризик накопичення вологи всередині камер.

На відміну від плівок, де антифог-добавки вводяться в масу полімеру, у полікарбонаті це зазвичай тонкий коекструдований шар на внутрішній стороні панелі. Покриття радикально знижує кут змочування поверхні. Конденсат, замість того щоб збиратися в сферичні краплі, розтікається тонкою суцільною плівкою. Завдяки низькому опору течії, водяна плівка під дією сили тяжіння стікає до нижнього профілю каркаса. Це важливо для арочних і скатних дахів, де кут нахилу сприяє самоочищенню поверхні від вологи [24].

Оптичний ефект та фітосанітарне значення такого покриття аналогічне як і у антиконденсатної плівки з гідрофільними властивостями.

Панелі No-Drop повинні монтуватися з урахуванням розташування антиконденсатного покриття. При помилковому монтажі покриття не працюватиме, а УФ-захист на зовнішній стороні буде відсутній, що призведе до швидкого руйнування листа. Сучасні коекструдовані шари зберігають антифог-властивості протягом 8–10 років, що корелює із загальним терміном служби якісного полікарбонату.

Технічні параметри полікарбонату з антиконденсатним покриттям наступні: зміна світлопроникності при 100 % вологості не більше 2–4 % (порівняно з 15–20 % у звичайного листа), мінімальний кут нахилу для ефективного стоку конденсату – 10–12 градусів.

2.4 Селективний полікарбонат (Heat-Smart / Solar Control)

Це інноваційний вид, до складу якого входять компоненти, що відсікають надлишкове теплове випромінювання сонця (ближній ІЧ-спектр). Селективний полікарбонат розроблений для вирішення проблеми надлишкової сонячної інсоляції в літній період, яка призводить до перегріву внутрішнього простору теплиці та значних витрат енергії на вентиляцію та кондиціювання. Його головна особливість – здатність вибірково пропускати спектральні складові сонячного випромінювання. Влітку він запобігає перегріву теплиці, відбиваючи теплову енергію сонця, але при цьому пропускає необхідний спектр ФАР для фотосинтезу [33].

Селективний полікарбонат містить у своїй структурі спеціальні металоорганічні добавки або інтерференційні фільтри. Матеріал залишається максимально прозорим для хвиль довжиною 400–700 нм, необхідних для фотосинтезу. Добавки діють як дзеркало для сонячного інфрачервоного випромінювання (700–2500 нм), відбиваючи значну частину теплової енергії ще до її потрапляння всередину теплиці. Це дозволяє освітлювати рослини без супутнього термічного навантаження, що особливо важливо в регіонах з високою сонячною активністю.

З точки зору енергобалансу, селективне покриття виконує роль активного фільтра. Температура під селективним полікарбонатом у спекотний день може бути на 7–12 °С нижчою, ніж під звичайним прозорим листом. Це суттєво зменшує потребу в роботі потужних витяжних вентиляторів та систем охолодження повітря, що знижує споживання електроенергії та води тепличним комплексом. Відсутність термічного стресу запобігає зупинці фотосинтезу (диханню рослин) при екстремальних температурах, що забезпечує стабільний приріст біомаси навіть у липні-серпні.

Такі панелі часто мають легкий перламутровий, сріблястий або золотавий відтінок, що обумовлено наявністю відбивних часток. При цьому світло всередині теплиці залишається природним і білим. Селективні добавки інтегровані в структуру матеріалу методом коекструзії, тому вони не вимиваються і не втрачають своїх властивостей протягом усього терміну служби панелі (10–15 років).

Такі панелі мають наступні технічні параметри: коефіцієнт затінення (Shading Coefficient) – 0,3–0,5; зниження променистої енергії сонця – до 40–60 %; прозорість у діапазоні ФАР – 50–65 % (залежно від конструкції).

3. Скло та комбіновані скломатеріали

3.1 Звичайне прозоре скло (Float Glass)

Звичайне скло – це термополіроване скло, виготовлене методом напливу розплавленої скляної маси на шар розплавленого олова. Воно не має спеціальних енергозберігаючих напилень і працює як однорідний матеріал.

Скло вільно пропускає сонячну енергію (короткохвильове випромінювання) та воно є прозорим для інфрачервоного (теплового) випромінювання.

Коефіцієнт теплопередачі звичайного скла становить приблизно 5,2–5,8 Вт/(м^2 · К). Це означає, що воно має опір теплопередачі менший, ніж більшість інших видів покриття. Взимку внутрішня поверхня скла швидко охолоджується, що призводить до інтенсивного випадання конденсату, обмерзання та появи ефекту «холодного вікна». Це створює дискомфорт для рослин та може призвести до переохолодження кореневої системи та листя.

У звичайного скла світлопроникність найвища серед усіх видів скла та становить 88–92 % (залежно від товщини). Скло має ледь помітний зеленуватий відтінок на зрізі, але на площині забезпечує максимально природний спектр для фотосинтезу.

Емісійна здатність (ε) звичайного скла складає 0,83–0,84.

Використання герметичних склопакетів замість одинарного скління є технологічним рішенням для зменшення тепловтрат у всесезонних тепличних комплексах. Склопакет являє собою об'ємну конструкцію, що складається з двох або більше листів скла, дистанційованих за допомогою алюмінієвої або полімерної рамки та герметично з'єднаних по периметру [11, 34].

3.2 Енергозберігаюче скло з низькоемісійним покриттям

Енергозберігаюче скло (Low-E – Low Emissivity) – це високотехнологічний матеріал, на поверхню якого методом магнетронного напилення у вакуумі нанесено систему тонких шарів металів (переважно срібла) та діелектриків. Це покриття працює за принципом селективного дзеркала [35, 36].

Таке покриття є практично прозорим для коротких хвиль (сонячного світла), що дозволяє їм безперешкодно надходити до теплиці у вдень. Срібний шар має надзвичайно низький коефіцієнт емісії ($\varepsilon \approx 0{,}03–0{,}05$ порівняно з $\varepsilon \approx 0{,}84$ у звичайного скла). Це означає, що понад 90 % довгохвильового тепла, яке намагається проникнути з теплиці, відбивається назад усередину. У складі склопакета Low-E скло розвертається напиленням всередину камери, щоб захистити металевий шар від окислення та механічного зносу [36].

Використання Low-E скла суттєво змінює енергетичний баланс теплиці. Коефіцієнт теплопередачі однокамерного склопакета з Low-E склом знижується до 1,5–1,7 Вт/(м^2 · К). Внутрішнє скло залишається теплим навіть при сильних морозах зовні. Це практично повністю усуває випадання конденсату та обмерзання, що критично для світлопроникності в зимові місяці. Відсутність «холодного випромінювання» від покриття дозволяє висаджувати рослини впритул до огороджувальних конструкцій, максимізуючи корисну площу теплиці [24].

Незважаючи на наявність металевого шару, сучасні Low-E покриття (так зване «м'яке» покриття або Double Silver) мають високу селективність. Світлопроникність у діапазоні ФАР знаходиться на рівні 78–82 %, що лише на кілька відсотків нижче за звичайне скло. Скло не має вираженого відтінку, що забезпечує природний спектр для фотосинтезу.

Емісійна здатність (ε) такого скла становить 0,03–0,10.

3.3 Мультифункціональне скло (Solar Control + Low-E)

Мультифункціональне скло – це продукт нанотехнологій, який поєднує в собі властивості енергозберігаючого та сонцезахисного покриттів. На відміну від стандартного Low-E, воно має складнішу структуру напилення (до 10–15 шарів різних металів, включаючи подвійний шар срібла), що дозволяє йому працювати селективно в залежності від довжини хвилі випромінювання.

Покриття (Solar Control) влітку відбиває до 60 % сонячної теплової енергії (ближній ІЧ-діапазон), не пропускаючи її всередину теплиці. Це радикально знижує перегрів повітря та листя рослин, мінімізуючи витрати на вентиляцію та охолодження повітря в теплиці. Взимку (Low-E) срібні шари працюють як теплове дзеркало, відбиваючи довгохвильове інфрачервоне випромінювання від систем опалення назад усередину приміщення. Незважаючи на потужний тепловий бар'єр, скло залишається прозорим для ФАР, забезпечуючи рівень пропускання близько 70–75 % [33].

У липні-серпні пряма радіація через звичайне скло може нагріти теплицю до +50 °С і вище. Мультифункціональне скло утримує температуру в межах керованих значень, що критично для фотосинтезу (який зазвичай пригнічується при температурах

вище +32–35 °C). Коефіцієнт теплопередачі такого скла становить 1,0–1,1 Вт/(м^2 · К), що є найкращім показником для енергозбереження у тепличних комплексах [37].

У склопакеті мультифункціональне скло завжди встановлюється першим з боку вулиці, а напилення розвертається всередину камери. Це необхідно для того, щоб сонячна енергія відбивалася ще до того, як вона пройде крізь товщу склопакета. Таке скло може мати легкий дзеркальний або блакитний відтінок зовні, але зсередини воно залишається повністю нейтральним [14, 38].

Технічні параметри у такого скла наступні: сонячний фактор (*g*-factor) – 0,38–0,45 (пропускає менше половини сонячного тепла), прозорість у діапазоні ФАР – 70–74 %.

3.4 Просвітлене скло з низьким вмістом заліза (Low-Iron Glass / Extra Clear)

Звичайне силікатне скло має характерний зеленуватий відтінок, який помітний на зрізі. Цей колір зумовлений наявністю оксидів заліза (Fe_2O_3) у сировині. Просвітлене скло проходить спеціальний процес очищення, де вміст заліза знижується до мінімуму (менше 0,01 %).

Оксиди заліза працюють як природний фільтр, який поглинає енергію в певних діапазонах. Видалення заліза змінює оптичні властивості матеріалу. Якщо звичайне скло товщиною 4 мм пропускає близько 89–90 % світла, то просвітлене підвищує цей показник до 91–92 %. Найголовніше це те, що Low-Iron скло краще пропускає промені в діапазонах 400–500 нм (синій) та 600–700 нм (червоний). Саме ці піки є критичними для активізації хлорофілу А та Б. На відміну від звичайного скла, просвітлене пропускає більше м'якого ультрафіолету, що сприяє природному загартовуванню рослин та кращому забарвленню плодів і квітів [39, 40].

Використання просвітленого скла в склопакетах дозволяє нівелювати втрати світла, які виникають через наявність другого шару скла. Просвітлене скло дорожче за звичайне на 30–50 %. Проте варто зазначити, що його використання в склопакетах мультифункціонального типу дозволяє отримати практично ідеальне покриття – максимальне енергозбереження за максимальної світлопроникності.

Технічні параметри просвітленого скла наступні: вміст оксиду заліза <0,01 % (проти 0,1 % у звичайного); коефіцієнт пропускання світла (LT) – 91–92 %, коефіцієнт теплопередачі одинарного скла аналогічний звичайному склу.

3.5 Дифузне скло з антибліковим покриттям (Diffuse Glass + AR-coating)

Це скло вирішує дві протилежні задачі, воно одночасно максимізує кількість світла, що потрапляє всередину, і рівномірно розподіляє його по всьому об'єму теплиці [41].

Звичайне скло відбиває близько 8–10 % сонячної енергії від своєї поверхні. Anti-Reflective-покриття – це наношар (зазвичай діоксид кремнію SiO_2), нанесений методом травлення або золь-гель процесу. Таке покриття має показник заломлення, проміжний між повітрям і склом. Це мінімізує дзеркальне відбиття, дозволяючи променям проникати в скло майже без втрат. Пропускна здатність у діапазоні ФАР зростає до рекордних 95–97 %. Це дає змогу рослинам отримати максимум енергії навіть у похмурі дні [42, 43].

Поверхня такого скла не є гладкою. Вона має мікроструктуру (призматичну або матову), яка заломлює прямі промені. Показник Haze характеризує відсоток світла, що відхиляється від прямої траєкторії. Для теплиць оптимальним вважається Haze 20 % (Low Haze) або 50 % (High Haze). Світло потрапляє на нижні листки рослин і всередину густих насаджень, що активує фотосинтез там, де зазвичай панує тінь. Завдяки розсіюванню світло не концентрується на верхніх листках, що запобігає їх перегріву та сповільненню фотосинтезу через надмірну інтенсивність.

За даними європейських досліджень (Wageningen University), використання дифузного скла з AR-покриттям підвищує врожайність томатів та огірків на 6–10 % [44]. Часто таке скло має властивість самоочищення. Дощова вода не збирається краплями, а змиває пил суцільним шаром, підтримуючи чистоту покриття без механічного втручання.

Технічні параметри такого скла наступні: коефіцієнт світлопропускання у діапазоні ФАР – 94–97 %; фактор розсіювання (Haze) від 10 % до 75 %.

3.6 Газонаповнені склопакети (Аргон / Криптон)

У стандартному склопакеті між шарами скла знаходиться осушене повітря. Проте для досягнення більш низьких показників теплопередачі камери склопакетів заповнюють інертними газами.

Молекулярна теплопровідність аргону на 30 % нижча, ніж у повітря, а криптону – майже в 2,5 рази. Це сповільнює пряму передачу енергії від внутрішнього скла до зовнішнього [45]. Інертні гази також важчі за повітря. Це призводить до того, що конвективні потоки (циркуляція газу всередині камери) виникають значно повільніше. Число Нуссельта (Nu), яке характеризує інтенсивність конвекції, зменшується, що робить газовий прошарок кращим ізолятором.

Найбільш раціональним вибором за співвідношенням «ціна/ефективність» є аргон. Заповнення камери аргоном підвищує опір теплопередачі склопакета на 10–15 %. Оптимальна ширина дистанційної рамки для аргону становить 14–16 мм. Криптон (Kr) набагато дорожчий, але більш ефективніший газ. Він дозволяє створювати дуже тонкі енергоефективні склопакети (оптимальна ширина камери лише 10–12 мм). У тепличному будівництві він використовується рідко, переважно в регіонах з низькими температурами [45].

При застосуванні таких склопакетів важливо врахувати «життєвий цикл» цього покриття. Газ, що заповнює склопакет, може вивітрюватися (дифундувати) крізь герметизацію склопакету. Якісний склопакет втрачає не більше 1 % газу на рік. У місцевості, де спостерігаються значні вітрові навантаження, критично важливо використовувати склопакети з подвійним контуром герметизації (бутил + полісульфід), щоб утримати газ усередині протягом 15–20 років.

Коефіцієнт теплопередачі однокамерного склопакета з Low-E склом та аргоном становить 1,3–1,4 Вт/(м^2 · К).

3.7 Гартоване та ламіноване скло

Для великогабаритних скляних теплиць використання звичайного флоат-скла є ризикованим через його крихкість. Професійні енергоефективні рішення передбачають зміцнення матеріалу для протидії статичним (сніг) та динамічним (вітер, град) навантаженням.

Гартування – це термічна обробка, під час якої скло нагрівається до температури розм'якшення (650–700 °C) з наступним швидким і рівномірним охолодженням повітряними струменями. В результаті охолодження поверхневі шари скла стискаються, а внутрішні – розтягуються. Це створює систему внутрішніх напружень, яка підвищує міцність скла на вигин у 5–7 разів. Гартоване скло товщиною 4 мм витримує прямий удар крижаної кулі діаметром до 25–30 мм, що летить зі швидкістю 20 м/с. При критичному пошкодженні скло розпадається на дрібні уламки з тупими краями, що не здатні серйозно травмувати персонал або пошкодити агротехнічне обладнання. Гартоване скло витримує перепади температур до 200 °C (звичайне – лише до 40 °C), що важливо при різкому охолодженні нагрітого сонцем даху під час літньої зливи [46].

Ламіноване скло (Триплекс) складається з двох або більше листів скла, з'єднаних між собою прозорою полімерною плівкою (PVB або EVA) під дією високої температури та тиску. При руйнуванні скло залишається на плівці, зберігаючи герметичність покрівлі теплиці до моменту заміни скла. Це критично для захисту врожаю від зовнішнього холоду при аварійних ситуаціях. Плівка триплексу затримує до 99 % шкідливого ультрафіолету, що може бути корисним для захисту внутрішніх пластикових компонентів систем поливу та автоматики від вигорання. Через високу вагу та вартість триплекс у теплицях використовується переважно для вертикального скління в зонах з підвищеним ризиком механічного впливу.

ЗАКЛЮЧНА ЧАСТИНА

Проведений аналіз сучасних покривних матеріалів для тепличних комплексів показав, що їх вибір безпосередньо впливає на енергетичну ефективність, стабільність мікроклімату та економічні показники експлуатації теплиць. Результати порівняльного аналізу основних характеристик світлопрозорих

Таблиця 1. Порівняння характеристик світлопрозорих покривних матеріалів

Тип покриття		Прозорість у діапазоні ФАР, %	U-value, Вт/(м^2 · К)	Термін служби, років
Нестабілізована поліетиленова плівка низької щільності		нова 88–91	6,2	до року
УФ-стабілізована багаторічна плівка		85–88	6,2	3–6
Теплоутримуюча інфрачервона плівка		82–85	4,2–4,8	4+
Антиконденсатна плівка з гідрофільними властивостями		до 90	6,2	до 5
Світлорозсіювальна дифузійна плівка		86–89	6,2	1–4
Однокамерний стільниковий полікарбонат	4 мм	82–86	3,9	10–15
	6 мм	80–84	3,6	10–15
	8 мм	80–84	3,3	10–15
	10 мм	79–83	3,0	10–15
Двокамерний полікарбонат 16 мм		72–76	2,3	10–15
Полікарбонат з антиконденсатним покриттям		Залежно від товщини	Залежно від товщини	8–10
Селективний полікарбонат		Залежно від типу 50–65	Залежно від типу	10–15
Звичайне прозоре одинарне скло (4 мм)		88–92	5,8	30+
Склопакет однокамерний		80–82	2,8–3,0	20+
Склопакет однокамерний з Low-E напиленням		78–82	1,5–1,7	20+
Склопакет однокамерний з аргоновим наповненням та Low-E напиленням		78–82	1,3–1,4	15–20
Склопакет однокамерний з мультифункціональним склом (Solar Control + Low-E)		70–74	1,0–1,1	20+
Просвітлене скло з низьким вмістом заліза (4 мм)		91–92	5,8	30+
Дифузне скло з антибліковим покриттям (4 мм)		95–97	5,8	15–20

покривних матеріалів для тепличних комплексів представлені у таблиці 1.

Встановлено, що традиційні поліетиленові плівки, незважаючи на низьку вартість та простоту монтажу, характеризуються високими тепловими втратами, обмеженим терміном служби та нестабільністю оптичних властивостей у процесі старіння.

Стільниковий полікарбонат забезпечує кращі теплоізоляційні характеристики та механічну міцність порівняно з плівковими матеріалами, однак поступово втрачає світлопропускання внаслідок деградації поверхні та має обмеження щодо довговічності при тривалій експлуатації в умовах інтенсивного ультрафіолетового випромінювання.

Найбільш перспективними для сучасних всесезонних тепличних комплексів є багатофункціональні скломатеріали та енергоефективні склопакети з низькоемісійними, селективними та дифузними покриттями. Використання таких конструкцій дозволяє суттєво знизити тепловтрати, покращити рівномірність освітлення рослин, зменшити температурні коливання всередині теплиці та скоротити витрати енергії на опалення й вентиляцію.

Особливу перспективність для умов Причорноморського регіону України мають склопакети з Low-E покриттями, аргоновим наповненням та дифузними антибліковими поверхнями, які забезпечують оптимальне поєднання енергоефективності, світлопропускання та довговічності. Отримані результати можуть бути використані як наукова основа для подальших досліджень енергетично ефективних світлопрозорих конструкцій тепличних комплексів нового покоління.

ВИСНОВКИ

Основна частина теплових втрат теплиць припадає на світлопрозорі огороджувальні конструкції, тому вибір покривного матеріалу є визначальним фактором енергоефективності тепличного комплексу.

Поліетиленові плівки характеризуються високою світлопроникністю та низькою вартістю, проте мають недостатню довговічність і низькі теплоізоляційні властивості для всесезонного використання.

Стільниковий полікарбонат забезпечує покращені теплоізоляційні характеристики та механічну стійкість, однак поступається сучасним склопакетам за показниками світлопропускання та довговічності.

Найкращі теплотехнічні та експлуатаційні характеристики демонструють багатофункціональні склопакети з Low-E покриттями, дифузними поверхнями та газовим наповненням.

Використання сучасних енергоефективних скломатеріалів дозволяє знизити тепловтрати теплиці, стабілізувати мікроклімат та підвищити ефективність всесезонного вирощування сільськогосподарських культур.

REFERENCES

[1] Savchenko, V. M., Minenko, S. V., Kulykivskyi, V. L., & Savchenko, L. H. (2021). Formuvannia derzhavnoi polityky rozvytku haluzi roslynnytstva zakrytoho gruntu v konteksti prodovolchoi bezpeky Ukrainy [Formation of state development policy of horticulture of closed soil in terms of industrial safety of Ukraine]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriia: Derzhavne upravlinnia*, *3*, 41–47. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.32838/tnu-2663-6468/2021.3/08

[2] Parkhomets, M. K., & Hradovyi, V. V. (2021). Osoblyvosti ta pokaznyky formuvannia systemy enerhozberezhennia silskohospodarskykh pidpryiemstv. Innovatsiina ekonomika [Features and indicators of formation of energy saving system in agricultural enterprises]. *Innovative economy*, *3–4*, 87–97. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.37332/2309-1533.2021.3-4.13

[3] Ibeagwu, O. I., Brenders, V., Lubitz, W. D., Mahmud, S., & Tasnim, S. (2026). Technological pathways for decarbonizing cold-climate greenhouses: A detailed review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *238*, 117099. https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.117099

[4] Jovanovska, V., Sovreski, Z., Hristovska, E., & Makarijoski, B. (2017). Energy balance of greenhouse with ground warming installation. *Innovations, 5*(2), 95–98. https://stumejournals.com/journals/innovations/2017/2/95.full.pdf

[5] DP "DNDIBK". (2022). *Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel [Thermal insulation and energy efficiency of buildings]. (DBN V.2.6-31:2021).* Ministerstvo rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy. [in Ukrainian]. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3075196638495507996

[6] Ahamed, M. S., Guo, H., & Tanino, K. (2019). Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses. *Biosystems Engineering*, *178*, 9–33. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.017

[7] Baeza, E., & López, J. C. (2012). Light transmission through greenhouse covers. *Acta Horticulturae*, *956*, 425–440. https://doi.org/10.17660/actahortic.2012.956.50

[8] Babenko, M. M., Bordun, M. V., Nesin, O. A., ta in. (2017). Ratsionalne proektuvannia teplytsi za kriteriiem vartosti zhyttievoho tsyklu [The rational design of greenhouse on the criterion of value of life cycle]. *Budivnytstvo, materialoznavstvo, mashynobuduvannia, 99*, 15–21. [in Ukrainian]. URL: http://srd.pgasa.dp.ua:8080/bitstream/123456789/2989/1/Babenko.pdf

[9] Teitel, M., Vitoshkin, H., Geoola, F., Karlsson, S., & Stahl, N. (2018). Greenhouse and screenhouse cover materials: literature review and industry perspective. *Acta Horticulturae*, 1227, 31–44. https://doi.org/10.17660/actahortic.2018.1227.4

[10] Khazin, V. Y., & Zatulyviter, O. M. (2011). Analiz riznomanitnykh vydiv suchasnykh plivkovykh pokrivel teplyts ta parnykiv [Analysis of various types of modem film roofs for greenhouses and hothouses]. *Zbirnyk naukovykh prats Poltavskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu im. Yu. Kondratiuka. Seriia: Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo, 2*, 234–240. [in Ukrainian]. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpgmb_2011_2_40

[11] Ukrainskyi instytut stalevykh konstruktsii imeni V. M. Shymanovskoho. (2024). *Budivli ta sporudy. Teplytsi i parnyky [Buildings and construction. Greenhouses]. (DBN V.2.2-2:2024)*. Mininfrastruktury Ukrainy. [in Ukrainian]. URL: https://e-construction.gov.ua/files-token/22d4caf8bab0a20683ef6470f03d6bc9

[12] Kim, H.-K., Lee, S.-Y., Kwon, J.-K., & Kim, Y.-H. (2022). Evaluating the Effect of Cover Materials on Greenhouse Microclimates and Thermal Performance. *Agronomy*, *12*(1), 143. https://doi.org/10.3390/agronomy12010143

[13] Deschênes, M., Bendouma, M., Alexis, R.-G., Godbout, S., & Fournel, S. (2025). Theoretical development and experimental validation of a thermal model comparing different greenhouse covering materials. *Energy Nexus*, *20*, 100537. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100537

[14] Papadakis, G., Briassoulis, D., Scarascia Mugnozza, G., Vox, G., Feuilloley, P., & Stoffers, J. A. (2000). Radiometric and Thermal Properties of, and Testing Methods for, Greenhouse Covering Materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *77*(1), 7–38. https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0525

[15] Zhang, E., Elmi, M., Jahid, A., Duan, Q., & Wang, J. (2026). Assessing greenhouse covering systems for energy efficiency and solar irradiance modulation: A technical review. *Green Technologies and Sustainability*, *4*(2), 100281. https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100281

[16] Tantau, H.-J., Hinken, J., von Elsner, B., Max, J. F. J., Ulbrich, A., Schurr, U., Hofmann, T., & Reisinger, G. (2012). Solar transmittance of greenhouse covering materials. *Acta Horticulturae*, *956*, 441–448. https://doi.org/10.17660/actahortic.2012.956.51

[17] Yatsyshyn, M., Semeniuk, Yu., Kovalchuk, Ye., & Krupak, I. (2007). Porivnialna fizyko-khemichna kharakterystyka zrazkiv polietylenu [Comparative physico-chemical characterization of polyethylene specimens]. *Pratsi Naukovoho tovarystva im. Shevchenka*, *18*, 156–167. URL: https://nasplib.isofts.kiev.ua/bitstreams/3e093098-5ee5-4f58-9edc-07664612afb9/download

[18] Technical Committee ISO/TC 61, Plastics. (2022). *Plastmasy. Vyznachennia vlastyvostei pid chas roztiahuvannia. Chastyna 3. Umovy vyprobuvannia plivok i lystiv (EN ISO 527-3:2018, IDT; ISO 527-3:2018, IDT) [Plastics. Determination of tensile properties. Part 3. Test conditions for films and sheets (EN ISO 527-3:2018, IDT; ISO 527-3:2018, IDT)]. (DSTU EN ISO 527-3:2022)*. DP "UkrNDNTs".

[19] Lamnatou, Chr., & Chemisana, D. (2013). Solar radiation manipulations and their role in greenhouse claddings: Fluorescent solar concentrators, photoselective and other materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 175–190. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.052

[20] Martsynko, O. E. (2021). *Suchasni polimerni materialy ta yikh zastosuvannia: Metodychni vkazivky do kursu "Suchasni polimerni materialy ta metody yikh doslidzhennia" (riven vyshchoi osvity tretii (PhD), spetsialnist 102 "Khimiia") [Modern polymer materials and their applications: methodological instructions for the course "Modern polymer materials and methods of their research" level of higher education third (PhD) specialty 102 "Chemistry"].* Odeskyi natsionalnyi universytet imeni I. I. Mechnykova. URL: https://dspace.onu.edu.ua/bitstreams/23879744-68f0-4d31-a5b9-d910c03533a2/download

[21] Technical Committee CEN/TC 249 «Plastics». (2022). *Plastmasy. Termoplastychni pokryvni plivky dlia vykorystannia v silskomu hospodarstvi ta sadivnytstvi (EN 13206:2017+A1:2020, IDT) [Plastics. Thermoplastic covering films for use in agriculture and horticulture (EN 13206:2017+A1:2020, IDT)]. (DSTU EN 13206:2022)*. DP "UkrNDNTs".

[22] Dilara, P. A., & Briassoulis, D. (2000). Degradation and Stabilization of Low-density Polyethylene Films used as Greenhouse Covering Materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76(4), 309–321. https://doi.org/10.1006/jaer.1999.0513

[23] Van Aken, L. A. C. M. (2014). Evaluation of infra-red thermal additives for greenhouse film. *Acta Horticulturae*, 1015, 209–216. https://doi.org/10.17660/actahortic.2014.1015.23

[24] Pollet, I. V., & Pieters, J. G. (2000). Condensation and Radiation Transmittance of Greenhouse Cladding Materials, Part 2: Results for a Complete Condensation Cycle. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *75*(1), 65–72. https://doi.org/10.1006/jaer.1999.0487

[25] Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Kitta, E. (2012). Effects of anti-drip polyethylene covering films on microclimate and crop production. *Acta Horticulturae*, 952, 209–215. https://doi.org/10.17660/actahortic.2012.952.25

[26] Zheng, K., Zhao, S., Zhou, Q., Qu, Y., & Wang, P. (2018). Preliminary application of diffuse light film in a Chinese solar greenhouse. Acta Horticulturae, 1227, 249–256. https://doi.org/10.17660/actahortic.2018.1227.30

[27] Al-Madani, A. A., Al-Helal, I. M., & Alsadon, A. A. (2024). Assessing the effectiveness of reflective and diffusive polyethylene films as greenhouse covers in arid environments. *Agronomy*, *14*(5), 1082. https://doi.org/10.3390/agronomy14051082

[28] Technical Committee CEN/TC 128 "Roof covering products for discontinous laying and products for wall cladding". (2019). *Lysty svitlopronykni plaski bahatosharovi z polikarbonatu (PC) dlia vnutrishnoho ta zovnishnoho zastosuvannia dlia pokrivel, stin i stel. Vymohy ta metody vyprobuvannia (EN 16153:2013 + A1:2015, IDT) [Light transmitting fmat multiwall polycarbonate (PC) sheets for internal and external use in roofs, walls and ceilings – Requirements and test methods]. (DSTU EN 16153:2019)*. ДП «УкрНДНЦ».

[29] Moretti, E., Zinzi, M., & Belloni, E. (2014). Polycarbonate panels for buildings: Experimental investigation of thermal and optical performance. *Energy and Buildings*, *70*, 23–35. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.045

[30] Korkmaz, C., & Tezcan, N. Y. (2026). Examining the effect of different polycarbonate greenhouse cover materials on tomato yield and plant development with thermal imaging. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, *50*(1), 13–31. https://doi.org/10.55730/1300-011x.3330

[31] Niziolek, T. *Polycarbonate sheet products for high performance architectural glazing*. Covestro AG. URL: https://www.architectu.net/media/course/4827/story_content/external_files/HWU_AR_Covestro_AR_Apr_ADV17_DIGITAL.pdf

[32] Čekon, M., Slávik, R., & Zach, J. (2017). Experimental Analysis of Transparent Insulation Based on Poly-carbonate Multi-Wall Systems: Thermal and Optical Performance. *Energy Procedia*, *132*, 502–507. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.691

[33] Al-Mahdouri, A., Gonome, H., Okajima, J., & Maruyama, S. (2014). Theoretical and experimental study of solar thermal performance of different greenhouse cladding materials. *Solar Energy*, 107, 314–327. https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.006

[34] Vadiee, A., & Martin, V. (2014). Energy management strategies for commercial greenhouses. *Applied Energy*, *114*, 880–888. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.089

[35] Jelle, B. P. (2013). Solar radiation glazing factors for window panes, glass structures and electrochromic windows in buildings – Measurement and calculation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 116, 291–323. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.04.032

[36] Song, S., Jeon, J., & Yoon, S. (2025). Optimizing Energy Efficiency and Light Transmission in Greenhouses Using Rotating Low-Emissivity-Coated Envelopes. *Energies*, 18(7), 1613. https://doi.org/10.3390/en18071613

[37] Berardi, U., & Khaled, K. (2024). *Architectural Glass Solar and Thermal Control Coating Technologies*. In Encyclopedia of Sustainable Technologies (pp. 361–386). Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90386-8.00075-9

[38] Sethi, V. P. (2009). On the selection of shape and orientation of a greenhouse: Thermal modeling and experimental validation. *Solar Energy*, 83(1), 21–38. https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.05.018

[39] Max, J. F. J., Reisinger, G., Hofmann, T., Hinken, J., Tantau, H.-J., Ulbrich, A., Lambrecht, S., von Elsner, B., & Schurr, U. (2012). Glass–film-combination: Opto-physical properties and energy saving potential of a novel greenhouse glazing system. *Energy and Buildings*, *50*, 298–307. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.051

[40] Technical Committee CEN/TC 129 “Glass in building”. (2022). *Sklo v budivnytstvi. Vyznachennia svitlovykh i soniachnykh kharakterystyk sklinnia (EN 410:2011, IDT) [Glass in building – Determination of luminous and solar characteristics of glazing (EN 410:2011, IDT)]. (ДСТУ EN 410:2021)*. ДП «УкрНДНЦ». [in Ukrainian].

[41] van Steekelenburg, G., Hemming, S., Kaiser, E., & Heuvelink, E. (2025). Quantifying the effects of hortiscatter in greenhouse cover materials on crop yield. *Acta Horticulturae*, 1423, 87–94. https://doi.org/10.17660/actahortic.2025.1423.12

[42] Garlisi, C., Trepci, E., Li, X., Al Sakkaf, R., Al-Ali, K., Nogueira, R. P., Zheng, L., Azar, E., & Palmisano, G. (2020). Multilayer thin film structures for multifunctional glass: Self-cleaning, antireflective and energy-saving properties. *Applied Energy*, *264*, 114697. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114697

[43] Tsoy, N., Prado, V., Wypkema, A., Quist, J., & Mourad, M. (2019). Anticipatory Life Cycle Assessment of sol-gel derived anti-reflective coating for greenhouse glass. *Journal of Cleaner Production*, *221*, 365–376. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.246

[44] Hemming, S., Dueck, T., Janse, J., & van Noort, F. (2008). The effect of diffuse light on crops. *Acta Horticulturae*, 801, 1293–1300. https://doi.org/10.17660/actahortic.2008.801.158

[45] Bazgaou, A., Aqili, N., Benahmed, A., Ibaaz, K., Oubenmoh, S., Er-Raki, M., Belhorma, B., Amenzou, N., Saadaoui, A., Hartiti, B., Labrim, H., & Marah, H. (2023). Optimizing greenhouse design: Effect of argon double glazing on climatic factors distribution and energy savings. *Solar Energy*, *265*, 112145. https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112145

[46] UkrNDIahroproekt. (2007). *Teplychni i oranzhereini pidpryiemstva, sporudy zakhyshchenoho gruntu dlia fermerskykh (selianskykh) hospodarstv [Greenhouse and orangery enterprises, protected soil structures for farms (peasant farms)]. (VNTP APK–19–07)*. Ministerstvo ahrarnoi polityky Ukrainy. [in Ukrainian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Савченко, В. М., Міненко, С. В., Куликівський, В. Л., & Савченко, Л. Г. (2021). Формування державної політики розвитку галузі рослинництва закритого ґрунту в контексті продовольчої безпеки України. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Державне управління*, (*3*), 52–58. https://doi.org/10.32838/TNU-2663-6468/2021.3/08

[2] Пархомець, М. К., & Градовий, В. В. (2021). Особливості та показники формування системи енергозбереження сільськогосподарських підприємств. *Інноваційна економіка*, *3–4*, 87–97. https://doi.org/10.37332/2309-1533.2021.3-4.13

[3] Ibeagwu, O. I., Brenders, V., Lubitz, W. D., Mahmud, S., & Tasnim, S. (2026). Technological pathways for decarbonizing cold-climate greenhouses: A detailed review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *238*, 117099. https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.117099

[4] Jovanovska, V., Sovreski, Z., Hristovska, E., & Makarijoski, B. (2017). Energy balance of greenhouse with ground warming installation. *Innovations, 5*(2), 95–98. https://stumejournals.com/journals/innovations/2017/2/95.full.pdf

[5] ДП «ДНДІБК». (2022). *Теплова ізоляція та енергоефективність будівель*. (ДБН В.2.6-31:2021). Міністерство розвитку громад та територій України. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3075196638495507996

[6] Ahamed, M. S., Guo, H., & Tanino, K. (2019). Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses. *Biosystems Engineering*, *178*, 9–33. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.017

[7] Baeza, E., & López, J. C. (2012). Light transmission through greenhouse covers. *Acta Horticulturae*, *956*, 425–440. https://doi.org/10.17660/actahortic.2012.956.50

[8] Бабенко, М. М., Бордун, М. В., Несін, О. А., та ін. (2017). Раціональне проектування теплиці за критерієм вартості життєвого циклу. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування, 99*, 15–21. URL: http://srd.pgasa.dp.ua:8080/bitstream/123456789/2989/1/Babenko.pdf

[9] Teitel, M., Vitoshkin, H., Geoola, F., Karlsson, S., & Stahl, N. (2018). Greenhouse and screenhouse cover materials: literature review and industry perspective. *Acta Horticulturae*, 1227, 31–44. https://doi.org/10.17660/actahortic.2018.1227.4

[10] Хазін, В. Й., & Затуливітер, О. М. (2011). Аналіз різноманітних видів сучасних плівкових покрівель теплиць та парників. *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво, 2*, 234–240. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpgmb_2011_2_40

[11] Український інститут сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. (2024). *Будівлі та споруди. Теплиці і парники*. (*ДБН В.2.2-2:2024*). Мінінфраструктури України. URL: https://e-construction.gov.ua/files-token/22d4caf8bab0a20683ef6470f03d6bc9

[12] Kim, H.-K., Lee, S.-Y., Kwon, J.-K., & Kim, Y.-H. (2022). Evaluating the Effect of Cover Materials on Greenhouse Microclimates and Thermal Performance. *Agronomy*, *12*(1), 143. https://doi.org/10.3390/agronomy12010143

[13] Deschênes, M., Bendouma, M., Alexis, R.-G., Godbout, S., & Fournel, S. (2025). Theoretical development and experimental validation of a thermal model comparing different greenhouse covering materials. *Energy Nexus*, *20*, 100537. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100537

[14] Papadakis, G., Briassoulis, D., Scarascia Mugnozza, G., Vox, G., Feuilloley, P., & Stoffers, J. A. (2000). Radiometric and Thermal Properties of, and Testing Methods for, Greenhouse Covering Materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *77*(1), 7–38. https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0525

[15] Zhang, E., Elmi, M., Jahid, A., Duan, Q., & Wang, J. (2026). Assessing greenhouse covering systems for energy efficiency and solar irradiance modulation: A technical review. *Green Technologies and Sustainability*, *4*(2), 100281. https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100281

[16] Tantau, H.-J., Hinken, J., von Elsner, B., Max, J. F. J., Ulbrich, A., Schurr, U., Hofmann, T., & Reisinger, G. (2012). Solar transmittance of greenhouse covering materials. *Acta Horticulturae*, *956*, 441–448. https://doi.org/10.17660/actahortic.2012.956.51

[17] Яцишин, М., Семенюк, Ю., Ковальчук, Є., & Крупак, І. (2007). Порівняльна фізико-хемічна характеристика зразків поліетилену. *Праці Наукового товариства ім. Шевченка, 18*, 156–167. URL: https://nasplib.isofts.kiev.ua/bitstreams/3e093098-5ee5-4f58-9edc-07664612afb9/download

[18] Technical Committee ISO/TC 61 “Plastics”. (2022). *Пластмаси. Визначення властивостей під час розтягування. Частина 3. Умови випробування плівок і листів (EN ISO 527-3:2018, IDT; ISO 527-3:2018, IDT). (ДСТУ EN ISO 527-3:2022)*. ДП «УкрНДНЦ».

[19] Lamnatou, Chr., & Chemisana, D. (2013). Solar radiation manipulations and their role in greenhouse claddings: Fluorescent solar concentrators, photoselective and other materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 175–190. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.052

[20] Марцинко, О. Е. (2021). *Сучасні полімерні матеріали та їх застосування: Методичні вказівки до курсу «Сучасні полімерні матеріали та методи їх дослідження» (рівень вищої освіти третій (PhD), спеціальність 102 «Хімія»)*. Одеський національний університет імені І. І. Мечникова. URL: https://dspace.onu.edu.ua/bitstreams/23879744-68f0-4d31-a5b9-d910c03533a2/download

[21] Technical Committee CEN/TC 249 «Plastics». (2022). *Пластмаси. Термопластичні покривні плівки для використання в сільському господарстві та садівництві (EN 13206:2017+A1:2020, IDT). (ДСТУ EN 13206:2022).* ДП «УкрНДНЦ».

[22] Dilara, P. A., & Briassoulis, D. (2000). Degradation and Stabilization of Low-density Polyethylene Films used as Greenhouse Covering Materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76(4), 309–321. https://doi.org/10.1006/jaer.1999.0513

[23] Van Aken, L. A. C. M. (2014). Evaluation of infra-red thermal additives for greenhouse film. *Acta Horticulturae*, 1015, 209–216. https://doi.org/10.17660/actahortic.2014.1015.23

[24] Pollet, I. V., & Pieters, J. G. (2000). Condensation and Radiation Transmittance of Greenhouse Cladding Materials, Part 2: Results for a Complete Condensation Cycle. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *75*(1), 65–72. https://doi.org/10.1006/jaer.1999.0487

[25] Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Kitta, E. (2012). Effects of anti-drip polyethylene covering films on microclimate and crop production. *Acta Horticulturae*, 952, 209–215. https://doi.org/10.17660/actahortic.2012.952.25

[26] Zheng, K., Zhao, S., Zhou, Q., Qu, Y., & Wang, P. (2018). Preliminary application of diffuse light film in a Chinese solar greenhouse. *Acta Horticulturae*, 1227, 249–256. https://doi.org/10.17660/actahortic.2018.1227.30

[27] Al-Madani, A. A., Al-Helal, I. M., & Alsadon, A. A. (2024). Assessing the effectiveness of reflective and diffusive polyethylene films as greenhouse covers in arid environments. *Agronomy*, *14*(5), 1082. https://doi.org/10.3390/agronomy14051082

[28] Technical Committee CEN/TC 128 «Roof covering products for discontinous laying and products for wall cladding». (2019). *Листи світлопроникні пласкі багатошарові з полікарбонату (PC) для внутрішнього та зовнішнього застосування для покрівель, стін і стель. Вимоги та методи випробування (EN 16153:2013 + A1:2015, IDT). (ДСТУ EN 16153:2019)*. ДП «УкрНДНЦ».

[29] Moretti, E., Zinzi, M., & Belloni, E. (2014). Polycarbonate panels for buildings: Experimental investigation of thermal and optical performance. *Energy and Buildings*, *70*, 23–35. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.045

[30] Korkmaz, C., Tezcan, N. Y. (2026). Examining the effect of different polycarbonate greenhouse cover materials on tomato yield and plant development with thermal imaging. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, *50*(1), 13–31. https://doi.org/10.55730/1300-011x.3330

[31] Niziolek, T. *Polycarbonate sheet products for high performance architectural glazing*. Covestro AG. URL: https://www.architectu.net/media/course/4827/story_content/external_files/HWU_AR_Covestro_AR_Apr_ADV17_DIGITAL.pdf

[32] Čekon, M., Slávik, R., & Zach, J. (2017). Experimental Analysis of Transparent Insulation Based on Poly-carbonate Multi-Wall Systems: Thermal and Optical Performance. *Energy Procedia*, *132*, 502–507. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.691

[33] Al-Mahdouri, A., Gonome, H., Okajima, J., & Maruyama, S. (2014). Theoretical and experimental study of solar thermal performance of different greenhouse cladding materials. *Solar Energy*, 107, 314–327. https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.006

[34] Vadiee, A., & Martin, V. (2014). Energy management strategies for commercial greenhouses. *Applied Energy*, *114*, 880–888. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.089

[35] Jelle, B. P. (2013). Solar radiation glazing factors for window panes, glass structures and electrochromic windows in buildings – Measurement and calculation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *116*, 291–323. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.04.032

[36] Song, S., Jeon, J., & Yoon, S. (2025). Optimizing Energy Efficiency and Light Transmission in Greenhouses Using Rotating Low-Emissivity-Coated Envelopes. *Energies*, 18(7), 1613. https://doi.org/10.3390/en18071613

[37] Berardi, U., & Khaled, K. (2024). *Architectural Glass Solar and Thermal Control Coating Technologies*. In Encyclopedia of Sustainable Technologies (pp. 361–386). Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90386-8.00075-9

[38] Sethi, V. P. (2009). On the selection of shape and orientation of a greenhouse: Thermal modeling and experimental validation. *Solar Energy*, 83(1), 21–38. https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.05.018

[39] Max, J. F. J., Reisinger, G., Hofmann, T., Hinken, J., Tantau, H.-J., Ulbrich, A., Lambrecht, S., von Elsner, B., & Schurr, U. (2012). Glass–film-combination: Opto-physical properties and energy saving potential of a novel greenhouse glazing system. *Energy and Buildings*, *50*, 298–307. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.051

[40] Technical Committee CEN/TC 129 "Glass in building". (2022). *Скло в будівництві. Визначення світлових і сонячних характеристик скління (EN 410:2011, IDT). (ДСТУ EN 410:2021)*. ДП «УкрНДНЦ».

[41] Van Steekelenburg, G., Hemming, S., Kaiser, E., & Heuvelink, E. (2025). Quantifying the effects of hortiscatter in greenhouse cover materials on crop yield. *Acta Horticulturae*, 1423, 87–94. https://doi.org/10.17660/actahortic.2025.1423.12

[42] Garlisi, C., Trepci, E., Li, X., Al Sakkaf, R., Al-Ali, K., Nogueira, R. P., Zheng, L., Azar, E., & Palmisano, G. (2020). Multilayer thin film structures for multifunctional glass: Self-cleaning, antireflective and energy-saving properties. *Applied Energy*, *264*, 114697. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114697

[43] Tsoy, N., Prado, V., Wypkema, A., Quist, J., & Mourad, M. (2019). Anticipatory Life Cycle Assessment of sol-gel derived anti-reflective coating for greenhouse glass. *Journal of Cleaner Production*, *221*, 365–376. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.246

[44] Hemming, S., Dueck, T., Janse, J., & van Noort, F. (2008). The effect of diffuse light on crops. *Acta Horticulturae*, 801, 1293–1300. https://doi.org/10.17660/actahortic.2008.801.158

[45] Bazgaou, A., Aqili, N., Benahmed, A., Ibaaz, K., Oubenmoh, S., Er-Raki, M., Belhorma, B., Amenzou, N., Saadaoui, A., Hartiti, B., Labrim, H., & Marah, H. (2023). Optimizing greenhouse design: Effect of argon double glazing on climatic factors distribution and energy savings. *Solar Energy*, *265*, 112145. https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112145

[46] УкрНДІагропроект. (2007). *Тепличні і оранжерейні підприємства, споруди захищеного ґрунту для фермерських (селянських) господарств*. (*ВНТП АПК–19–07*). Міністерство аграрної політики України.

© Шостак В. П., Сваричевський Д. В.
Дата першого надходження статті до видання: 09.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 03.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 02.11.2026

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