e-ISSN 2708-9754; ISSN 2307-1699
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ, 2026, Вип. 52
AGRICULTURAL MACHINES, 2026, Vol. 52

GRAPHICAL MODELING OF THE ANGULAR PARAMETERS OF A FLAT MIRROR CONCENTRATOR FOR A SOLAR DRYER

S. Korobka[1*], I. Stukalets[1], M. Tolstushko[2], N. Tolstushko[2]

[1]Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies of Lviv, Lviv, Ukraine
[2]Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
flat mirror concentrator,
solar dryer,
solar energy,
solar radiation,
tilt angle,
graphical design,
law of reflection.

Article history:
Received 19.10.2026
Reviewed 26.10.2026
Approved 30.10.2026

[*]***Corresponding author:***
korobkasv@ukr.net

ABSTRACT

The article investigates the features of engineering and graphical determination of the spatial position of a flat mirror concentrator to increase the amount of solar energy incident on the air collector of a solar dryer. The design of a reflecting panel with an area of 2.0 m² and dimensions of 2.0 × 1.30 m is considered, and its geometric relationship with the receiving surface is established. Based on the law of reflection, a method for determining the direction of the reflected ray depending on the solar altitude angle and the relative positions of the mirror and the collector is developed. Calculations were performed for solar altitude angles ranging from 15° to 55°, a distance of 1.0 m between the reflecting and receiving surfaces, and a collector height of 1.5 m. Under the specified conditions, a range of rational values for the dihedral angle between the mirror and the collector was determined to be 90–120°. The energy contribution of the concentrator was evaluated based on the direct and reflected solar radiation fluxes and their enhancement factor. It was established that the use of a mirror surface provides a solar flux enhancement factor ranging from 1.2 to 1.8, depending on the solar position and system orientation. Experimental results demonstrated the potential for additional solar energy input to the absorber of approximately 1.5–2.3 kWh per day per square meter of mirror surface, particularly during the morning and evening hours. The proposed approach can be applied to the graphical design, selection of installation angles, and improvement of solar dryer structures to enhance their energy efficiency.

DOI: 10.36910/acm.vi52.2360

To cite this article:
Korobka, S., Stukalets, I., Tolstushko, M. & Tolstushko, N. (2026). Graphical modeling of the angular parameters of a flat mirror concentrator for a solar dryer. *Agricultural Machines*, *52*, 261–274. https://doi.org/10.36910/acm.vi52.2360

e-ISSN 2708-9754; ISSN 2307-1699
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ, 2026, Вип. 52
AGRICULTURAL MACHINES, 2026, Vol. 52

УДК 631.3.45.9

ГРАФІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КУТОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПЛОСКОГО ДЗЕРКАЛЬНОГО КОНЦЕНТРАТОРА ГЕЛІОСУШАРКИ

С.В. Коробка[1*], І.Г. Стукалець[1], М.М. Толстушко[2], Н.О. Толстушко[2]

[1]Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Ґжицького, м. Львів, Україна
[2]Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
плоский дзеркальний концентратор,
геліосушарка,
сонячна енергія,
сонячне випромінювання,
кут нахилу,
графічне проектування,
закон відбиття.

Історія публікації:
Отримано 19.10.2026
Прорецензовано 26.10.2026
Затверджено до друку 30.10.2026

[*]***Автор для листування:***
korobkasv@ukr.net

АНОТАЦІЯ

У статті досліджено особливості інженерно-графічного визначення просторового положення плоского дзеркального концентратора для підвищення надходження сонячної енергії до повітряного колектора геліосушарки. Розглянуто конструкцію відбивної панелі площею 2,0 м² із габаритами 2,0 × 1,30 м та встановлено її геометричний зв'язок із приймальною поверхнею. На основі закону відбиття побудовано методику визначення напрямку відбитого променя залежно від висоти Сонця та взаємного розташування дзеркала і колектора. Розрахунки виконано для висоти Сонця 15–55°, відстані між відбивною та приймальною поверхнями 1,0 м і висоти колектора 1,5 м. Для заданих умов визначено діапазон раціональних значень двогранного кута між дзеркалом і колектором, який становить 90–120°. Оцінювання енергетичної дії концентратора проведено за величиною прямого та відбитого потоків сонячного випромінювання і коефіцієнтом їх підсилення. Встановлено, що використання дзеркальної поверхні забезпечує коефіцієнт підсилення сонячного потоку в межах 1,2–1,8 залежно від положення Сонця та орієнтації системи. Експериментальні результати показали можливість додаткового надходження до абсорбера близько 1,5–2,3 кВт·год сонячної енергії на добу з кожного квадратного метра дзеркальної поверхні, особливо у ранкові та вечірні години. Запропонований підхід може бути застосований для графічного проєктування, вибору монтажних кутів і вдосконалення конструкцій сонячних геліосушарок з метою підвищення їх енергетичної ефективності.

DOI: 10.36910/acm.vi52.2360

Цитувати цю статтю:
Коробка, С. В., Стукалець, І. Г., Толстушко, М. М. & Толстушко, Н. О. (2026). Графічне моделювання кутових параметрів плоского дзеркального концентратора геліосушарки. *Сільськогосподарські машини*, *52*, 261–274. https://doi.org/10.36910/acm.vi52.2360

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Необхідно розробити графічну методику визначення кутових параметрів плоского дзеркального концентратора для геліосушарки з урахуванням положення Сонця та геометричних розмірів теплоприймальної поверхні. Методика повинна забезпечувати можливість визначення кутів нахилу окремих дзеркальних елементів, побудови траєкторій сонячних променів та графічної перевірки їх потрапляння на теплоприймач. Результати такого проєктування можуть бути використані для розроблення робочих креслень концентратора та подальшого виготовлення його конструкції.

Одним із конструктивних способів підвищення надходження сонячної енергії є використання плоского дзеркального концентратора. У запропонованій конструкції передбачається використання дзеркальної панелі розміром 2,0 × 1,30 м, що забезпечує площу відбивної поверхні 2,0 м² (*Knaga J., 2017; Tatomyr A., 2017; Babych M., 2017; Korobka S.* 2017)

При сонячному опроміненні з густиною потоку, наприклад, 800 Вт/м², теоретична потужність сонячного випромінювання, що падає на дзеркало, становить:

$$P_s = GA = 800 \cdot 2{,}0 = 1600 \text{ Вт.}$$

За коефіцієнта відбиття дзеркальної поверхні ρ = 0,85 відбитий потік становитиме приблизно

$$P_r = 1600 \cdot 0{,}85 = 1360 \text{ Вт.}$$

Таким чином, дзеркальна поверхня площею 2,0 м² потенційно може спрямовувати до приймальної системи понад 1,3 кВт сонячної потужності за заданої інтенсивності випромінювання, без урахування оптичних, геометричних і теплових втрат.

Для ефективного використання цієї енергії необхідно правильно визначити геометричне положення дзеркального концентратора. Основними параметрами графічної моделі є: розмір дзеркала 2,0×1,30 м; відстань до приймальної поверхні L = 1,0 м; висота приймальної поверхні H = 1,5 м; ширина приймальної поверхні B = 0,8 м; кут висоти Сонця α = 15–55°; азимутальний кут A = 0–180°; кут нахилу дзеркала β = 20–70°.

Особливу увагу необхідно приділити зміні положення Сонця протягом дня. Наприклад, для розрахункової схеми можна прийняти три характерні положення Сонця: ранкове – α = 20°, денне – α = 45° та післяобіднє – α = 30°. За геометричного кута напрямку на приймальну поверхню γ = 20° відповідні кути положення дзеркала можуть бути визначені:

$$\beta_1 = \frac{20 + 20}{2} = 20^{\circ}; \quad (1)$$

$$\beta_2 = \frac{45 + 20}{2} = 32{,}5^{\circ}; \quad (2)$$

$$\beta_3 = \frac{30 + 20}{2} = 25^{\circ}. \quad (3)$$

Отримані значення показують, що протягом дня положення плоского дзеркального концентратора повинно змінюватися приблизно в межах 20–33° для забезпечення необхідного напрямку відбитого сонячного потоку в заданій геометричній схемі.

Графічне проєктування дозволяє наочно встановити взаємне положення сонячного променя, дзеркальної поверхні та приймальної поверхні, а також визначити кути падіння та відбиття. При цьому для кожного положення Сонця необхідно забезпечити виконання умови

$$\theta_1 = \theta_2.$$

На графічній моделі доцільно показати нормаль до дзеркальної поверхні, сонячний промінь, відбитий промінь, центр приймальної поверхні, відстань L = 1,0 м, висоту H = 1,5 м, кути α, β, γ, θ_1 та θ_2. Така побудова дозволяє перейти від загальної конструктивної схеми до визначення конкретного положення дзеркала та його регулювального механізму.

Тому, під час проєктування та визначення кутових параметрів плоского дзеркального концентратора розміром 2,0×1,30 м для спрямування сонячного випромінювання на приймальну поверхню геліосушарки з урахуванням зміни висоти Сонця в межах 15 – 55°.

Одним із основних елементів геліосушарки є сонячний колектор, конструктивні та теплотехнічні характеристики якого безпосередньо впливають на температуру теплоносія, швидкість сушіння та загальну ефективність установки, що наведено на **рис. 1**.

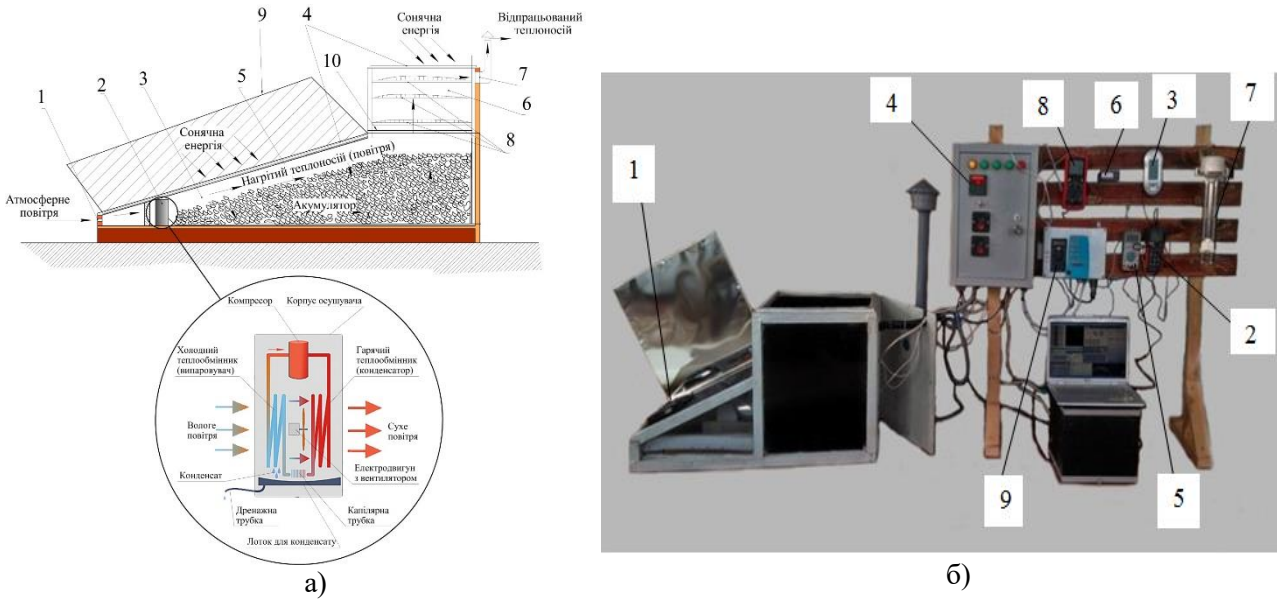


Рис. 1 – Конструкційно-технологічна схема геліосушарки з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором (а) і загальний вигляд дослідної установки (б): 1 – вхідний канал; 2 – волого осушувач теплоносія; 3 – повітропровід; 4 – повітряний колектор; 5 – теплоакумулюючий матеріал (ТАМ); 6 – сушильна камера; 7 – витяжний канал; 8 – решета; 9 – плоский дзеркальний концентратор; 10 – заслінка

У роботі (*Al-Obaidi M. A., 2025; Mahmood D. M. N., 2025; Rashid F. L. A, 2025*) систематизовано принципи роботи плоских повітряних сонячних колекторів, наведено підходи до їх енергетичного та ексергетичного аналізу, а також розглянуто різні конструктивні рішення для використання сонячної енергії під час сушіння.

За даними сучасних оглядових досліджень, одним із напрямів підвищення ефективності сонячних сушарок є вдосконалення конструкції сонячного колектора та збільшення кількості сонячної енергії, що надходить до теплоприймальної поверхні (*Duffie J. A., 2020; Beckman W. A., 2020; Blair N., 2020*). Зокрема, для малих і середніх сушильних установок перспективним є застосування додаткових дзеркальних поверхонь, які дають змогу спрямовувати сонячне випромінювання на колектор або теплоприймач. При цьому ефективність системи визначається не тільки оптичними властивостями дзеркала, але й геометричним взаємним розташуванням дзеркальних елементів та приймальної поверхні.

Особливий інтерес становлять плоскі дзеркальні концентратори**,** конструкція яких може бути реалізована на основі окремих плоских дзеркальних елементів. На відміну від параболічних концентраторів, така конструкція є технологічно простішою та може бути адаптована до невеликих геліосушильних установок. Основний принцип роботи концентратора полягає у зміні напрямку поширення сонячного випромінювання відповідно до закону відбиття. Загальні принципи проєктування концентрувальних сонячних колекторів та геометрії оптичних систем розглянуто у працях (*Kumar M., 2016; Sansaniwal S. K., 2016; Khatak P. 2016*).

Безпосередньо питання використання плоского дзеркального концентратора для сонячної сушарки досліджено у роботі (*Knaga J., 2017; Tatomyr A., 2017; Babych M., 2017; Korobka S.*). Авторами

запропоновано методику розрахунку геометричних параметрів плоского дзеркального концентратора сонячної енергії для геліосушарки. Результати цієї роботи підтверджують доцільність використання дзеркального концентратора для збільшення надходження сонячної енергії на теплоприймальну поверхню (*Ahmad Fudholi, 2018; Kamaruzzaman Sopian, 2018*).

Проте під час практичного проєктування такого концентратора виникає необхідність визначення кутових параметрів окремих дзеркальних елементів**.** Плоске дзеркало змінює напрямок відбитого променя відповідно до закону відбиття, тому кут його нахилу повинен бути узгоджений із напрямком падаючого сонячного випромінювання та положенням теплоприймальної поверхні (*Prayag Raj Chanda,2023; Bishal Podder, 2023; Agnimitra Biswas, 2023, Anal Ranjan Sengupta, 2023*). Таким чином, геометричне положення кожного дзеркального елемента є одним із визначальних факторів формування зони концентрації сонячного випромінювання.

Важливою особливістю сонячного концентратора є постійна зміна положення Сонця протягом доби та року. Внаслідок цього змінюються азимутальний і висотний кути сонячного випромінювання, а отже, і напрямок променів, які падають на дзеркальну поверхню. Для стаціонарного концентратора це створює необхідність вибору таких геометричних параметрів дзеркального поля, які забезпечували б прийнятне потрапляння відбитого випромінювання на теплоприймач у визначений період роботи (*Ahmad Fudholi, 2018; Kamaruzzaman Sopian, 2018*).

З геометричної точки зору напрямок нормалі до дзеркальної поверхні повинен відповідати бісектрисі кута між напрямком на Сонце та напрямком до теплоприймача. Саме це співвідношення може бути покладене в основу графічного визначення кутів нахилу окремих дзеркальних елементів. Використання графічного методу дає можливість безпосередньо на кресленні визначити траєкторії падаючих і відбитих променів та перевірити, чи потрапляють вони в межі приймальної поверхні (*Knaga J., 2017; Tatomyr A., 2017; Babych M., 2017; Korobka S.* 2017); (*Duffie J. A., 2020; Beckman W. A., 2020; Blair N., 2020*).

У сучасних дослідженнях сонячних сушарок значна увага приділяється температурному режиму, швидкості руху повітря, вологості, часу сушіння, енергетичному та ексергетичному ККД (Kamarulzaman A., *et al., 2021, Goel V. et al., 2024,* Nnamchi O. *et al., 2025, Al-Obaidi M. A. et al., 2025*). Водночас для невеликих геліосушильних установок важливим залишається завдання простого інженерного визначення геометричних і кутових параметрів плоского дзеркального концентратора на стадії графічного проєктування. Огляд сучасних робіт також показує, що вдосконалення геометрії сонячного колектора, сушильної камери та оптичної частини є одним із актуальних напрямів розвитку сонячних сушильних систем (*Ortiz-Rodríguez N. M. et al., 2025, Nnamchi O. et al., 2025*).

Таким чином, проблема дослідження полягає у необхідності встановлення геометричного взаємозв'язку між положенням Сонця, плоскими дзеркальними елементами концентратора та теплоприймальною поверхнею геліосушарки. Для її розв'язання доцільно застосувати методи інженерної графіки, які дозволяють побудувати схему концентратора, визначити напрямки падаючих і відбитих променів та встановити кути нахилу дзеркал.

Мета дослідження – полягає у графічному проєктуванні та визначенні кутових параметрів плоского дзеркального концентратора для геліосушарки з урахуванням геометричного взаємного розташування дзеркальних елементів, напрямку сонячного випромінювання та теплоприймальної поверхні.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання дослідження:

1. Встановити геометричний взаємозв'язок між напрямком падаючого сонячного променя, площиною плоского дзеркала та напрямком відбитого променя.
2. Розробити графічну схему плоского дзеркального концентратора із зазначенням основних геометричних параметрів.
3. Визначити кути нахилу окремих дзеркальних елементів відносно базової площини концентратора для забезпечення спрямування відбитого сонячного випромінювання на теплоприймальну поверхню.
4. Виконати графічну побудову траєкторій падаючих та відбитих сонячних променів для заданого положення Сонця.
5. Дослідити вплив зміни кута положення Сонця на необхідні кути орієнтації плоских дзеркальних елементів.

6. Визначити геометричні параметри зони потрапляння відбитого випромінювання на теплоприймальну поверхню геліосушарки.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Визначення оптимального значення двогранного кута між площиною плоского дзеркала та поверхнею сонячного колектора є важливою геометричною задачею під час проєктування систем концентрації сонячного випромінювання. Величина цього кута безпосередньо впливає на напрямок поширення відбитих променів, положення області їхнього перетину з поверхнею колектора та ефективність використання апертури дзеркала. Основною метою такого геометричного аналізу є встановлення такого положення дзеркальної поверхні відносно колектора, за якого максимально можлива частина відбитого сонячного потоку потрапляє на приймальну поверхню. При цьому необхідно враховувати не тільки кут падіння сонячних променів, але й геометричні розміри дзеркала та колектора, а також відстань між їхніми площинами. Для оцінювання ефективності взаємного розташування дзеркала і колектора доцільно визначити межі області, на яку проектується відбите сонячне випромінювання. Цю область можна умовно назвати «сонячним зайчиком». У математичному представленні її положення визначається рівняннями крайових променів, які після відбиття від дзеркала перетинають площину колектора. Аналіз крайових променів дає змогу встановити координати характерних точок освітленої області та визначити, чи повністю відбитий потік охоплює приймальну поверхню колектора. Оскільки більшість практичних конструкцій плоских сонячних колекторів мають прямокутну форму, для інженерних розрахунків немає необхідності щоразу визначати складні рівняння всіх меж освітленої області. Значно зручніше використовувати координати крайніх, або габаритних, точок проєкції відбитого потоку на поверхню колектора. За їх допомогою можна встановити ширину та положення «сонячного зайчика», а також оцінити ступінь перекриття відбитим потоком апертури колектора. Такий підхід спрощує подальші розрахунки та є зручним для графічного проєктування геометрії концентратора.

У загальному випадку математичний опис траєкторій падаючих і відбитих променів може мати досить складний вигляд, оскільки положення Сонця змінюється протягом доби та року. Крім того, на геометрію потоку впливають азимутальний і висотний кути Сонця, орієнтація колектора, нахил дзеркала та співвідношення їхніх поперечних розмірів. Тому для практичного інженерного проєктування доцільно розглядати найбільш характерні розрахункові випадки, які дають змогу встановити загальні закономірності формування відбитого потоку без надмірного ускладнення математичної моделі.

Одним із таких випадків є конструкція, у якій ширина дзеркала та поперечний розмір приймальної поверхні колектора є однаковими або близькими за величиною. За такої конфігурації дзеркальний концентратор і колектор можуть бути розташовані відносно один одного під певним кутом (α), величина якого визначає напрямок відбитого сонячного потоку. Зміна кута (α) призводить до зміни положення області концентрації на поверхні колектора. Отже, існує певний діапазон кутів, за якого відбиті промені залишаються в межах апертури приймальної поверхні.

Плоске дзеркало доцільно встановлювати безпосередньо біля приймальної поверхні колектора або на мінімально можливій відстані від неї. Таке конструктивне рішення дає змогу зменшити габарити системи, спростити її монтаж та забезпечити компактність дзеркально-колекторного вузла. При цьому дзеркальна поверхня встановлюється під кутом (α) до площини колектора. Оптимальне значення цього кута визначається не лише положенням Сонця, а й співвідношенням поперечних розмірів апертури колектора ($S_{пк}$) та дзеркала (L).

Якщо ширина дзеркала перевищує ширину приймальної поверхні, збільшується кількість сонячного випромінювання, яке потенційно може бути спрямоване на колектор, однак одночасно підвищуються вимоги до точності його орієнтації. У разі, коли дзеркало має меншу апертуру порівняно з колектором, частина приймальної поверхні залишається невикористаною для приймання відбитого потоку. Тому співвідношення ($S_{пк}/L$) є одним із основних геометричних параметрів, які необхідно враховувати під час вибору кута встановлення дзеркала.

За умови добового або сезонного слідкування за положенням Сонця геометрична картина проходження сонячних променів через систему «дзеркало–колектор» змінюється відповідно до поточного кута падіння випромінювання. У цьому випадку падаючі сонячні промені можна вважати

практично паралельними між собою, оскільки відстань від Сонця до Землі значно перевищує розміри установки. Після взаємодії з дзеркальною поверхнею напрямок кожного променя змінюється відповідно до закону дзеркального відбиття: кут падіння променя відносно нормалі до дзеркала дорівнює куту його відбиття.

Застосування системи слідкування за Сонцем дає можливість підтримувати сприятливу геометричну орієнтацію дзеркала протягом значної частини світлового дня. У такому випадку відбитий потік можна цілеспрямовано спрямовувати на приймальну поверхню колектора, зменшуючи втрати сонячної енергії через вихід частини променів за межі апертури. Геометрія відбиття при цьому визначається взаємним положенням нормалі до дзеркала, напрямком падаючого сонячного випромінювання та площиною колектора.

З конструктивної точки зору плоский дзеркальний концентратор може бути встановлений з будь-якого боку колектора – зверху, знизу або з бокової сторони, залежно від особливостей конкретної установки. Вибір положення визначається доступним простором, способом кріплення, напрямком сонячного випромінювання та необхідністю забезпечення вільного проходження повітряного потоку. Для геліосушарки особливо важливо, щоб дзеркало не створювало додаткового аеродинамічного опору та не перешкоджало надходженню нагрітого повітря до зони сушіння.

Таким чином, геометричне проєктування плоского дзеркального концентратора передбачає визначення взаємозв'язку між кутом встановлення дзеркала (α), кутом падіння сонячного випромінювання, шириною дзеркала (L) та апертурою колектора ($S_{пк}$). Визначення координат крайніх променів і габаритних точок «сонячного зайчика» дає змогу оцінити відповідність відбитого потоку приймальній поверхні. На основі цього підходу можна обґрунтувати оптимальне положення дзеркала та визначити такі геометричні параметри концентратора, за яких забезпечується максимальне використання відбитого сонячного випромінювання для нагрівання повітря в геліосушарці. Тому, для графічного проєктування плоского дзеркального концентратора прийнято конструктивну схему на **рис. 2**, у якій сонячне випромінювання відбивається від плоского дзеркального елемента і спрямовується на теплоприймальну поверхню геліосушарки.

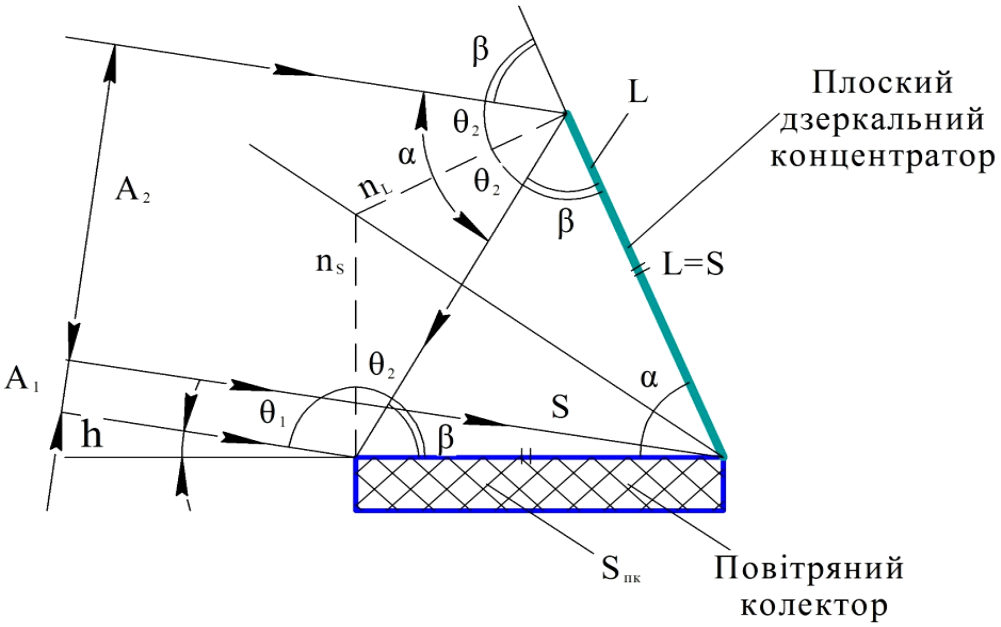


Рис. 2 – Геометрична схема відбиття променів від плоского дзеркала на колектор

Геометрична схема концентратора характеризується сукупністю параметрів, які визначають взаємне розташування плоского дзеркала, колектора та напрямок поширення сонячного випромінювання. Величини (L) і (S) відповідають ширині дзеркала та колектора і визначають їхні геометричні розміри в площині поперечного перерізу концентратора. Кут (α) характеризує розкриття

концентратора та визначає просторову орієнтацію дзеркальної поверхні відносно колектора. Площі (A_1) і (A_2) описують відповідно поперечні перерізи прямого сонячного потоку, що падає на дзеркало, та відбитого потоку, спрямованого в бік колектора. Нормалі (nS) і (nL) є перпендикулярами до площин колектора (S) та дзеркала (L) і використовуються як базові напрямки для визначення кутових характеристик падіння та відбиття променів. Кути (θ_1) і (θ_2) характеризують напрямок падіння сонячного випромінювання відповідно на колектор і дзеркальну поверхню та визначають взаємну орієнтацію променів і нормалей до відповідних поверхонь. Кут (h) визначає кут ковзання променів відносно поверхні, тобто характеризує відхилення напрямку поширення сонячного випромінювання від дотичного напрямку до дзеркала або колектора. Кут (β) характеризує геометрію відбивання променів від дзеркальної поверхні та, відповідно до закону відбиття, визначається співвідношенням між напрямками падаючого й відбитого променів і нормаллю до дзеркала.

За умови рівномірного освітлення поверхні колектора відбитими сонячними променями необхідно забезпечити однаковий напрямок їх надходження до робочої площини. У межах методу геометричної оптики траєкторія кожного променя визначається законом відбиття, відповідно до якого кут падіння променя дорівнює куту його відбиття. Відбитий промінь у прийнятій геометричній побудові є основою рівнобедреного трикутника, що дає змогу встановити взаємозв'язок між геометричними параметрами дзеркала та колектора. Таким чином, положення плоского дзеркала відносно поверхні колектора визначається кутом нахилу дзеркала та кутом падіння сонячного променя. На **рис. 2** наведено геометричну схему, за якою можна графічно визначити напрямок поширення падаючого та відбитого променів. З отриманої побудови випливають співвідношення між кутом падіння α, кутом відбиття та кутом нахилу дзеркальної поверхні. Зміна кута нахилу дзеркала призводить до відповідної зміни напряму відбитого променя, що безпосередньо впливає на положення світлової плями на поверхні колектора. Тому графічне визначення зазначених кутових параметрів є важливим етапом проєктування плоского дзеркального концентратора та забезпечення максимально рівномірного розподілу сонячного випромінювання по поверхні геліосушарки.

$$\left.\begin{aligned} &\beta = 90° - \frac{\alpha}{2}, \\ &\theta_2 = 90° - \beta = \frac{\alpha}{2}, \\ &h + \beta = \alpha \text{ або } h = \alpha - \beta = \alpha - 90° + \frac{\alpha}{2} = \frac{3}{2}\alpha - 90°, \\ &\theta_1 = 90° - h = 90° - \frac{3}{2}\alpha + 90° = 180° - \frac{3}{2}\alpha. \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

Кут ковзання змінюється в межах ($0<h<90^{o}$), що відповідає зміні просторового положення відбитого сонячного променя відносно поверхні колектора. При цьому зміна величини кута (h) безпосередньо впливає на напрямок поширення відбитого променя та область освітлення робочої поверхні. Для забезпечення попадання відбитого випромінювання в межі колектора необхідно встановити допустиме значення кута розкриття дзеркального концентратора. Тоді верхня межа кута розкриття визначиться з наведеної нижче нерівності:

$$h = \frac{3}{2}\alpha - 90° < 90° \text{ або } \alpha < 120°.$$

Натомість нижня межа кута розкриття (α) приймається рівною (60^{o}), оскільки за менших значень відбитий крайній сонячний промінь зміщується вправо відносно краю поверхні колектора. У такому випадку частина сонячного випромінювання не потрапляє на робочу поверхню колектора, що призводить до зменшення ефективності використання сонячної енергії. Отже, для забезпечення повного потрапляння відбитих променів на поверхню колектора необхідно дотримуватися

встановленого мінімального значення кута розкриття. Тому величина кута розкриття (α) не виходить за межі визначеного інтервалу:

$$60° < \alpha < 120°.$$

Коефіцієнт підсилення потоку характеризує ступінь збільшення енергетичної освітленості поверхні колектора внаслідок додаткового надходження сонячного випромінювання, відбитого плоским дзеркалом. Його величина визначається як відношення сумарної енергетичної освітленості колектора (E), яка складається з освітленості прямими та відбитими променями, до освітленості (E_1), створюваної лише прямим сонячним випромінюванням. Сумарна освітленість колектора визначається як ($E=E_1+E_2$), де (E_1) – енергетична освітленість від прямого сонячного потоку, а (E_2) – додаткова освітленість, сформована відбитим від дзеркала потоком. Величини (E_1) та (E_2) безпосередньо залежать від відповідних площ поперечних перерізів вхідного прямого та відбитого потоків сонячного випромінювання (A_1) і (A_2). За однакової інтенсивності падаючого сонячного випромінювання співвідношення між цими освітленостями може бути визначене через відношення відповідних площ. Таким чином, коефіцієнт підсилення потоку дає змогу кількісно оцінити ефект застосування плоского дзеркального концентратора в геліосушарці. Чим більша частка відбитого випромінювання потрапляє безпосередньо на поверхню колектора, тим вищим є значення коефіцієнта підсилення. Для його визначення спочатку розраховують (E_1) і (E_2) через відповідні площі (A_1) та (A_2), після чого отримані величини підставляють у співвідношення:

$$E_1=A_1\cos\theta_1;\ E_2=\rho A_2\cos\theta_2,$$

де ρ – коефіцієнт відбивання дзеркала, ρ=0,8 [6].

Звідси, з урахуванням наведених вище співвідношень між енергетичною освітленістю та площами відповідних перерізів сонячних потоків, коефіцієнт підсилення потоку можна визначити через відношення площі відбитого потоку до площі прямого потоку. Отриманий вираз дає змогу оцінити величину додаткового надходження сонячної енергії на поверхню колектора та визначити ефективність використання плоского дзеркального концентратора:

$$k=\frac{A_1\cos\theta_1+\rho A_2\cos\theta_2}{A_1\cos\theta_1}=1+\rho\frac{A_2\cos\theta_2}{A_1\cos\theta_1}.$$

Обидва перерізи (A_1) та (A_2) є функціями кута розкриття концентратора (α), оскільки зміна цього кута безпосередньо впливає на геометричне положення дзеркальної поверхні та напрямок відбитого сонячного потоку. При зміні (α) змінюється площа поперечного перерізу як прямого, так і відбитого потоку, що потрапляє на поверхню колектора. Відповідно, коефіцієнт підсилення потоку також залежить від кута розкриття та може бути представлений як функція ($k=k(\alpha)$). Визначення цієї залежності дає змогу встановити оптимальне значення кута розкриття, за якого забезпечується найбільш ефективне використання відбитого сонячного випромінювання. Отже, залежності площ ($A_1(\alpha)$) та ($A_2(\alpha)$) є основою для подальшого розрахунку коефіцієнта підсилення потоку:

$$A_1=S\cdot\sinh=L\cdot\sin\left(\frac{3}{2}\alpha-90°\right)=$$
$$=-L\cdot\sin\left(90°-\frac{3}{2}\alpha\right)=-L\cos\frac{3}{2}\alpha, \quad (5)$$

$$A_2=L\cdot\sin(\alpha-h)=L\cdot\sin\left[\alpha-\left(\frac{3}{2}\alpha-90°\right)\right]=$$
$$=L\cdot\sin\left(90°-\frac{\alpha}{2}\right)=L\cdot\cos\frac{\alpha}{2}. \quad (6)$$

Після підстановки отриманих залежностей площ ($A_1(\alpha)$) та ($A_2(\alpha)$) у вираз для коефіцієнта підсилення потоку та відповідного скорочення спільних множників проведемо елементарні тригонометричні перетворення. У результаті залежність між геометричними параметрами концентратора та інтенсивністю надходження сонячного випромінювання набуває більш компактного вигляду. Отриманий вираз дає змогу безпосередньо визначити вплив кута розкриття (α) на ступінь концентрації сонячної енергії. Таким чином, після скорочення та елементарних тригонометричних перетворень отримаємо вираз для коефіцієнта концентрації сонячної енергії:

$$k = 1 + \rho \frac{A_2 \cos\frac{\alpha}{2}}{A_1 \cos\left(180° - \frac{3}{2}\alpha\right)} = 1 + \rho \frac{\cos^2\frac{\alpha}{2}}{\cos^2\frac{3}{2}\alpha}. \quad (7)$$

Визначення режиму надходження сонячного випромінювання необхідно враховувати просторову орієнтацію приймальної поверхні колектора відносно Сонця. Якщо колектор встановлено горизонтально, кут ковзання відбитого променя визначається положенням Сонця над лінією горизонту та пов'язаний із його зенітною висотою. При зміні положення Сонця протягом доби цей кут безперервно змінюється, що зумовлює відповідну зміну напряму потоку випромінювання. У разі встановлення колектора під певним кутом до горизонту необхідно додатково враховувати нахил його сприймаючої поверхні. Для колектора, орієнтованого у південному напрямку, геометричні параметри освітлення визначаються відносно площини самого колектора. У таких умовах для розрахунку зручніше використовувати кут освітлення (θ_l), який характеризує положення сонячних променів відносно приймальної поверхні та визначається за співвідношенням (5). Визначене значення (θ_l) використовується надалі для встановлення величини сонячної освітленості поверхні ПК з урахуванням як прямої, так і відбитої складових випромінювання. Хід зміни освітленості ПК від сумарного прямого та відбитого сонячного потоку визначаємо за відповідною розрахунковою формулою

$$E_\beta(\tau) \simeq k(\tau) \cdot R_\beta \cdot E^{\max} \cos\pi\frac{\tau}{\tau_c}. \quad (8)$$

У наведеному співвідношенні (t) характеризує час, відрахований від моменту сонячного полудня, і вимірюється в годинах. Параметр (R_β) є коефіцієнтом середньомісячного надходження сонячного випромінювання на поверхню, орієнтовану під кутом (β), та визначається на основі табличних значень середньомісячного азимутального кута заходу Сонця (*Kumar M., et al.,* 2016). Величина (E^{max}) відповідає максимальному значенню енергетичної освітленості горизонтальної поверхні повітряного колектора та вимірюється у Вт/м². Параметр (τ_c) характеризує тривалість надходження сонячної енергії протягом розрахункового періоду та виражається в секундах. Коефіцієнт (τ) визначає здатність системи пропускати сонячне випромінювання через відповідні конструктивні елементи. Його величина залежить від оптичних властивостей матеріалів, які використовуються у конструкції колектора. Сукупність зазначених параметрів дає змогу врахувати часові, геометричні та оптичні фактори, що впливають на величину сонячної освітленості. Таким чином, наведені позначення формують основу для подальшого визначення сумарного енергетичного потоку, що надходить на поверхню колектора протягом добового циклу.

Основною умовою проєктування є забезпечення потрапляння відбитих сонячних променів у межі заданої теплоприймальної поверхні. Для виконання графічних побудов прийнято такі вихідні геометричні параметри:

довжина дзеркального поля – 2,0 м;

ширина одного дзеркального елемента – 1,30 м;

кількість дзеркальних елементів – 2 шт.;

відстань між колектором та дзеркалами – 0,05 м.

Загальна ширина дзеркального поля визначається як сума ширини двох дзеркальних елементів та шести проміжків між ними:

$$B=n\cdot b+(n-1)\cdot s, \quad (9)$$

де n=2 – кількість дзеркал; b=1,30 м – ширина одного дзеркала; s=0,05 м – відстань між колектором та дзеркалами. Тоді

$$B=2\cdot1,30+(2-1)\cdot0,05=2,6+0,05=2,65 \text{ м.}$$

Отже, загальна ширина дзеркального поля становить 2,65 м.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

У результаті проведених досліджень визначено основні закономірності впливу геометричних параметрів і просторового положення досліджуваного об'єкта на ефективність використання сонячної енергії. Особливу увагу приділено аналізу конструктивних характеристик, обґрунтуванню вибору розрахункових параметрів і встановленню взаємозв'язку між геометричними особливостями системи та її енергетичними показниками. Отримані результати створюють передумови для подальшого вдосконалення конструкції та підвищення ефективності використання сонячної енергії.

Тому, теплоприймальну поверхню розташовано на відстані 0,05 м від умовної базової лінії дзеркального поля. Для графічного проєктування прийнято теплоприймач шириною 1,0 м. Таке співвідношення геометричних розмірів дає змогу наочно дослідити зміну напрямку відбитих променів залежно від положення окремих дзеркальних елементів.

Відповідно до закону відбиття сонячного випромінювання кут падіння променя на дзеркальну поверхню дорівнює куту його відбиття. Для спрямування відбитого променя в задану точку теплоприймача нормаль до дзеркальної поверхні повинна розташовуватися приблизно по бісектрисі кута між напрямком падаючого променя та напрямком від дзеркала до точки приймання випромінювання. Ця геометрична залежність є основою запропонованої графічної методики.

Для спрощеного розрахункового випадку прийнято висоту Сонця над горизонтом (30º). При цьому напрямок падаючого сонячного випромінювання утворює з горизонтальною площиною кут (30º). Для кожного дзеркального елемента графічно побудовано напрямок падаючого променя та напрямок відбитого променя до відповідної точки теплоприймача.

Залежно від положення дзеркального елемента відносно теплоприймача кути його нахилу повинні відрізнятися. У центральній частині дзеркального поля необхідний кут нахилу є меншим, тоді як для крайніх дзеркал він збільшується. У результаті формується віялоподібна система відбитих променів, яка забезпечує їх спрямування в область теплоприймальної поверхні.

Для графічного проєктування прийнято сім дзеркальних елементів із такими умовними координатами по горизонталі: -0,90; -0,60; -0,30; 0; +0,30; +0,60 та +0,90 м. Відповідно до положення кожного елемента визначено індивідуальний напрямок відбитого променя.

Таблиця 1 – Розрахункові геометричні параметри дзеркальних елементів

Параметри	Показники											
α	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
H	7,5	15	22,5	30	37,5	45	52,5	60	67,5	75	82,5	90
θ_1	82,5	75	67,5	60	52,5	45	37,5	30	22,5	15	7,5	0
k	8,45	6,00	4,44	2,88	2,16	1,8	1,58	1,44	1,35	1,28	1,23	1,20

Наведені значення використовуються, як розрахункова геометрична модель для виконання креслення та демонстрації принципу формування концентрованого потоку. У реальній конструкції конкретні кути повинні уточнюватися залежно від географічного положення установки, дати та часу роботи, висоти Сонця, азимуту та фактичних координат теплоприймача і встановлюватися під кутом α.

Аналіз отриманої геометричної схеми (**рис. 2**) показує, що зміна положення дзеркала безпосередньо впливає на координати точки перетину відбитого променя з теплоприймальною

поверхнею. Тому для забезпечення стабільного надходження теплової енергії необхідно враховувати допустимий діапазон зміни кутів орієнтації дзеркала.

Для оцінювання чутливості системи проведено аналіз при зміні висоти Сонця від (20º) до (50º). Зі збільшенням висоти Сонця напрямок падаючого випромінювання змінюється, що потребує відповідного коригування положення дзеркального елемента. Для стаціонарної конструкції це означає, що один фіксований набір кутів не може забезпечувати однаково оптимальне спрямування випромінювання протягом усього світлового дня та року.

Таблиця 2 – Вплив висоти Сонця на кутову орієнтацію центрального дзеркала

Висота Сонця, °	Орієнтовний кут нахилу дзеркала, °	Характеристика
20	29	Низьке положення Сонця
30	34	Базовий розрахунковий режим
40	39	Середня висота Сонця
50	44	Високе положення Сонця

Таким чином, при збільшенні висоти Сонця на (30º) орієнтовний кут нахилу дзеркала змінюється приблизно на (15º). Це підтверджує необхідність врахування добової зміни положення Сонця під час проєктування дзеркального концентратора.

Розроблена графічна схема **рис. 2** може бути використана не тільки для визначення кутів нахилу дзеркала, але й для встановлення їх просторового положення, перевірки взаємного перекриття дзеркального елемента та визначення зони концентрації сонячного випромінювання тепло сприймаючої поверхні. Це особливо важливо для малогабаритних геліосушарок, де конструкція повинна залишатися технологічно простою та доступною для виготовлення.

Отримані результати свідчать, що використання методів інженерної графіки дозволяє безпосередньо пов'язати геометричні параметри конструкції з оптичним принципом відбиття сонячного випромінювання. Запропонований підхід створює основу для розроблення робочого креслення плоского дзеркального концентратора та подальшого експериментального дослідження його теплотехнічних характеристик.

Тому, застосування плоского дзеркального концентратора (ПДК) у складі геліосушарки потребує підвищеної точності просторової орієнтації приймального колектора відносно напрямку сонячного випромінювання. Ефективність використання дзеркальної концентрації підтверджується результатами досліджень фотомодулів, для яких зі збільшенням вхідної енергетичної освітленості спостерігається відповідне зростання фотоструму та коефіцієнта корисної дії на 38–59 % (*Al-Obaidi M. A et al.,* 2025)

Однією з характерних особливостей запропонованого ПДК є його здатність до спектрального розділення сонячного випромінювання. Завдяки цьому дзеркальна система може виконувати функцію вузькосмугового оптичного фільтра з одночасним спрямуванням окремих спектральних складових у задані області установки. Видиму частину сонячного спектра можна концентрувати на відповідній поверхні, тоді як довгохвильову, або теплову, складову спрямовувати безпосередньо до абсорбера повітряного колектора. Такий принцип організації сонячного потоку розширює функціональні можливості ПДК порівняно з традиційними конструкціями концентраторів. Застосування запропонованої системи орієнтації також дає змогу відмовитися від складного механізованого приводу безперервного стеження за Сонцем. Замість цього положення робочих елементів може визначатися за допомогою системи градусних координат, що враховує зміну положення Сонця протягом світлового дня. Для вибору необхідних положень дзеркальних елементів доцільно використовувати значення коефіцієнта підсилення сонячного потоку k, визначені для відповідних геометричних режимів роботи.

Результати розрахунків можуть бути нанесені на голографічну плівку або інший градуйований елемент, що спрощує практичне встановлення необхідного положення концентратора. Енергетичну ефективність ПДК доцільно оцінювати за величиною додаткової освітленості, яка формується на горизонтальній поверхні повітряного колектора внаслідок надходження відбитого сонячного випромінювання. Запропоновані аналітичні залежності (4)–(9) дають можливість визначати основні енергетичні показники системи для різних азимутальних положень її елементів. Отримані залежності можуть бути використані для вибору раціональної геометрії концентратора та встановлення відповідного режиму його орієнтації. Встановлено, що за співвідношення ширини дзеркала і приймальної поверхні $L = S$ приріст енергетичної освітленості може забезпечуватися без значного

ускладнення конструкції. Для такого співвідношення характерним є діапазон кутів нахилу від 90 до 120° та відповідні значення коефіцієнта підсилення потоку k від 1,8 до 1,2.

Водночас для повної оцінки отриманого енергетичного ефекту необхідно враховувати реальну конструктивно-технологічну схему ПДК, оскільки взаємне розташування дзеркала, колектора та абсорбера безпосередньо впливає на результуючі характеристики системи. Відсутність детально представленої конструктивної схеми у попередніх дослідженнях обмежує можливість безпосереднього зіставлення розрахункових та фактичних енергетичних показників геліосушарки. Використання ПДК особливо перспективне в ранкові та вечірні години, коли висота Сонця над горизонтом є відносно малою, а безпосереднє надходження сонячної енергії на колектор зменшується.

За наведеними даними, застосування дзеркальної системи дає можливість підвищити середньорічну потужність сонячного випромінювання, що надходить на поверхню повітряного колектора, до величини близько 3,41 кВт/м² за світловий день. У результаті використання 1 м² площі ПДК на поверхню абсорбера повітряного колектора може бути додатково спрямовано приблизно 1,5–2,3 кВт·год сонячної енергії за добу.

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто графічне проєктування кутових параметрів плоского дзеркального концентратора для підвищення ефективності використання сонячної енергії в геліосушарці. На основі законів геометричної оптики встановлено взаємозв'язок між положенням Сонця, орієнтацією дзеркальної поверхні та теплоприймальною поверхнею колектора.

Запропоновано конструктивну схему плоского дзеркального концентратора з розмірами дзеркального поля 2,0 × 1,30 м та площею відбивної поверхні близько 2,0 м². За інтенсивності сонячного випромінювання 800 Вт/м² теоретична потужність випромінювання, що надходить на дзеркальну поверхню, становить 1,6 кВт, а за коефіцієнта відбиття ρ = 0,85 потенційно може бути спрямовано до теплоприймальної системи близько 1,36 кВт. Це підтверджує можливість використання плоскої дзеркальної поверхні, як додаткового елемента концентрації сонячного випромінювання.

Встановлено, що основним геометричним принципом орієнтації дзеркала є рівність кутів падіння та відбиття. Для спрямування відбитого променя в задану точку теплоприймача нормаль до дзеркальної поверхні повинна розташовуватися по бісектрисі кута між напрямком падаючого сонячного променя та напрямком на приймальну поверхню. Це положення покладено в основу запропонованої графічної методики визначення кутів орієнтації дзеркальних елементів.

Графічний аналіз показав, що зміна висоти Сонця безпосередньо впливає на необхідний кут нахилу дзеркала. Для прийнятої розрахункової схеми при зміні висоти Сонця від 20 до 50° орієнтовний кут нахилу дзеркала змінюється від 65 до 125°. Отже, для забезпечення стабільного спрямування відбитого випромінювання на теплоприймальну поверхню необхідно передбачити можливість регулювання положення дзеркал або обмежити розрахунковий період їх ефективної роботи.

Визначення положення крайніх променів та координат «сонячного зайчика» дає можливість графічно оцінити ступінь перекриття теплоприймальної поверхні відбитим потоком. Запропонований підхід дозволяє визначати положення окремих дзеркальних елементів, контролювати траєкторії падаючих і відбитих променів та встановлювати геометричні параметри зони концентрації без застосування складних числових моделей.

Проведений аналіз підтверджує доцільність використання методів інженерної графіки для проєктування плоского дзеркального концентратора геліосушарки. Розроблена геометрична модель може бути використана, як основа для виконання робочих креслень, вибору конструктивних параметрів і розроблення механізму регулювання положення дзеркал. Подальші дослідження доцільно спрямувати на уточнення кутових параметрів з урахуванням азимутального положення Сонця, географічного розташування установки, сезонних змін сонячної висоти, оптичних втрат та експериментального визначення теплового ефекту від застосування дзеркального концентратора.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

Knaga J., Tatomyr A., Babych M., Korobka S. Substantiation of the effectiveness of using a flat mirror concentrator in the solar dryer. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6, No. 8 (90). P. 47–53. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.112206.

Kamarulzaman A., Hasanuzzaman M., Rahim N. A. Global advancement of solar drying technologies and its future prospects: A review. Solar Energy. 2021. Vol. 221. P. 559–582. DOI: 10.1016/j.solener.2021.04.056.

Goel V., Dwivedi A., Mehra K. S., Pathak S. K., Tyagi V. V., Bhattacharyya S., Pandey A. K. Solar drying systems for Domestic/Industrial Purposes: A State-of-Art review on topical progress and feasibility assessments. Solar Energy. 2024. Vol. 267. Article 112210. DOI: 10.1016/j.solener.2023.112210.

Ortiz-Rodríguez N. M., Condorí M., Durán G., García-Valladares O. Solar drying Technologies: A review and future research directions with a focus on agroindustrial applications in medium and large scale. Applied Thermal Engineering. 2022. Vol. 215. Article 118993. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118993.

Nnamchi O., Tom C., Akpan G., et al. Solar dryers: A review of mechanism, methods and critical analysis of transport models applicable in solar drying of product. Green Energy and Resources. 2025. Vol. 3, No. 2. Article 100118. DOI: 10.1016/j.gerr.2025.100118.

Al-Obaidi M. A., Mahmood D. M. N., Rashid F. L. A Comprehensive Review of Advanced Solar Drying Technologies: Concentrators, Optical Enhancements, and Thermal Energy Storage Systems. Emerging Trends in Engineering and Sustainability. 2025. DOI: 10.65505/ETES-25-0018.

Duffie J. A., Beckman W. A., Blair N. Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind. Chapter 7: Concentrating Collectors. 5th ed. Wiley, 2020. DOI: 10.1002/9781119540328.ch7.

Kumar M., Sansaniwal S. K., Khatak P. Progress in solar dryers for drying various commodities: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 55. P. 346–360.

A review of solar air flat plate collector for drying application. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 102. P. 333–345. DOI: 10.1016/j.rser.2018.12.032.

Advancements in solar assisted drying technologies: A comprehensive review post 2017. Journal of Stored Products Research. 2023. Vol. 104. Article 102190. DOI: 10.1016/j.jspr.2023.102190.