

УДК 631.364:621.311.243

С.В. Коробка¹, І.Г. Стукалець¹, Н.О. Толстушко², М.М. Толстушко²Львівський національний аграрний університет¹Луцький національний технічний університет²**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КОНСТРУКЦІЇ ПЛОСКОГО ДЗЕРКАЛЬНОГО КОНЦЕНТРАТОРА ДЛЯ ПОТОКУ СОНЯЧНИХ ПРОМЕНІВ**

В статті подано методику розрахунку геометричних параметрів плоского дзеркального концентратора для потоку сонячних променів. Отримано аналітичні залежності для обґрунтування ефективності використання плоского дзеркального концентратора при різних азимутальних кутах орієнтації параметрів горизонтальної сприймальної поверхні повітряного колектора щодо інтенсивності надходження сонячних променів. Наведено результати експериментальних досліджень для встановлення енергетичних параметрів роботи дзеркального концентратора в комплекті з повітряним колектором.

Ключові слова: сонячна енергія, геліосушарка фруктів, дзеркальний концентратор, сприймальна поверхня, повітряний колектор.

С.В. Коробка, И.Г. Стукалец, Н.А. Толстушко, Н.Н. Толстушко

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ ПЛОСКОГО ЗЕРКАЛЬНОГО КОНЦЕНТРАТОРА ДЛЯ ПОТОКА СОЛНЕЧНЫХ ЛУЧЕЙ

В статье представлена методика расчета геометрических параметров плоского зеркального концентратора для потока солнечных лучей. Получены зависимости для обоснования эффективности использования зеркального плоского концентратора при различных азимутальных углах ориентации параметров горизонтальной восприимчивой поверхности воздушного коллектора относительно интенсивности поступления солнечных лучей. Представлены результаты экспериментальных исследований для определения энергетических параметров работы зеркального концентратора в комплекте с воздушным коллектором.

Ключевые слова: солнечная энергия, гелиосушилка фруктов, зеркальный концентратор, восприимчивая поверхность, воздушный коллектор.

S.V. Korobka, I.H. Stukalets, N.O. Tolstushko, M.M. Tolstushko

JUSTIFICATION OF THE DESIGN PARAMETERS OF A FLAT MIRROR CONCENTRATOR FOR THE FLOW OF SUNLIGHT

In today's world, alternative sources are increasingly being used to replace scarce traditional energy sources (electric or thermal). One such source is solar energy, which can be used to produce electricity or low-potential heat, in particular for drying wet materials of plant origin. The article presents a method for calculating the geometric parameters of a flat mirror concentrator of solar energy. Analytical dependences for substantiation of efficiency of application of a flat mirror concentrator for various azimuthal angles of orientation of parameters of a horizontal receiving surface of an air collector concerning intensity of solar beams are received. The results of experimental researches of energy characteristics of work of a mirror concentrator complete with an air collector are resulted.

Key words: solar energy, solar fruit dryer, mirror concentrator, receptive surface, air collector.

Постановка проблеми. Будь-яку освітлену Сонцем поверхню можна вважати приймачем сонячної енергії які прийнято поділяти на активні й пасивні. Перші допускають керування процесом сприйняття і наступного перерозподілу енергетичних потоків, а другі – лише можливість зменшення падаючого потоку, наприклад шляхом затінення або просторового орієнтування. Кількість сонячної енергії найперше залежать від освітлення прямими сонячними променями, бо їх внесок у загальний потік найбільший.

Усі приймачі сонячної енергії можна розглядати як площини певної орієнтації відносно Сонця та наземних орієнтирів, заданої кутовими відхиленнями відносно площини горизонту H , зеніту Z , сторін світу NS та EW і напряму на Сонце, які схематично наведені на рис. 1.

Тут z і n – нормалі до горизонтальної площини H та сприймаючої поверхні S ; n_H – проекція нормалі n на горизонтальну площину H ; θ – кут падіння променів на сприймаючу поверхню; θ_z – зенітний кут Сонця; γ – азимутальний кут сприймаючої площини, який чисельно рівний куту між меридіальним напрямком NS і проекцією нормалі сприймаючої поверхні на площину горизонту n_H . При відхиленні на схід $\gamma < 0$, а на захід $-\gamma > 0$.

У сонячній енергетиці та інших прикладних дисциплінах типовими є площини з такими орієнтаційними параметрами:

– горизонтальна площина: $\beta = 0$; $\vec{n} \parallel \vec{z}$

– вертикальна стіна, орієнтована на південь (північ): $\beta = 90^\circ$; $\gamma = 0$ (або $\gamma = 180^\circ$); $\vec{n} \perp \vec{z}$

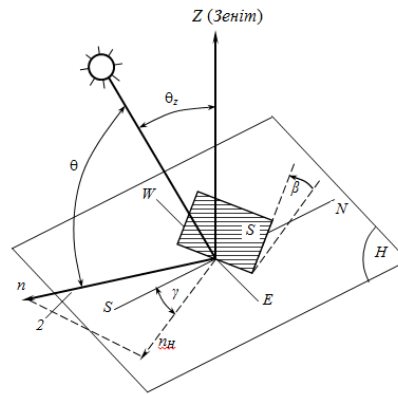


Рис. 1. Орієнтаційні параметри поверхні наземного приймача сонячної енергії S

- вертикальна стіна, орієнтована на схід (або захід): $\beta = 90^\circ$; $\gamma = -90^\circ$ (або $\gamma = 90^\circ$); $\vec{z} \perp \vec{n}$;
- площина, орієнтована на південь і нахилена під кутом до горизонту, рівним географічній широті місцевості: $\beta = \varphi$; $\gamma = 0$; у сонячний полудень $\angle(\vec{n}, \vec{z}) = \theta_z$;

За найпоширенішого випадку поверхні південної орієнтації з кутом нахилу β її орієнтаційні параметри зручно виражати через горизонтальну поверхню на умовній широті $(\varphi - \beta)$ [1]. Схема побудови для приведення до умовної широти наведена на рис. 2.

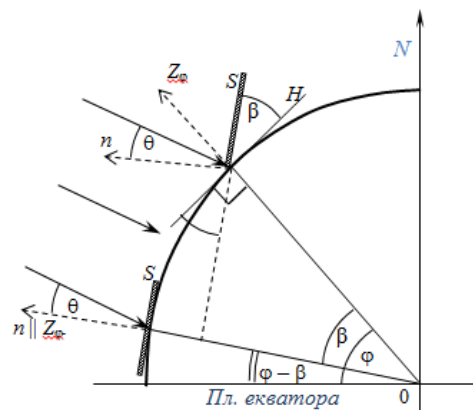


Рис. 2. Приведення похилої поверхні до горизонтальної на умовній широті $\varphi - \beta$

У тропічних широтах різниця $(\varphi - \delta)$ може приймати обидва знаки, тому при розрахунках азимутальний кут сприймаючої поверхні потрібно змінювати на протилежний за таким правилом:

$$\gamma = \begin{cases} 0^\circ, & \text{якщо } \varphi - \delta > 0; \\ 180^\circ, & \text{якщо } \varphi - \delta \leq 0, \end{cases} \quad (1)$$

Однак у багатьох випадках ефективність використання ПДК та реалізація не співпадає з очікуванням. Причина найчастіше полягає у необґрунтованому виборі розробниками конструктивних завдань, які не враховують особливості надходження та генерування сонячного випромінювання при різноманітних режимах освітлення, відмінних від природного сонячного потоку. Тому доцільно розглянути окремо вплив самостійних факторів на поточну потужність повітряного колектора., зокрема:

- кутової орієнтації параметрів сприймальної поверхні ПК;
- максимального ступеня концентрації скісних променів на шляху до світлочутливого покриття абсорбера ПК;
- коефіцієнта посилення енергетичної освітленості;
- оптимальні значення двогранного кута (фоклина) між дзеркалом і колектором (система градусних координат);
- схеми ходу променів між дзеркалом і колектором.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні існує багато методик розрахунку

ефективності використання ПДК, що базуються на застосуванні алгебри потоків радіаційного теплообміну або методів геометричної оптики [1-14].

У публікації [1] наведено геометричні побудови та математичні співвідношення лише для систем з багатократним відбиванням і високим ступенем концентрації, які використовують в обмеженому числі інсталяцій.

Автори у різних роботах наводять орієнтаційні параметри пасивних приймачів сонячної енергії та ПДК – дахів будинків, автомобільних доріг, схилів ґрунту, геліосушарок тощо зазвичай довільні. Для прикладу у [2-4] наведені розрахунки погодинної освітленості поверхні ПДК з азимутальним відхиленням $\Delta\gamma = 15^\circ$ і 30° і близьким до оптимального літнім нахилом до горизонту $\beta = \varphi - 15^\circ$. Інтенсивність прямих сонячних променів відповідає умовам ясного неба і максимальній прозорості атмосфери у період літнього сонцестояння. Однак не відображено добова зміна енергетичної ефективності та дифузного індекса ясності I_d / I_{th} від загального I_{th} / I_0 , що описують виразом, який поданий версії Ербса в працях [5].

Натомість останні версії подібних співвідношень, що подано в працях [6-8] використовують при опрацюванні результатів дистанційного моніторингу інсоляції земної поверхні. Зазвичай вони враховують набагато більше випадкових факторів впливу на поточні інсоляційні характеристики локальних територій. Завдяки великому обсягу первинних даних та їх опрацюванню потужними обчислювальними засобами і багатократною зв'язкою з даними наземних вимірювань, вдається оцінювати інсоляційні режими земної поверхні з високою роздільною здатністю. Сформовані на їх основі глобальні бази даних, наприклад NASA SSE, які вільно доступні користувачам у режимі реального часу складають реальну альтернативу класичним статистично обґрунтованим наближеним співвідношенням [9].

У роботі [10, 11] нерухомий повітряний колектор практично весь день освітлюється скісними променями, що відповідає частинному випадку опромінення в сонячний полудень.

В спеціалізованій літературі, наведено десятки різних співвідношень, які мають обмежену достовірність та ареал використання. Особливо вважаючи на те, що вони ґрунтуються на результатах вимірювання, проведених до останніх значних кліматичних змін. Тому кількісна параметрів сонячної радіації за ними доцільна лише після належного обґрунтування подібності прийнятому наближенню метеорологічних, географічних, сезонних та інших особливостей конкретного майданчика. Останнє підтверджується практикою розрахунків на усіх континентах

Таким чином, вирішальним аспектом для прийняття рішення під час використання ПДК в геліосушарці є обґрунтування його оптимальних конструктивно-технологічних параметрів.

Постановка завдань. Метою даного дослідження є обґрунтування оптимальних геометричних співвідношень плоского дзеркального концентратора та повітряного колектора відносно кутів орієнтації і надходження енергетичної освітленості (сонячної енергії).

Викладення основного матеріалу. Додаткове підвищення енергетичної освітленості поверхні стеження часто реалізують за допомогою плоских дзеркал. Геометричні параметри конструкції та фотометричні величини визначають за відомими правилами геометричної оптики. Загальні принципи розрахунку дзеркальних концентраторів, викладені у класичній літературі, переважно орієнтовані на реалізацію максимального ступеня концентрації з неминучими високими втратами сонячної енергії. Тоді як для більшості практично важливих інсталяцій важливіше її використання з максимальною ефективністю [12; 13; 14].

Громіздкі формули моделі ESRA незручні для оперативної оцінки робочих характеристик і моделювання продуктивності сонячних енергетичних систем. Тому на практиці іноді використовують спрощені співвідношення. Наприклад напівемпірична формула Кастрова [10], узалежнює інтегральну інтенсивність прямої сонячної радіації від атмосферної маси виразом, подібним до піргеліометричної формули Кастана:

$$G_b(m) = \frac{G_{sn}}{1 + cm} \quad (2)$$

Величина c має фізичний зміст коефіцієнта прозорості атмосфери. На практиці його розраховують за оберненим до (2) співвідношенням при найвищому піднесенні Сонця [10]. Завдяки цьому її легко узгодити з формулою моделі ESRA. Наприклад найдовшого літнього дня, коли $G_{sn} = 1323 \text{ Вт/м}^2$ і найвищої прозорості атмосфери при $T_{LK} = 2$ на широті 50° інтенсивність прямого потоку $G_b = 1056 \text{ Вт/м}^2$ (див. табл.1), стала c рівна:

$$c = \frac{1}{m} \left(\frac{G_{sn}}{G_b} - 1 \right) = \frac{1}{1,008} \left(\frac{1323}{1056} - 1 \right) = 0,2297.$$

При вищих значеннях $T_{LK} = 3,75$ і $4,0$ $c = 0,4810$ і $0,5206$ відповідно. Результати розрахунків погодинних значень наведені у таблиці 1.

Табл. 1

Інтенсивність та експозиція прямих сонячних променів у наближенні ESRA (G_b) та формули Кастрова (G_{bk}) у період літнього сонцестояння на широті 50° $G_{sn} = 1323$ Вт/м²; $H=10572$ Вт·год/м²

$G_h, E_h,$ Вт/м ²	0	1	2	3	4	5	6	7	8	8,075	ΣG
m	1,1008	1,1126	1,2072	1,3732	1,6399	2,1463	3,2024	6,2218	27,42	37,79	–
G_b $T_{LK}=2$	1056	1054	1038	1012	973	910	809	623	275	227	14207
G_{bk} $c=0,2297$	1056	1054	1036	1006	961	886	762	545	181	137	13761
G_b $T_{LK}=3,75$	865	862	838	798	742	654	523	320	69	29	10415
G_{bk} $c=0,4810$	865	862	837	797	740	651	521	331	93	69	10448
G_b $T_{LK}=4,0$	841	838	813	772	714	624	492	291	56	41	9992
G_{bk} $c=0,5206$	841	838	812	771	714	625	496	312	87	64	10075

Значення енергетичних експозицій, розрахованих за у наближенні ESRA і формулою Кастрова практично співпадають і близькі до наведеного у довіднику $H=10572$ Вт·год/м² [7]. Різниця при $T_{LK} = 3,75$ не перевищує похибки 2,5% що вказує на доцільність використання формули Кастрова для моделювання енергетичних процесів принаймі у період літнього сонцестояння.

При теоретичному моделюванні режимів інсоляції та роботи енергетичних установок, часову залежність енергетичної освітленості горизонтальної поверхні іноді апроксимують ділянкою косинусоїди, близької за формою до дзвоноподібної $G_{bh}(\tau)$ і $G_{th}(\tau)$. Зазвичай обирають кутові межі $[-\pi/2; +\pi/2]$ і періодом, рівним тривалості τ_c сонячного саява [11]:

$$E_{bh} \approx E_{max} \cos \pi \frac{\tau}{\tau_c}, \tag{3}$$

де E_{max} – максимальна енергетична освітленість у сонячний полудень. Результати розрахунків наведені у таблиці 2.

Відповідне графічне порівняння обох часових залежностей (ESRA і косинусного) проведене на рис. 3 для трьох сезонів року і кількох варіантів косинусоїди з різною тривалістю сонячного саява τ_c .

З порівняння видно, що косинусна залежність (1), яка відповідає формулі (2) істотно відрізняється від G_{bh} формою та завищеними значеннями всюди, крім моментів сходу-заходу і сонячного полудня. Зближення форми обох залежностей можна формально досягнути зменшенням періодичності косинусоїди: наприклад залежність (3) відповідає зменшеному періоду приблизно на 2 год. Натомість у сезон рівнодення період доцільно зменшити приблизно на $\approx 1,3$ год, а взимку на ≈ 50 хв відносно тривалості сонячного саява. Значення енергетичних експозицій, розрахованих за обома наближеннями, які наведені в останній колонці таблиці, дозволяють додатково оцінити енергетичний внесок у відхилення косинусної апроксимації від моделі ESRA.

Невідповідність асимптотики $G_{bh}(\tau)$ і пригоризонтної ділянки косинусоїди можна подолати зміною інтервалу її розрахунку у межах від -90° до $+90^\circ$ з відповідною модифікацією розрахункової формули до такого вигляду:

$$E_{bh} \approx \frac{1}{2} E_{max} \left(1 + \cos \pi \frac{\tau}{\tau_c} \right). \tag{4}$$

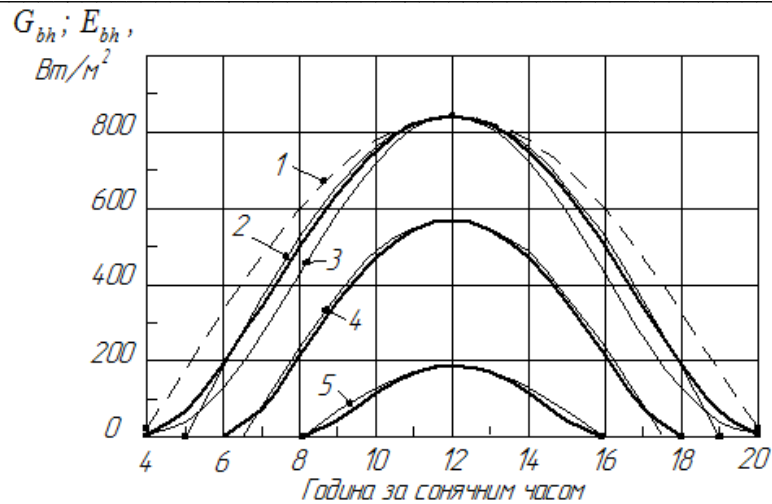


Рис. 3. Сезонні зміни G_{bh} (лінії нормальної товщини) та їх апроксимація косинусоїдами: номери 1, 2, 3, 4, 5 відповідають даним у стрічках табл. 2

Табл. 2

Горизонтальні складові сонячної енергії на широті 50° при $T_{LK}=3$

$G_h, E_h,$ $Вт/м^2$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	8,075	$H_h,$ $Вт \cdot год/м^2$
Літнє сонцестояння: $\tau_c=16,15$ год											
G_{bh}	843	821	749	637	500	344	192	65	1	0	8303
$E_{bh} = E_{max} \cdot \pi \cos(\tau/\tau_c); E_{max} = 843 \text{ Вт/м}^2;$											
1. $\tau_c=16,15$	843	827	780	703	600	475	331	175	12	0	9492
2. $\tau_c=14$	843	822	760	659	526	366	188	0	–	–	8328
$E_{bh} = \frac{E_{max}}{2} \left(1 + \cos \pi \frac{2\tau}{\tau_c} \right); E_{max} = 843 \text{ Вт/м}^2;$											
3. $\tau_c=16,15$	843	812	722	587	428	267	130	36	0,2	0	7650
Весняне рівнодення: $\tau_c=12$ год; прийнято $\tau=10,7$ год; $E_{bh} = E_{max} \cos \pi(\tau/10,7)$											
G_{bh}	570	543	471	355	216	72	0	–	–	–	4454
4. E_{bh}	570	546	475	363	220	58	0	–	–	–	4464
Зимове сонцестояння: $\tau_c=7,84$ год; формула $E_{bh} = E_{max} \cos \pi(\tau/8)$											
G_{bh}	185	166	113	42	0	–	–	–	–	–	1012
5. $\tau_c=8$	185	167	115	41	0						1016

Але відповідна цій формулі крива (3) показує значне від'ємне відхилення в області переважаючої інтенсивності, а також помітне зменшення енергетичної експозиції. Ці відхилення нівелюють переваги правильнішої асимптотики при моделюванні інсоляційних режимів і продуктивності сонячних енергетичних установок.

Обидві емпіричні формули Кастрова і косинусна зручні при теоретичному моделюванні роботи сонячних інсталяцій, бо не вимагають попередніх громіздких обчислень і великого числа вхідних параметрів. Зокрема при моделюванні енергетичних перетворень вони дозволяють замінити наближене чисельне сумування годинних експозицій точним розрахунком за відомими табличними формулами.

Однак в деяких інсталяціях прямої дії з горизонтальною поверхнею неможливо орієнтувати перпендикулярно до променів. Тому вони практично завжди освітлюються скісними променями,

інтенсивність яких доцільно посилювати дзеркально відбитими потоками. Зазвичай подібні пристрої мають певну ступінь свободи для часткового коригування нахилу та азимутального напрямку, а її освітлення можна звести до схеми, наведеної на рис. 4.

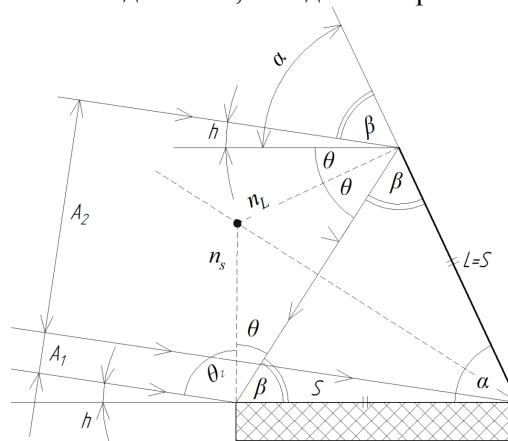


Рис. 4. Хід променів у плоскому дзеркальному концентраторі за однакової ширини відбивача і колектора: α – кут розкриття концентратора; A_1 і A_2 – переріз вхідного прямого і відбитого потоків; n_s і n_L – нормалі до площин S і L ; θ_1 і θ_2 – кути падіння на колектор і дзеркало; h – кут ковзання

Основними елементами плоского дзеркального концентратора є плоске дзеркало 1 із селективним покриттям, розташоване під певним кутом до нормалі, механізм для виставлення кута нахилу 2 та утримувальний пристрій 3 (рис. 5).

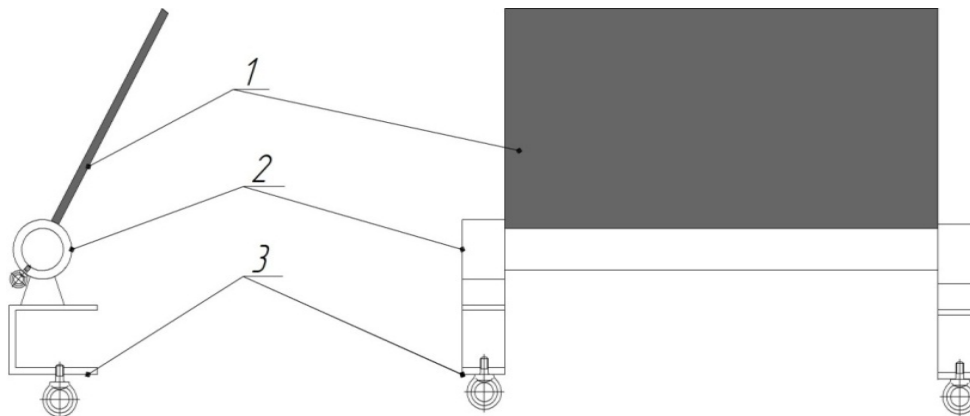


Рис. 5. Схема плоского дзеркального концентратора: 1 – плоске дзеркало; 2 – механізм для виставлення кута нахилу; 3 – утримувальний пристрій

Довжину L дзеркального відбивача приймемо рівною ширині колектора S , усі кутові величини виразимо через кут розкриття α двогранного фоклина, утвореного площинами колектора і дзеркала. За вимоги рівномірного освітлення відбитими променями поверхні колектора, відбитий промінь є основою рівнобедреного трикутника. Відтак з наведеної на рис. 2 побудови випливають такі очевидні співвідношення:

$$\left. \begin{aligned} \beta &= 90^\circ - \frac{\alpha}{2}; \quad \theta_2 = \frac{\alpha}{2}; \quad h + \beta = \alpha; \\ h &= \alpha - \beta = \alpha - 90^\circ + \frac{\alpha}{2} = \frac{3}{2}\alpha - 90^\circ; \\ \theta_1 &= 90^\circ - h = 90^\circ - \frac{3}{2}\alpha + 90^\circ = 180^\circ - \frac{3}{2}\alpha. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Кут ковзання змінюється в очевидних межах $0 < h < 90^\circ$, а верхню межу кута розкриття α визначають з такої нерівності:

$$h = \frac{3}{2}\alpha - 90^\circ < 90^\circ \text{ або } \alpha < 120^\circ. \quad (6)$$

Нижня межа кута розкриття α рівна 60° , бо інакше відбитий крайній промінь зміститься назовні від кромки колектора. Відтак ця величина не повинна виходити за межі інтервалу:

$$60^\circ < \alpha < 120^\circ. \quad (7)$$

Коефіцієнт підсилення променистого потоку очевидно рівний відношенню сумарної енергетичної освітленості колектора $E = E_1 + E_2$ до освітленості тільки прямими променями E_1 . Вони, у свою чергу, розраховуються через відповідні потоки, яка проходять перетинами A_1 і A_2 :

$$E_1 = A_1 G_b \cos\theta_1; E_2 = \rho A_2 G_b \cos\theta_2, \quad (8)$$

де ρ – коефіцієнт відбивання дзеркальної поверхні, яка у випадку скляного побутового дзеркала не перевищує значення $\approx 0,8$ [3]. Звідки

$$k = \frac{A_1 \cos\theta_1 + \rho A_2 \cos\theta_2}{A_1 \cos\theta_1} = 1 + \rho \frac{A_2 \cos\theta_2}{A_1 \cos\theta_1}. \quad (9)$$

Обидва перетини є функціями кута розкриття концентратора α :

$$A_1 = S \cdot \sin h = L \cdot \sin\left(\frac{3}{2}\alpha - 90^\circ\right) = -L \cdot \sin\left(90^\circ - \frac{3}{2}\alpha\right) = -L \cos\frac{3}{2}\alpha. \quad (10)$$

$$A_2 = L \cdot \sin(\alpha - h) = L \cdot \sin\left[\alpha - \left(\frac{3}{2}\alpha - 90^\circ\right)\right] = L \cdot \sin\left(90^\circ - \frac{\alpha}{2}\right) = L \cdot \cos\frac{\alpha}{2}. \quad (11)$$

Після скорочення та елементарних тригонометричних перетворень отримаємо такий вираз для коефіцієнта концентрації:

$$k = 1 + \rho \frac{A_2 \cos\frac{\alpha}{2}}{A_1 \cos\left(180^\circ - \frac{3}{2}\alpha\right)} = 1 + \rho \frac{\cos^2\frac{\alpha}{2}}{\cos^2\frac{3}{2}\alpha}. \quad (12)$$

У випадку горизонтального розміщення поверхні приймач, кут ковзання h рівний кутовій висоті Сонця над горизонтом, який є доповнюючим до зенітного: $h = 90^\circ - \theta_z$. Для площини, орієнтованої у південному напрямку і нахиленої під кутом β_n до горизонту, кут ковзання відраховується від площини сприймаючої поверхні. Тоді зручніше орієнтуватися на кут освітлення $\theta_1 = \theta_z$.

Оскільки кут розкриття α однозначно пов'язаний з кутом ковзання h , який, у свою чергу, функціонально залежить від поточного сонячного часу τ , то за потреби можна побудувати й часову залежність коефіцієнта підсилення також $k(\tau)$. Наведені геометричні побудови та виведені на їх основі співвідношення повністю виконуються тільки за умови, коли азимут дзеркальної площини рівний азимуту Сонця $\gamma = \gamma_s$. За її порушення перетин відбитого прямокутним дзеркалом потоку з площиною колектора має вигляд паралелограма, який частково виходить за межі сприймаючої поверхні.

Хід освітленості ПК сумою прямого та відбитого потоків розраховуємо за формулою:

$$E_\beta(\tau) \approx k(\tau) \cdot R_\beta \cdot E^{max} \cos\frac{\tau}{\tau_c}. \quad (13)$$

де τ – час відрахований від моменту сонячного полудня, год; R_β – коефіцієнт середньомісячного надходження сонячного випромінювання, що розраховується за табличними значеннями середньомісячного азимутального кута заходу Сонця [8]; E^{max} – максимальна енергетична освітленість горизонтальної поверхні повітряного колектора, Вт/м²; τ_c – тривалість надходження сонячної енергії, с; τ – коефіцієнт пропускання сонячного випромінювання.

Значення E^{max} і тривалість світлового дня τ_c для похилої поверхні встановлюють експериментально. Отримані вирази дають змогу розрахувати коефіцієнт підсилення потоку надходження сонячної енергії (12) і максимальну енергетичну освітленість (13).

Ефективність роботи плоского дзеркального концентратора залежить від коефіцієнта підсилення потоку сонячної енергії k і оптимального кута розкриття α ПДК.

Проведені розрахунки показали, що під час використання ПДК посилення потоку енергетичної освітленості на похилу поверхню ПК в ранковий період з 7^{00} до 10^{00} год. E^{max}

становить від 456 до 965 Вт/м², а у вечірній період з 17⁰⁰ до 20⁰⁰ год. – від 734 до 223 Вт/м². Таким чином, енергетична освітленість зовнішньої поверхні покриття ПК зросла в 1,2 рази, а теплопродуктивність – в 1,3 рази.

Результати досліджень дають підстави запропонувати оптимальні кути розкриття ПДК. При цьому приріст енергетичної освітленості на похилу поверхню ПК з найменшими затратами реалізується при $L = S$ з кутом розкриття від 90 до 120° і коефіцієнтом посилення потоку сонячної енергії k від 1,8 до 1,2.

Висновки. Розроблено методику розрахунку геометричних параметрів плоского дзеркального концентратора для потоку сонячних променів та обґрунтовано ефективність використання плоского дзеркального концентратора для різних азимутальних кутів орієнтації параметрів горизонтальної сприймальної поверхні повітряного колектора відносно інтенсивності надходження сонячних променів. Зокрема раціональні значення двогранного кута (фоклина) α між дзеркалом і колектором, що складають 90...120°. Визначено, що коефіцієнт підсилення потоку сонячної енергії k з найменшими затратами реалізуються від 1,8 до 1,2.

Список використаних джерел

1. Atykhanov A. K. 2010. Klassyfykatsyya sushylnykh ustanovok z ispolzovanyem solnechnoy énerhyu. Adaption of innovation technologies and forms of international collaboration in agrarian education. International conferences reports. GƏNGƏ (Azerbaydzhan), 9, 95–112.
 2. Ozarkiv I. M., Ferents O. B., Kobrynovych M. S. 2007. Osoblyvosti rozrakhunku heliosushylnoyi ustanovky dlya derevyny. Naukovyy visnyk Natsionalnoho lisotekhnichnoho universytetu, 17.1, 91–96.
 3. NASA Surface meteorology and Solar Energy. Available: <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid/cgi?uid=3030>. Last accessed: 28.11.2016.
 4. Khazimov K. M., Bora G. C., Urmashv B. A. 2014. Computation of optimal structural and Technical parameters of solar dryer. IJEIT – India, 32, 258–268.
 5. Bilgen E., Bakeka B. 2008. Solar collector systems to provide hot air in rural applications. Renewable Energy, 33(7), 1461–1468. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.09.018>.
 6. Kupreenko A. Y., Ysaev X. M., Baydakov E. M. 2008. K raschetu neobkhodimoy ploshchadi geliokoletektora barabannoy zernosushilki. Vestnyk Bryanskooy hosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademyy, 3, 37–41.
 7. Kassymbayev B. M., Atykhanov A. K., Karaivanov D. P. 2014. Method of calculation solar radiation intensity and its application in solar dryers-greenhouses for production of fruits and vegetables. An International Journal. «Life Science Journal». Acta Zhen gzhou University Overseas Edition. P. O. Box 180432, Richmond Hill, New York 11418, the United States, 11(10), 687–689.
 8. Shemelin V., Matuska T. 2017. Detailed Modeling of Flat Plate Solar Collector with Vacuum Glazing. International Journal of Photoenergy. Vol. 2017. P. 1–9. doi: [10.1155/2017/1587592](https://doi.org/10.1155/2017/1587592).
 9. Vishwakarma D., Kale J. 2017. Experimental study and analysis of solar air heater using of various inlet temperatures. International Journal of Research. Vol. 5, Issue 10. P. 76–80. doi: [10.5281/zenodo.1039619](https://doi.org/10.5281/zenodo.1039619).
 10. Parametric study on the thermal performance and optimal design elements of solar air heater enhanced with jet impingement on a corrugated absorber plate / Alsanossi M. Aboghrara, M. A. Alghoul, B. T. H. T. Baharudin, A. M. Elbreki, A. A. Ammar, K. Sopian, A. A. Hairuddin // International journal of photoenergy. 2018. Article ID 1469385, 21 p. doi: [10.1155/2018/1469385](https://doi.org/10.1155/2018/1469385).
 11. Kolomiets' L. V., Vorobienko P. P., Kozachenko M. T. 2009. Metrologiya, standartizatsiya, sertifikatsiya ta upravlinnya yakistyu v sistemakh zv'yazku. Odesa : VMV, 376.
 12. Tomasik M., Knaga J., Lis S., Gliniak M. 2018. Analysis of the effectiveness of the prototype PV tracking system. Applications of Electromagnetics in Modern Techniques and Medicine (PTZE), IEEE Xplore digital library, Piscataway, NJ, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 264-267. <https://doi.org/10.1109/PTZE.2018.8503095>.
 13. Kurpaska S., Knaga J., Latała H., Cupiał M., Konopacki P., Hołownicki R. 2020. The Comparison of Different Types of Heat Accumulators and Benefits of Their Use in Horticulture. Sensors, vol. 20, nr 5, 1-27. <https://doi.org/10.3390/s20051417>.
 14. Rueda-Márquez J. J., Palacios-Villarreal C., Manzano M., Blanco E., Ramírez del Solar M., Levchuk I. 2020. Photocatalytic degradation of pharmaceutically active compounds (PhACs) in urban wastewater treatment plants effluents under controlled and natural solar irradiation using immobilized TiO₂, Solar Energy, Volume 208, 480-492. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.028>.
- Рецензент Захарчук Віктор Іванович, професор кафедри автомобілів і транспортних технологій Луцького національного технічного університету, доктор технічних наук.