

Наведені методи розрахунку оптико-геометричних параметрів геліоколектора-концентратора. Викладені результати його експериментального дослідження.

УДК 697.7

Н. О. Чорна

*Інститут технічної теплофізики
НАН України*

МЕТОД РОЗРАХУНКУ ОПТИКО-ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ «ЗОНАЛЬНИХ» ФОКЛІНІВ

В усьому світі відновлювальні джерела енергії привертають до себе все більше уваги. Це зумовлено такими проблемами, як вичерпність родовищ нафти, газу та вугілля, а також погіршенням екологічного становища. Енергетичний потенціал таких відновлюваних джерел енергії як вітер, вода, сонце та біомаса досить великий. Проблемою використання, наприклад сонячного потенціалу є малий (10-15%) ККД устаткування, що перетворює енергію альтернативного джерела в теплову.

У теплових системах, що використовують сонячну енергію, основними елементами являються геліоколектори. За принципом роботи геліоколектори розподіляють на поглинаючі та фокусуєчи сонячне випромінювання. Останні отримують широке розповсюдження в наш час.

Концентрація сонячного випромінювання на поверхні приймача зазвичай значно підвищує ефективність сонячних установок та розширює коло їх застосування [1]. Вони мають більш високий тепловий ККД в температурному діапазоні 80–120 °С, ніж плоскі колектори та ефективно працюють в температурному діапазоні від 200 °С і вище.

Найбільш перспективним є використання геліоколекторів оснащених концентраторами типу «фоклін». Фокліном називають рідинний геліоприймач, який суміщає властивості плоских та концентруючих систем. В них для концентрації променів використовуються лінзи чи дзеркала, які збирають сонячне випромінювання в круглу або подовжену фокальну пляму чи в фокальну смугу.

Основне функціональне призначення концентруючих систем в загальному випадку є підвищення густини потоку сонячного випромінювання до рівня, який забезпечує його ефективне та економічне перетворення в енергію потрібного виду [2].

Цю функцію системи характеризує середній коефіцієнт концентрації K_c який є інтегральним показником та визначається як відношення середнього значення густини сконцентрованого променевого потоку на приймачі $E_{e\text{cp}}$ до поверхневої густини сонячного випромінювання в площині, перпендикулярній напрямку його поширення E_c .

$$K_c = \frac{E_{e\text{cp}}}{E_c} \quad (1)$$

Концентруюча система, яка реалізує потрібний розподіл енергії на теплоприймачі, є одним із основних елементів геліоустановок. Тип концентрації, який забезпечує ефективне та економічне перетворення потоку сонячної енергії, повинен обиратися на основі аналізу багатьох параметрів та чітко сформульованої методології [3]. Порівняння різних типів концентраторів можна проводити за допомогою коефіцієнта використання дзеркальної поверхні (або відбивача).

Ефективність окремого відбивача характеризується не тільки кутом падіння на нього сонячних променів, але й кутом падіння відображеного потоку на теплоприймач.

Коефіцієнт ефективності M представляє собою середню питому поверхні відбивача, яка утворює на одиничній поверхні теплоприймача одиничну середню концентрацію:

$$M = \frac{N \sum_{n=1}^n \int_{S_n} dS_n}{\int_f df K_c} \quad (2)$$

$$K = \cos \theta + NR_3 \sum_{n=1}^n k_n \quad (3)$$

N – кількість однакових відбивачів; S – поверхня відбивача; K_c – коефіцієнт концентрації; f – поверхня приймача; R – коефіцієнт відбиття дзеркальної поверхні; k – концентрація секції відбивача; θ – кут падіння прямого потоку сонячного випромінювання на приймач.

Чим менше M , тим ефективніше концентратор. Даний коефіцієнт може використовуватися як для оцінки концентраторів з плоскими відбивачами, так і з довільними кривими відбиваючими поверхнями [3]. Він однаково підходить для концентраторів з незмінною та змінною геометрією, може характеризувати концентратор в цілому або окремі ділянки його поверхні.

Для багатосекційного фокліна формули (2) та (3) можна записати в вигляді:

$$M = \frac{N \sum_{n=1}^n b_n}{b_o K_o} \quad (4)$$

$$K = 1 + NR_3 \sum_{n=1}^n k_n \quad (5)$$

b_0 – ширина першої грані фокліна; b_n – ширина n -ої грані фокліна;

Крім цих двох характеристик, до найважливіших параметрів багатосекційного фокліна

входять розмір секції – $b_n = b_o \frac{\cos \theta_{2(n)}}{\cos \theta_{1(n)}}$ та концентрація секції $k_n = \cos \theta_{2(n)}$.

Кут нахилу граней, які забезпечують ціле число відбивань:

$$\theta_{1k} = \frac{(2n_k + 1)S}{4(n_k + 1)} \quad (6)$$

n_k – число прямих відбиттів; S – поверхня відбивача;

Співвідношення ширини грані n -го відбивача до ширини вихідного отвору фокліна:

$$\frac{b_n}{b_o} = \frac{(-1)^n \cos 2n \theta_{1k}}{\cos \theta_{1k}} \quad (7)$$

Розрахункові параметри багатосекційного фокліна обчислені за формулами (4 – 7) наведені в таблиці 1 [3].

Таблиця 1. Параметри багатосекційного фокліна

n	θ_1^0	$\frac{b_n}{b_0}$	K_c	M
1	67,5	1,85	2,27	1,63
2	78,75	4,74	3,94	3,35
3	82,8	7,73	5,68	5,04
4	84,75	10,75	7,45	6,73
5	85,88	13,77	9,28	8,41

За даними таблиці 1 можна зробити висновок, що межа концентрації або кут нахилу грані, після якого концентрацію доцільно підвищувати за рахунок збільшення секції, становлять відповідно $K_c = 2,27$ та $\theta_1 = 67^{\circ}30'$.

При використанні багатократних відбиттів плоскі фокліни можуть забезпечувати ступені концентрації випромінювання значно більші ніж при однократному відбитті [4].

Число «активних» відбиттів, після яких промінь може потрапити на приймач розраховується за формулою:

$$n_{np} = n_{np o} - 1 = \frac{\theta_k}{\pi - 2\theta_k} \quad (8)$$

$n_{np o}$ – число прямих відбиттів, включаючи те, після якого промінь відіб'ється назад.

Якщо задатися потрібною кількістю відбиттів n_{np} , можна визначити відповідне йому максимальне значення кута нахилу фокліна:

$$\theta_k = \frac{\pi n_{np}}{1 + 2n_{np}} \quad (9)$$

Мінімальний кут, при якому промені після n_{np} відбиттів перестають освітлювати теплоприймач:

$$\theta_{k \min} = \frac{\pi n_{np} - \frac{\pi}{2}}{2n_{np}} \quad (10)$$

Повний енергетичний коефіцієнт випромінювання на теплоприймачі в системі з плоским симетричним фокліном визначається за формулою [4]:

$$K_{e np} = \frac{1 + \rho_3}{1 - \rho_3} \quad (11)$$

де ρ_3 – коефіцієнт дзеркального відбиття.

Геометричний коефіцієнт концентрації плоского фокліна:

$$K_z = \frac{1}{b_o} (b_o + 2b \cos \theta_k) \quad (12)$$

З формули (11) видно суттєвий вплив коефіцієнта дзеркального відбиття на концентруючу можливість плоского фокліна з багатократним відбиттям.

Метою розрахунково-теоретичного дослідження є визначення оптимальних оптико-геометричних параметрів концентратора на базі розробленого плоского двохгранного «зонального» фокліна при заданому геометричному коефіцієнті концентрації (рис.1)

Потрібно відмітити, що лінійна довжина фокліна практично не впливає на його оптико-геометричні характеристики, тому цим параметром в розрахунках можна знехтувати [6].

Для визначення кута розкриття фокліна та його висоти, при яких оптичний та енергетичний коефіцієнти пропускання будуть мати максимальне значення, потрібно задатися рекомендованими початковими параметрами для «зонального» фокліна. Приймаємо геометричний коефіцієнт концентрації рівним трьом ($k = 3$) [8].

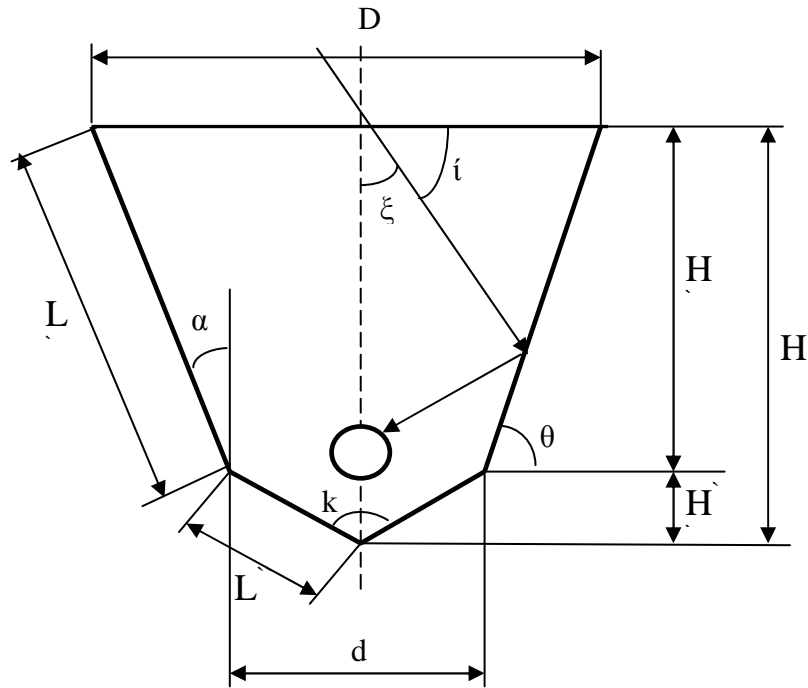


Рис. 1 – Двохсекційний плоский фоклін: α – кут розкриття фокліна; θ – кут нахилу грані фокліна; k – кут розкриття нижніх граней фокліна; i – кут падіння сонячного променя на площину вхідного отвору фокліна; ξ – кут падіння сонячного променя на площину поперечного перерізу фокліна; D – діаметр вхідного отвору фокліна; d – діаметр вихідного отвору фокліна; L – ширина першої грані фокліна; L'' – ширина другої грані фокліна; H – висота першої грані фокліна; H'' – висота другої грані фокліна.

Для першої грані, згідно табл. 1, визначаємо кут нахилу $\theta = 67,5^\circ$, отже кут розкриття фокліну становитиме $\alpha = 22,5^\circ$.

Висоту першої грані фокліна визначаємо за формулою [6]:

$$H' = D - \frac{d}{2 \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}} \quad (13)$$

D – діаметр входу; d – діаметр виходу; β – кут розкриття концентратора.

Висота другої грані фокліна розраховується за формулою:

$$H'' = \frac{d/2}{\operatorname{tg} \frac{k}{2}} \quad (14)$$

Використовуючи отримане значення, визначимо ширину граней фокліна:

$$L = \frac{H'}{\operatorname{Cos} \alpha} \quad (15)$$

α – параметричний кут концентратора.

Для нижніх граней, знаючи що кут $k = 90^\circ$, ширину знаходимо за формулою:

$$L'' = \frac{d}{\sqrt{2}} \quad (16)$$

Результати оптико-геометричного розрахунку ГКК на базі «зонального» фокліна наведено в таблиці 2.

Таблиця 2. Оптимальні геометричні параметри фокліна

Ступінь концентрації, k	Діаметр входу, D	Діаметр виходу, d	Висота першої грані, Н'	Висота другої грані, Н''	Загальна висота фокліну, Н	Ширина першої грані, L'	Ширина другої грані, L''
3	0,03	0,01	0,018	0,005	0,023	0,02	0,007

Для підтвердження вірності запропонованих методів оптико-геометричного розрахунку геліоколектора-концентратора (ГКК) були проведені експериментальні дослідження, мета яких – визначення залежності відведеної теплоти від інтенсивності сонячної радіації, порівняння теплових потоків сонячної радіації на поверхні теплоприймача ГКК та референта.

Експериментальний комплекс, призначений для дослідження процесу перетворення енергії сонця в теплову, представлений на рис.2. Він складається з ГКК 1, референта 2 та радіометра 3, які розміщені в одній площині під кутом 30° до горизонту [9,10].

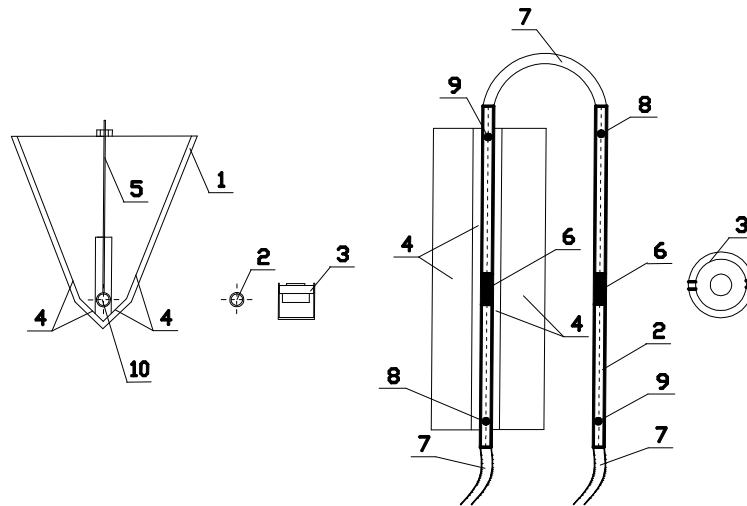


Рис. 2 – Експериментальна установка: 1 – ГКК; 2 – референт; 3 – радіометр; 4 – «зональний» фоклін; 5 – стержень; 6 – ПТП теплоприймача; 7 – шланг; 8 – ТХК на вході в теплоприймач; 9 – ТХК на виході з теплоприймача; 10 – теплоприймач ГКК.

ГКК по типу є «зональним» фокліном 4, всередині якого розміщений теплоприймач 10. Відбиваюча поверхня фокліну складається з чотирьох дзеркал, які з'єднані між собою шарнірами. Теплоприймачем ГКК є мідна труба $d_y = 25$ мм, яка покрита аракалом чорного матового кольору для збільшення теплопоглинаючих властивостей труби.

Референт – теплоприймач у вигляді мідної труби $d_y = 25$ мм, яка покрита аракалом чорного матового кольору.

Теплоносієм в теплоприймачі є холодна вода, витрата якої постійна і становить $G = 0,02$ кг/с. Температура теплоносія на виході і вході в теплоприймач, а також температура навколишнього середовища вимірюється термопарами.

Для вимірювання теплового потоку, що надходить на теплоприймач ГКК та референт, використовується гнучкий перетворювач теплового потоку (ПТП) 6. ПТП є нестандартизованим робочим засобом вимірювання, який призначений для вимірювання поверхневої густини теплового потоку та температури (рис.3). ПТП виготовлений в вигляді допоміжної стінки та вміщує термоелектричні чуттєві елементи, які перетворюють тепловий потік та температуру в електричні сигнали

постійного струму [9, 11]. ПТП вимірює тепловий потік, що надходить на теплоприймач в чотирьох зонах – верхня частина труби, нижня та бокові сторони. Кожна з секцій має власний коефіцієнт перетворення.

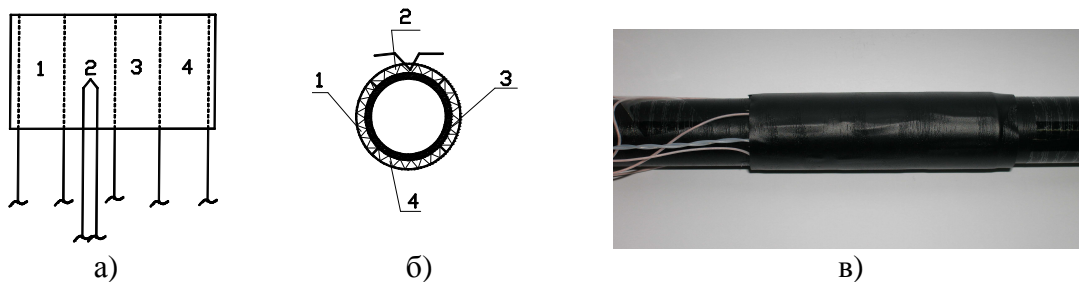


Рис. 3 – Схема та загальний вигляд спеціалізованого багатосекційного перетворювача теплового потоку: а) схема спеціалізованого ПТП; б) схема розміщення спеціалізованого ПТП на теплоприймачі; в) розміщення ПТП на теплоприймачі (загальний вигляд).

Інтенсивність сонячної радіації вимірюється спеціально розробленим у відділі ТМ ІТТФ НАН України радіометром (рис.4) на базі перетворювача теплового потоку з автономним охолодженням повітря [9]. Цей радіометр є нестандартизованим робочим засобом вимірювання та призначений для вимірювання поверхневої густини теплового потоку та температури. Радіометр складається з температуровирівнююча пластина

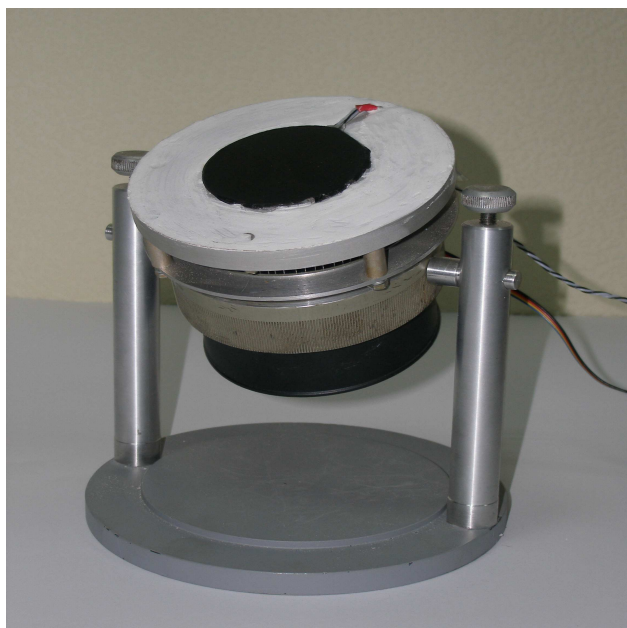


Рис. 4 - Радіометр

(ТВП), системи оребрення, вентилятора, перетворювача температури, які розміщено на штативі. На поверхню радіометра нанесене поглинаюче покриття з $\epsilon \approx 0,95$, а поверхня ТВП покрита сонцевидбиваючим покриттям з $\epsilon \approx 0,05$. Завдяки тому, що ТВП інтенсивно охолоджується навколишнім повітрям та має ефективну систему оребрення, конвективною складовою вимірюваного теплового потоку можна знехтувати, так як вона не перевищує 1%, тобто менше похибки вимірювання густини теплового потоку.

Сигнали з восьми точок двох

ПТП, п'яти точок термопар та однієї точки перетворювача інтенсивності сонячної радіації вимірювались спеціалізованим електронним блоком та надходили на ПК кожні 2 хвилини. Дані виводились на монітор у вигляді графіків температури та теплових потоків. Після завершення експерименту всі дані зберігаються у форматі EXEL.

Результати експериментальних досліджень представлені на рис.5 у вигляді графіку зміни густини теплових потоків на поверхні теплоприймачів ГКК та референту.

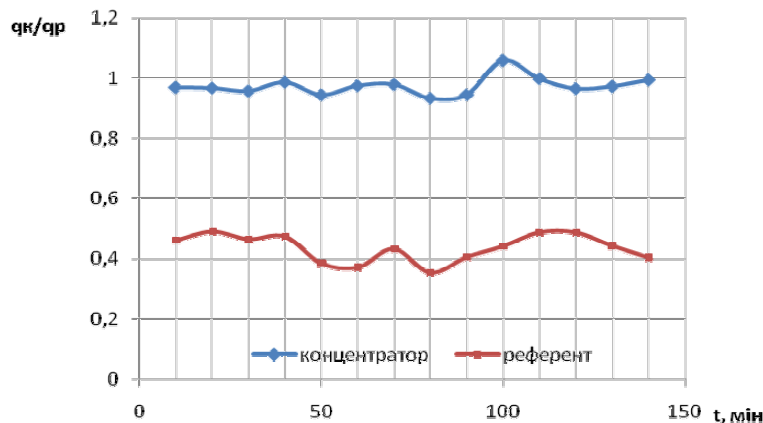


Рис. 5 – Порівняльний графік результуючих теплових потоків сонячного випромінювання на поверхні моделі плоского колектора та ГКК

За цими даними можна зробити висновок, що запропонований метод оптико-геометричного розрахунку ГКК на базі «зонального» фокліна вірний, так як тепловий потік сонячного випромінювання на поверхні ГКК в два рази більший в порівнянні з плоским колектором.

Література:

1. Вейнберг В.Б. Оптика в установках для использования солнечной энергии. – М., 1956 – 236 с.
2. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. – Л. Наука, 1989 – 312 с.
3. Эффективность некоторых концентрирующих систем с плоскими отражателями. /А.В.Вартамян// Гелиотехника, 1991 - №4 – с.46-50.
4. Плоские фоклины с многократным отражением как концентраторы солнечного излучения/ Грилихес В.А., Зайцев О.Ф.// Гелиотехника – 1981, №5 – с.22-29.
5. Графическое и численное моделирование поверхности зонального фоклина. /А.Смола, Е.Климкова// Гелиотехника, 1991 - №3 – с.33-38.
6. Хотин С.Ю. Разработка и исследование концентрирующего коллектора с вакуумированными теплоприемниками. к.т.н/ НАН Украины ин-т электродинамики – К., 2001 – 185 с.
7. Даффи Дж.А., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии: пер. с англ. – М: Мир, 1977 – 420 с.
8. Баум И.В. Теория гелиотехнических концентраторов. К.т.н. – М., 1974 – 125 с.
9. ДСТУ 3756-98 (ГОСТ 30619-98). Енергозбереження. Перетворювачі теплового потоку термоелектричні загального призначення. Загальні технічні умови.
10. Сировакша В.Ю., Марков В.П., Петров Б.С. Теплові розрахунки геліосистем. Моногр. – Д.: Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2003 – 132 с.
11. Геращенко О.А. Основы теплотетрии. – К., Наукова думка, 1971 – 192 с.

МЕТОД РАСЧЁТА ОПТИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ «ЗОНАЛЬНЫХ» ФОКЛИНОВ

Н. А. Чорна

Представлены методы расчёта оптико-геометрических параметров гелиоколлектора-концентратора. Изложены результаты его экспериментального исследования.

METHODS OF ACCOUNT OPTICAL AND GEOMETRICAL PARAMETERS OF GELIOCONCENTRATORS

N. O. Chorna

There has been presented methods of account optical and geometrical parameters of heliocollectors. The results of this experimental researches are given.