

УДК 621.472

## ЧИСЕЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК ПАРАБОЛОЇДНОГО ТА ПАРАБОЛОЦИЛІНДРИЧНОГО КОНЦЕНТРАТОРІВ ДЛЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ НА БАЗІ ДВИГУНА СТІРЛІНГА

В.П. Студенець, канд. техн. наук, доцент, К.О. Славінська, магістр

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Інститут енергозбереження та енергоменеджменту

*Концентратори сонячної енергії набувають все більшого значення у зв'язку з необхідністю вирішення важливих наукових та інженерних задач при створенні нової техніки та використанні сонячної енергії.*

*Основними характеристиками дзеркал, що концентрують пряме сонячне випромінювання, є опромінення у фокальній площині  $E_f$  та максимальне опромінення  $E_{\max}$  у фокусі дзеркала. При проектуванні потужних геліоустановок виникає необхідність застосування нового програмного забезпечення для розрахунку технічних характеристик сонячних концентраторів.*

*Розглянуто питання створення універсального програмного забезпечення для обчислення основних енергетичних характеристик параболоїдних та параболоциліндричних концентраторів сонячної енергії у середовищі Windows. Узагальнена математична модель забезпечує реалізацію етапів розрахунку та проектування з урахуванням енергетичних характеристик джерела випромінювання, неточності відбиваючих поверхонь та інші.*

*Представлений аналіз існуючих моделей розрахунку параметрів параболічного та параболоциліндричного концентраторів. За результатами дослідження визначено відмінності між методиками, розраховано ключові параметри, визначено відмінності між підходами.*

*Створено математичну модель розрахунку основних характеристик для ідеального та реального концентратора сонячної енергії. Наведено відмінності та особливості розрахунку параболічних та параболоциліндричних сонячних концентраторів. Змодельовано покроковий алгоритм обчислення характеристик сонячного концентратора.*

*Побудовано графік залежності максимальної опроміненості параболоїдного та параболоциліндричного сонячного концентратора від максимального кута розкриття.*

*Розроблену програму можна застосовувати у сучасній геліотехнічній практиці, пов'язаній з проектуванням потужних геліоустановок. Бібл. 8, табл. 3, рис. 7.*

**Ключові слова:** параболічний концентратор, параболоциліндричний концентратор, двигун Стірлінга, відновлювальні джерела енергії.

## NUMERICAL CALCULATION OF PARABOLIC AND PARABOLIC THROUGH CONCENTRATOR PARAMETERS FOR THE SOLAR POWER SYSTEM BASED ON STIRLING ENGINE

V. Stoudenets, candidate of technical science, assistant professor, K. Slavinska, master

Institute of Energy Saving and Energy Management,  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

*Concentrators of solar energy are gaining increasing importance in connection with the need to address important scientific and engineering tasks in the creation of the new technology and the use of solar energy.*

*The main characteristics of the mirrors, which concentrate direct solar radiation, are irradiation in the focal plane  $E_f$  and maximal irradiation in the focus of the mirror  $E_{\max}$ . When designing powerful solar installations there is a need for the use of new software to calculate the technical characteristics of solar concentrators.*

*The issue of creating universal software for calculating the basic energy characteristics of parabolic and parabolic cylindrical solar energy concentrators in the Windows environment is considered. The generalized mathematical model provides implementation of the stages of calculation and designs taking into account the energy characteristics of the source of radiation, the inaccuracy of reflecting surfaces, and so on.*

*The analysis of the existing models for calculating parameters of parabolic and parabolic cylindrical through concentrators is presented. According to the results of the study, the differences between the methods were determined, the key parameters were calculated, the differences between approaches were determined.*

*The mathematical model for calculating the basic characteristics for an ideal and real solar energy concentrator is created. The difference and peculiarities of the calculation of parabolic and parabolic cylindrical solar concentrators are presented. A step-by-step algorithm for calculating the characteristics of the solar concentrator is simulated.*

*The plot of the dependence of the maximum irradiance of the parabolic and parabolic cylindrical solar concentrators are presented through solar concentrator on the maximum opening angle was constructed.*

*The developed program can be used in modern solar technology, related to the design of powerful solar systems.*

*Ref. 8, Tab. 3, Fig. 7.*

**Keywords:** parabolic concentrator, parabolic cylindrical concentrator, Stirling engine, renewable energy sources.



*В.П. Студенець  
V. Stoudenets*

**Відомості про автора:** Доцент кафедри тепло-техніки та енергозбереження Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», кандидат технічних наук.

**Освіта:** Вища. Московське вище технічне училище ім. Баумана. Спеціальність «Комбіновані двигуни внутрішнього згоряння».

**Наукова сфера:** Поновлювальні джерела енергії та енергозбереження, термомолекулярна енергетика.

**Публікації:** більше 45 наукових праць з них 4 містяться в наукометричній базі Scopus та Web of Science .

**ORCID:** 0000-0002-7513-798X

**Контакти:** (067)477-90-50

**e-mail:** v.stoudenets@kpi.ua

**Відомості про автора:** Магістр кафедри тепло-техніки та енергозбереження Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

**Освіта:** Вища. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Спеціальність «Теплоенергетика».

**Наукова сфера:** енергетика, поновлювальні джерела енергії та енергозбереження.

**Публікації:** 2 наукові праці

**ORCID:** 0000-0002-6778-6699

**Контакти:** (098)264-47-89

**e-mail:** kateryna.slavinska@gmail.com

**Author information:** Associate Professor of the Department of Thermal Engineering and Energy Saving of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", candidate of technical sciences.

**Education:** Moscow Higher Technical School after Bauman. Specialty "Combined Internal Combustion Engines".

**Research area:** Renewable Energy and Energy Saving, Thermomolecular Energetics.

**Publications:** more than 45 scientific works, 4 – Scopus, Web of Science.

**ORCID:** 0000-0002-7513-798X

**Contacts:** (067)477-90-50

**e-mail:** v.stoudenets@kpi.ua

**Author information:** Master of the Department of Thermal Engineering and Energy Saving of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

**Education:** National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Specialty "Thermal Engineering".

**Research area:** Energetics, Renewable energy and Energy Saving.

**Publications:** 2 scientific works.

**ORCID:** 0000-0002-6778-6699

**Contacts:** (098)264-47-89

**e-mail:** kateryna.slavinska@gmail.com



*К.О. Славінська  
K.Slavinska*

**Перелік використаних позначень та скорочень:**

$P$  – фокальний параметр;

$f$  – фокальна довжина;

$U_m$  – кут розкриття;

$E_0$  – падаюча радіація;

$R_s$  – коефіцієнт відбиття;

ПК – параболоїдний концентратор;

ПЦК – параболоциліндричний концентратор.

**Вступ.** Робота є продовженням досліджень процесу перетворення енергії сонячного випромінювання у механічну енергію на базі сонячних енергоустановок з тепловим динамічним перетворювачем [1, 2].

Концентратори сонячної енергії набувають все більшого значення у зв'язку з необхідністю вирішення важливих наукових та інженерних задач при створенні нової техніки та використанні сонячної енергії. Основними характеристиками дзеркал, що концентрують пряме сонячне випромінювання, є опромінення у фокальній площині  $E_f$  та максимальне опромінення  $E_{max}$  у фокусі дзеркала. При проектуванні потужних геліоустановок виникає необхідність застосування нового програмного забезпечення для розрахунку технічних характеристик сонячних концентраторів.

**Мета та завдання.** Метою роботи є створення нового програмного забезпечення для обчислення основних технічних параметрів параболоїдного та параболоциліндричного сонячних концентраторів.

Відповідно до поставленої мети мають бути вирішені такі завдання:

1. Аналіз існуючих моделей розрахунку параметрів параболоїдного та параболоциліндричного концентраторів.

2. Виведення нових формул обчислення основних енергетичних характеристик параболоїдного концентратора.

3. Порівняння результатів, отриманих за допомогою нових та існуючих формул.

4. Побудова графіку залежності максимальної опроміненості параболоїдного та параболоциліндричного сонячного концентратора від максимального кута розкриття  $U_{max}$ .

5. Створення блок-схеми алгоритму розрахунку характеристик сонячного концентратора.

**Результати досліджень.** Узагальнена математична модель забезпечує реалізацію етапів розрахунку та проектування з урахуванням енергетичних характеристик джерела випромінювання, неточності відбиваючих поверхонь та інше.

У роботі [3] представлено формулу для розрахунку максимальної концентруючої спромож-

ності параболоциліндричних дзеркал ідеальної системи

$$E_{m(i)}^{mn} = 298,6E_0R_s \sin U_m, \quad (1)$$

де  $R_s$  – коефіцієнт дзеркального відбиття,  $U_m$  – максимальний кут розкриття сонячного концентратора,  $E_0$  – густина потоку прямого сонячного проміння, Вт/м<sup>2</sup>.

Спираючись на вищезгадане визначення, автори [4] виводять формулу для розрахунку максимальної концентруючої спроможності параболоциліндричних дзеркал реальної системи

$$E_{m(p)}^{mn} = 298,6E_0R_s \sin U_m \cdot K, \quad (2)$$

де  $K$  – коефіцієнт корекції, що враховує неідеальність концентруючої системи (визначається експериментально для конкретної установки).

У даному дослідженні за вихідний пункт приймається формула Р.Р. Апарісі [5] для визначення опромінення у фокальній точці сонячного концентратора

$$E_F = 8,3610^3 E_0 R_s A_m h^2, \quad (3)$$

де  $A_m$  – функція, що враховує геометричні особливості відбивача,  $h$  – міра точності системи (див. нижче).

Для параболоїдних відбивачів

$$A_m = \frac{\pi}{6} \left[ \sqrt{2} (2 - \cos U_m) \sqrt{1 + \cos U_m} - 2 \right], \quad (4)$$

Для параболоциліндричних відбивачів

$$A_m = b \frac{\sqrt{2}}{3} (\cos U_m + 2) \sqrt{1 - \cos U_m}, \quad (5)$$

де  $b$  – піввісь елементарного еліпса, що визначається за формулою

$$b = p\varphi / (1 + \cos U_m), \quad (6)$$

де  $p$  – фокальний параметр, що визначається виходячи з геометричної форми сонячного концентратора; для рефлекторів параболоциліндричної та параболоїдної форм обчислюється

$$p = 2f, \quad (7)$$

де  $f$  – фокальна довжина.

Як видно, формула Р.Р. Апарісі має універсальний характер і може бути використана для розрахунку параболоциліндричних та параболічних концентраторів.

На рис. 1 зображено концентричну систему, яка збирає випромінювання в точці F в межах тілесного кута [6].

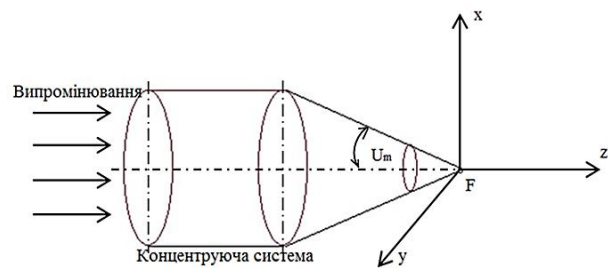


Рис. 1. Схема для розрахунку фокальної опроміненості  
Fig. 1. Scheme for calculation of focal irradiance

Опромінення у фокальній точці виражається інтегралом

$$E_F = \int B(\vec{dw}) dw_z, \quad (8)$$

де  $B(\vec{dw})$  – енергетична яскравість у напрямку  $\vec{dw}$ ,  $\vec{dw}$  – елементарний вектор тілесного кута,  $dw_z$  – проекція  $\vec{dw}$  на оптичну вісь z.

Якщо яскравість постійна в межах тілесного кута, система симетрична та відсутнє затемнення, то опромінення в фокальній точці [6]

$$E_F = \pi B \sin^2 U_m. \quad (9)$$

Енергетична яскравість в у напрямку елементарного тілесного кута [3, 7]

$$B = 1,255 \cdot B_{cp} \cdot \frac{\left( 1 + 1,5641 \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^2} \right)}{2,5641}. \quad (10)$$

З іншого боку, розподіл яскравості по сонячному диску можна представити у вигляді

$$B = R_s B_0. \quad (11)$$

В земних умовах яскравість сонячного диску у центрі в 1,2 рази перевищує середню яскравість

$$B_0 = 1,2 \cdot B_{cp}. \quad (12)$$

Середня яскравість сонячного диска

$$B_{cp} = \frac{E_0}{\pi \varphi_0^2}, \quad (13)$$

де  $\varphi_0$  – кут розкриття елементарного конічного пучка, кутовий радіус Сонця становить 0,004654 рад.

Таким чином, опромінення в фокусі ідеального параболоїдного концентратора [6]

$$E_F^{id} = \frac{1,2}{\varphi_0^2} E_0 R_s \sin^2 U_m. \quad (14)$$

Інтегральний параметр точності ідеальної системи

$$(h_1^{io})^2 = \frac{1,2}{\varphi_0^2} = (236)^2. \quad (15)$$

З урахуванням (15), формула (14) прийме вигляд

$$E_{F(i)}^n = (h_1^{io})^2 E_0 R_s \sin^2 U_m = (236)^2 E_0 R_s \sin^2 U_m. \quad (16)$$

Опромінення в фокусі реального параболоїдного концентратора відповідно

$$E_{F(p)}^n = h_1^2 E_0 R_s \sin^2 U_m. \quad (17)$$

При цьому у фокусі реальної концентруючої системи опромінення буде менше ( $E_F^p < E_F^{io}$ ), так як не всі точки апертури направлять промені в фокус. Реальна апертура виявиться меншою ніж в ідеальному випадку. Однак частіше цей ефект трактується інакше: апертура вважається такою ж, а зменшення опромінення пов'язано зі зменшенням яскравості джерела [6].

Необхідно враховувати, що  $h_1 < h_1^{io}$ . Коefіцієнт  $h_1$  пов'язаний з неідеальністю концентруючої системи,  $\varphi_0$  та  $B_0$ . При фіксованій відстані від Сонця параметр  $h_1$  характеризує ідеальність сонячної концентруючої системи і може бути прийнятим за інтегральний ступінь точності. Інтегральний ступінь точності визначається

$$h_1 = h \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (18)$$

В свою чергу коefіцієнт  $h$  визначається за графіком, представленим на рис. 2 [5].

Радіус-вектор на фокальній площині, відстань від фокуса

$$r = \rho \cdot \sin \varphi, \quad (19)$$

де  $\rho$  – відстань від фокусу до певної точки кривої визначається з рівняння конічного перерізу

$$\rho = \frac{P}{1 + \cos U_m}. \quad (20)$$

Так як  $\sin \varphi \approx \varphi$ , то відповідно  $r = \rho \varphi$ .

Необхідно відзначити, що основною відмінністю, яку необхідно враховувати при обчисленнях  $E_{f(p)}$  та  $E_{f(i)}$  є коefіцієнт  $h_1$ , який при визначенні опромінення в фокусі реального відбивача розраховується з формули (12), а при розрахунку ідеального відбивача приймається сталою величиною і дорівнює 236.

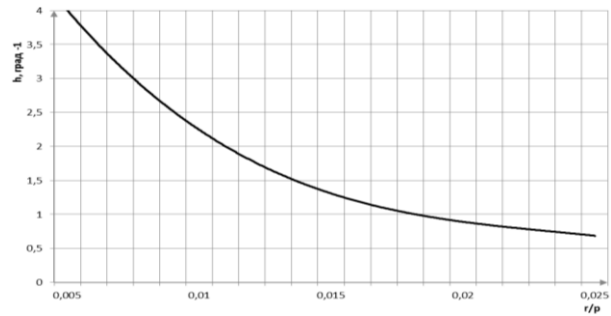


Рис. 2. Залежність коefіцієнту інтегральної точності  $h$  від радіусу фокального зображення  $r/p$

Fig. 2. Dependence of the integral accuracy coefficient  $h$  on the focal image radius  $r/p$

Таким чином, опромінення в фокусі реального параболоциліндричного концентратора визначається виразом

$$E_{f(p)}^{nu} = 8,36 \cdot 10^3 E_0 R_s A_m h^2, \quad (21)$$

а опромінення в фокусі ідеального параболоциліндричного концентратора

$$E_{f(i)}^{nu} = 8,36 \cdot 10^3 E_0 R_s A_m h_1^{io} = 8,36 \cdot 10^3 E_0 R_s A_m 4,12^2 \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 = 8,36 \cdot 10^3 E_0 R_s A_m (236)^2. \quad (22)$$

З урахуванням того, що формули (3) та (17) відображують однакову величину і є тотожними, можна відслідкувати залежність

$$8,36 \cdot 10^3 E_0 R_s A_m h^2 = E_0 R_s \sin^2 U_m \left(h \cdot \frac{180}{\pi}\right)^2,$$

$$8,36 \cdot 10^3 A_m = \sin^2 U_m \left(\frac{180}{\pi}\right)^2,$$

$$A_m = 0,39 \cdot \sin^2 U_m, \quad (23)$$

або

$$\sin U_m = \sqrt{\frac{A_m}{0,39}}. \quad (24)$$

Необхідно зазначити, що дану залежність між  $A_m$  та  $\sin U_m$  доцільно використовувати тільки у випадку параболоїдного концентратора.

Підставивши (23) в (3), відома формула Р.Р. Апарісі прийме вигляд

$$E_{F(p)}^n = 3,26 \cdot 10^3 E_0 R_s \sin^2 U_m h^2. \quad (25)$$

Отримана формула (25) дає змогу розрахувати  $E_{F(i)}$  без додаткового розрахунку коefіцієнта  $A_m$ .



Підставивши (24) в (17) отримаємо

$$E_{F(p)}^n = h_1^2 E_o R_s \frac{A_m}{0,39}. \quad (26)$$

Опромінення в фокусі ідеального параболоїдного концентратора з формул (25) та (26) відповідно

$$E_{F(i)}^n = 3,26 \cdot 10^3 E_o R_s \sin^2 U_m h_{io}^2. \quad (27)$$

$$E_{F(i)}^n = h_{io}^2 E_o R_s \frac{A_m}{0,39}. \quad (28)$$

Максимальну концентруючу спроможність ідеального параболічного сонячного концентратора можна визначити за формулами

$$E_{m(i)}^n = E_o R_s \sin^2 U_m \left(\frac{180}{\pi}\right)^2. \quad (29)$$

$$E_{m(i)}^n = 8,36 \cdot 10^3 E_o R_s A_m. \quad (30)$$

$$E_{m(i)}^n = 3,26 \cdot 10^3 E_o R_s \sin^2 U_m. \quad (31)$$

$$E_{m(i)}^n = E_o R_s \frac{A_m}{0,39} \left(\frac{180}{\pi}\right)^2. \quad (32)$$

Для обрахунку максимальної концентруючої спроможності реального параболічного сонячного концентратора необхідно формули (29) – (32) помножити на коректуючий коефіцієнт  $K$ .

$$E_{m(p)}^n = E_o R_s \sin^2 U_m \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 K. \quad (33)$$

$$E_{m(p)}^n = 8,36 \cdot 10^3 E_o R_s A_m K. \quad (34)$$

$$E_{m(p)}^n = 3,26 \cdot 10^3 E_o R_s \sin^2 U_m K. \quad (35)$$

$$E_{m(p)}^n = E_o R_s \frac{A_m}{0,39} \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 K. \quad (36)$$

Опромінення в фокусі параболоциліндричного концентратора з ідеальним та реальним рефлектором можна вивести з формули (3)

$$E_{F(i)}^{nu} = 8,36 \cdot 10^3 E_o R_s A_m h_{io}^2 \left(\frac{\pi}{180}\right)^2, \quad (37)$$

$$E_{F(p)}^{nu} = 8,36 \cdot 10^3 E_o R_s A_m h^2. \quad (38)$$

Розподіл опроміненості на фокальній площині концентратора

$$E_r = E_p e^{-cr^2}. \quad (39)$$

Ця формула може бути застосована у відношенні параболоциліндричного та параболічного концентратора.

Коефіцієнт в показнику визначається виразом

$$c = 3,283 \cdot 10^3 h^2 \left(\frac{1 + \cos U_m}{p}\right)^2. \quad (40)$$

Для зручності користування вищезазначені формули розрахунку основних енергетичних характеристик занесено в таблиці 1 та 2 для параболоїдного та параболоциліндричного концентраторів відповідно.

Для підтвердження правильності виведених формул, в табл. 3 надано розрахункове порівняння нових формул з існуючими формулами Р.Р. Апарісі та Р.А. Західова. Вихідні параметри параболоїдних концентраторів ПК №1 і ПК №2 взято з [5], ПК №3 – 3 [8].

Таблиця 1. Формули розрахунку основних енергетичних характеристик сонячного параболоїдного концентратора  
Table 1. Formulas for calculating the basic energy characteristics of a solar parabolic concentrator

	Параболоїдний сонячний концентратор	
	Ідеальний рефлектор	Реальний рефлектор
Максимальна концентруюча спроможність $E_m$	$E_{m(i)}^n = E_o R_s \sin^2 U_m \left(\frac{180}{\pi}\right)^2$	$E_{m(p)}^n = E_o R_s \sin^2 U_m \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 K$
	$E_{m(i)}^n = 8,36 \cdot 10^3 E_o R_s A_m$	$E_{m(p)}^n = 8,36 \cdot 10^3 E_o R_s A_m K$
	$E_{m(i)}^n = 3,26 \cdot 10^3 E_o R_s \sin^2 U_m$	$E_{m(p)}^n = 3,26 \cdot 10^3 E_o R_s \sin^2 U_m K$
	$E_{m(i)}^n = E_o R_s \frac{A_m}{0,39} \left(\frac{180}{\pi}\right)^2$	$E_{m(p)}^n = E_o R_s \frac{A_m}{0,39} \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 K$

	Параболі́дний сонячний концентратор	
	Ідеальний рефлектор	Реальний рефлектор
Опромінення у фокальній точці $E_F$	$E_{F(i)}^n = E_0 R_s \sin^2 U_m h_{io}^2$	$E_{F(p)}^n = E_0 R_s \sin^2 U_m h_1^2$
	$E_{F(i)}^{nu} = 8,36 \cdot 10^3 E_0 R_s A_m h_{io}^2 \left(\frac{\pi}{180}\right)^2$	$E_{F(p)}^{nu} = 8,36 \cdot 10^3 E_0 R_s A_m h^2$
	$E_{F(i)}^n = 3,26 \cdot 10^3 E_0 R_s \sin^2 U_m h_{io}^2$	$E_{F(p)}^n = 3,26 \cdot 10^3 E_0 R_s \sin^2 U_m h^2$
	$E_{F(i)}^n = h_{io}^2 E_0 R_s \frac{A_m}{0,39}$	$E_{F(p)}^n = h_1^2 E_0 R_s \frac{A_m}{0,39}$
Опромінення на фокальній площині $E_r$	$E_r = E_F e^{-cr^2}$	

Таблиця 2. Формули розрахунку основних енергетичних характеристик сонячного параболоциліндричного концентратора

Table 2. Formulas for calculating the basic energy characteristics of a solar parabolic cylindrical concentrator

	Параболі́дний сонячний концентратор	
	Ідеальний рефлектор	Реальний рефлектор
Максимальна концентруюча спроможність $E_m$	$E_{m(i)}^{nu} = 298,6 \cdot E_0 R_s \sin U_m$	$E_{m(p)}^{nu} = 298,6 \cdot E_0 R_s \sin U_m K$
Опромінення в фокальній точці $E_F$	$E_{F(i)}^{nu} = 8,36 \cdot 10^3 E_0 R_s A_m h_{io}^2 \left(\frac{\pi}{180}\right)^2$	$E_{F(p)}^{nu} = 8,36 \cdot 10^3 E_0 R_s A_m h^2$
Опромінення на фокальній площині $E_r$	$E_r = E_F e^{-cr^2}$	

Таблиця 3. Порівняння методик розрахунку основних енергетичних характеристик сонячних параболоїдних концентраторів (ПК)

Table 3. Comparison of the methods for calculating the basic energy characteristics of solar parabolic concentrators (PCs)

	ПК №1	ПК №2	ПК №3
Фокальний параметр $r$ , м	10,72	1,694	1,2
Інтегральний параметр точності $h$ , град <sup>-1</sup>	0,9	4	2,08
Максимальний кут розкриття концентратора $U_{max}$ , град	49,7	61,87	64
Падюча радіація $E_0$ , Вт/м <sup>2</sup>	814	814	814
Коефіцієнт відбиття $R_s$	0,8	0,8	0,8
Геометричний коефіцієнт $A_{max}$	0,24	0,33	0,34
Опромінення в фокусі реального відбивача за формулою (3) Р.Р. Анарісі, Вт/м <sup>2</sup>	$1,05 \cdot 10^6$	$2,84 \cdot 10^7$	$8,12 \cdot 10^6$
Опромінення в фокусі реального відбивача за формулою (17) Р.А. Західова, Вт/м <sup>2</sup>	$1,01 \cdot 10^6$	$2,66 \cdot 10^7$	$8,01 \cdot 10^6$
Опромінення в фокусі реального відбивача за новою формулою (25), Вт/м <sup>2</sup>	$1,00 \cdot 10^6$	$2,64 \cdot 10^7$	$8,00 \cdot 10^6$
Опромінення в фокусі реального відбивача за новою формулою (26), Вт/м <sup>2</sup>	$1,06 \cdot 10^6$	$2,86 \cdot 10^7$	$8,07 \cdot 10^6$

З отриманих результатів очевидно, що застосування спрощених формул (25) та (26) є доцільним.

Нижче приведено максимальні опроміненості, отримані у фокальній точці параболоїдного (рис. 3) та параболоциліндричного (рис. 4) сонячного концентратора.

Розроблено програму розрахунку на основі вищенаведених математичних співвідношень,

яку доцільно використовувати при проектуванні та експлуатації сонячних параболоїдних та параболоциліндричних концентраторів. Блок-схема програми представлена на рис. 5.

Інтерфейс створеної програми для розрахунку енергетичних характеристик параболоїдного та параболоциліндричного сонячного концентратора зображено на рис. 6 та рис. 7 відповідно.

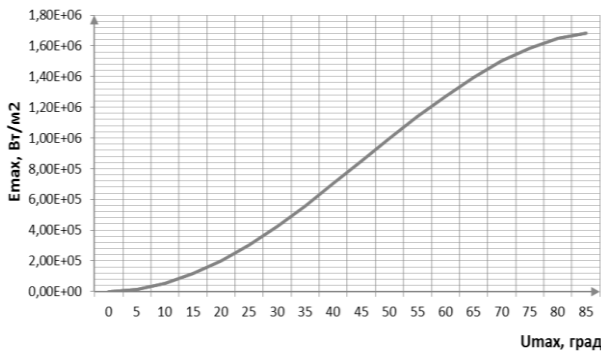


Рис. 3. Максимальна опроміненість параболоїдного сонячного концентратора в залежності від максимального кута розкриття  $U_{max}$ .

Fig. 3. Max irradiance of solar parabolic concentrator, depending on the max opening angle  $U_{max}$ .

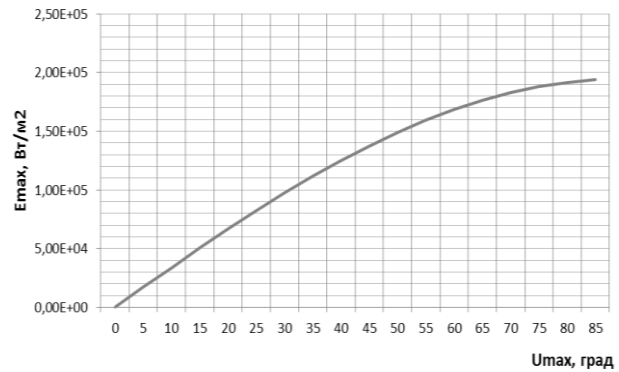


Рис. 4. Максимальна опроміненість параболциліндричного сонячного концентратора в залежності від максимального кута розкриття  $U_{max}$ .

Fig. 4. Maximum irradiance of solar parabolic cylindrical concentrator, depending on the maximum opening angle  $U_{max}$ .

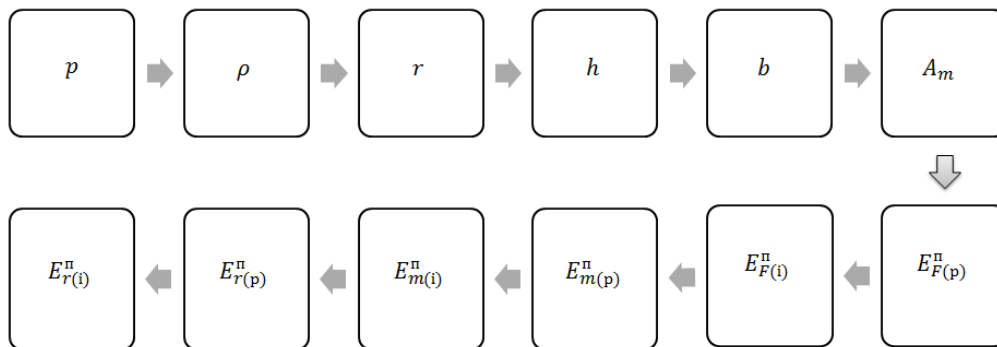


Рис. 5. Блок-схема алгоритму розрахунку основних енергетичних характеристик концентратора сонячної енергії.

Fig. 5. Block diagram of the algorithm for calculating the basic energy characteristics of the solar energy concentrator.



Рис. 6. Програма розрахунку параболоїдного сонячного концентратора

Fig. 6. Program for calculating solar parabolic concentrator

Вхідними параметрами є: фокусна відстань, максимальний кут розкриття, коефіцієнт відбиття, падаюча радіація, коректуючий коефіцієнт.

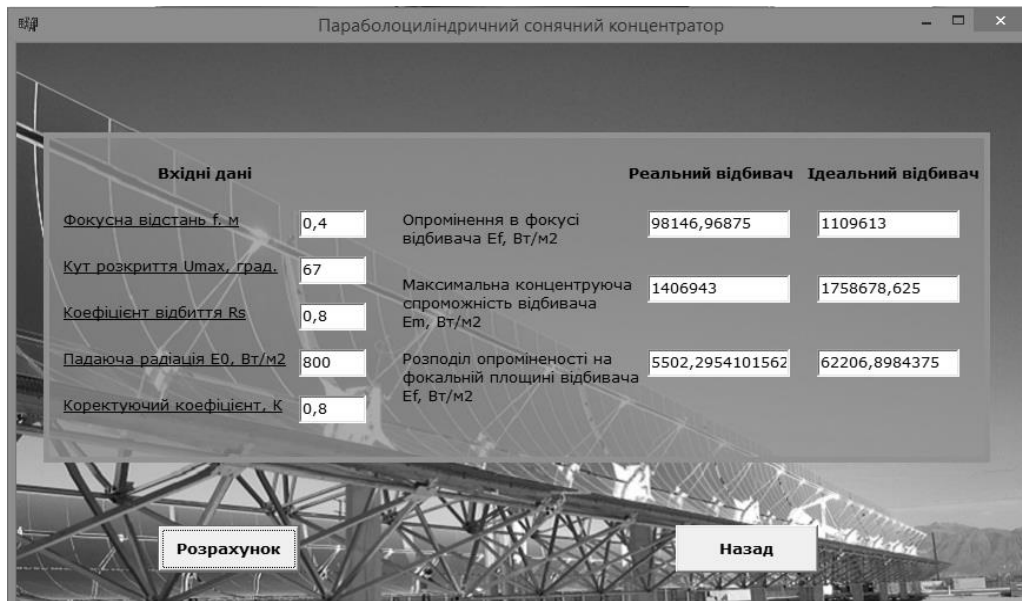


Рис. 7. Програма розрахунку параболоциліндричного сонячного концентратора.

Fig. 7. Program for calculating solar parabolic cylindrical concentrator.

**Висновки.** Проведено дослідження різних методик визначення основних енергетичних характеристик сонячних концентраторів. Запропоновано новий підхід розрахунку параболоїдного концентратора. Розроблено універсальну програму, яку доцільно використовувати при проектуванні і експлуатації сонячних концентраторів.

Based on UDS-1 Machine. Proceedings of 8-th International Green Energy Conference (IGEC-8). Kyiv. June 17-19. 2013. Pp. 214-216.

**ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПАРАБОЛОИДНОГО И ПАРАБОЛОЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КОНЦЕНТРАТОРОВ ДЛЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА**

В.П. Студенец, канд. техн. наук, доцент, К.А. Славинская, магистр

1. Студенець В.П., Пасічний В.В., Остапенко С.О., Миротюк П.А. Дослідницький стенд «сонячний концентратор – двигун Стірлінга» та його базові характеристики. Відновлювана енергетика. 2011. №1(24). С. 5-10.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Институт энергосбережения и энергоменеджмента

2. Студенець В.П., Пасічний В.В., Птуха А.А. Базові характеристики дослідницького стенду «офсетний сонячний концентратор – двигун Стірлінга». Відновлювана енергетика. 2013. №1(32). С. 31-36.

Концентраторы солнечной энергии приобретают всё большее значение в связи с необходимостью решения важных научных и инженерных задач при создании новой техники и использовании солнечной энергии.

3. Захидов Р.А., Клычев Ш.И. Максимальная концентрирующая способность параболоцилиндрических зеркал. Гелиотехника. 1973. Выпуск 4. С. 46-47.

Основными характеристиками зеркал, концентрирующих прямое солнечное излучение, являются облученность в фокальной плоскости  $E_f$  и максимальная облученность  $E_{max}$  в фокусе зеркала. При проектировании мощных гелиоустановок возникает необходимость использования нового программного обеспечения для расчета технических характеристик солнечных концентраторов.

4. Акбаров Р.Ю. Аналитическая формула для расчета энергетических характеристик солнечного параболоцилиндрического концентратора. Республиканская Конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», посвященной 100-летию академика С.А. Азимова. Ташкент. 2014. URL: <https://www.twirpx.com/file/1495729/>.

Рассмотрен вопрос создания универсального программного обеспечения для расчета основных энергетических характеристик параболоидных и параболоцилиндрических концентраторов солнечной энергии в среде Windows. Обобщенная математическая модель обеспечивает реализацию этапов расчета и проектирования с учетом энергетических характеристик источника излучения, неточности отражающих поверхностей и др.

5. Апариси Р.Р. Экспериментальная установка для получения высоких температур. Использование солнечной энергии. Вып.1. Изд. АН СССР. 1957. С. 151-162.

Представлен анализ существующих моделей расчета параметров параболического и параболоцилиндрического концентраторов. По результатам исследования определены

6. Захидов Р.А. Технология и испытания гелиотехнических концентрирующих систем. Ташкент. Изд. «Фан» УзССР. 1978. 184 с.

7. Жозе П. Распределение плотности потока энергии в фокальном изображении солнечной печи. Солнечные высокотемпературные печи. М. Изд. иностр. лит. 1960. С. 229-239.

8. V.P. Stoudenets, N.N. Tsyryn, S.S. Dovgyi, N.O. Yemanova. The Characteristics of Solar Dish/Stirling System



отличия между методиками, рассчитаны ключевые параметры, определены различия между подходами.

Создана математическая модель расчета основных характеристик для идеального и реального концентратора солнечной энергии. Приведены отличия и особенности расчета параболических и параболоцилиндрических солнечных концентраторов. Смоделирован пошаговый алгоритм расчета характеристик солнечного концентратора.

Построен график зависимости максимальной облученности параболического и параболоцилиндрического солнечного концентратора от максимального угла раскрытия.

Разработанную программу можно применять в современной гелиотехнической практике, связанной с проектированием мощных гелиоустановок. Библ. 8, табл. 3, рис. 7.

**Ключевые слова:** параболический концентратор, параболоцилиндрический концентратор, двигатель Стирлинга, возобновляемые источники энергии.

## REFERENCES

1. Stoudenets V.P., Pasichnyi V.V., Ostapenko S.O., Myrotiuk P.A. Doslidnytskyi stend «soniachnyi kontsentrator – dvyhun Stirlinha» ta yoho bazovi kharakterystyky. [Research unit “solar concentrator - Stirling engine” and its basic characteristics]. Vidnovljuvana energetyka. 2011. № 1(24). Pp. 5-10 [in Ukrainian].

2. Stoudenets V.P., Pasichnyi V.V., Ptukha A.A. Bazovi kharakterystyky doslidnytskoho stendu “ofsetnyi soniachnyi kontsentrator – dvyhun Stirlinha”. [The basic characteristics of the research unit “offset solar concentrator - Stirling engine”]. Vidnovljuvana energetyka. 2013. № 1(32). Pp. 31-36 [in Ukrainian].

3. Zahidov R.A., Klyichev Sh.I. Maksimalnaya kontsentriruyuschaya sposobnost parabolotsilindricheskikh zerkal. [Maximum concentration capacity of parabolic through mirrors]. Geliotekhnika. 1973. № 4. Pp. 46-47 [in Russian].

4. Akbarov R.Yu. Analiticheskaya formula dlya rascheta energeticheskikh harakteristik solnechnogo parabolotsilindricheskogo kontsentratora. [Analytical formula for calculation the energetic characteristics of the solar parabolic through collector]. Respublikanskaya Konferentsiya «Fundamentalnyie i prikladnyie voprosyi fiziki», posvyaschennoy 100-letiyu akademika S.A.Azimova. Tashkent. 2014. Retrieved from <https://www.twirpx.com/file/1495729/> [in Russian].

5. Aparisi R.R. Eksperimentalnaya ustanovka dlya polucheniya vyisokikh temperature. [Experimental setup for high temperatures]. Ispolzovanie solnechnoy energii. Vol. 1. Izd. AN SSSR. 1957. Pp. 151-162 [in Russian].

6. Zahidov R.A. Tehnologiya i ispytaniya geliotekhnicheskikh kontsentriruyuschih system. [Technology and testing of heliotechnical concentrating systems]. Tashkent. Izd. «Fan» UzSSR. 1978. 184 p. [in Russian].

7. Zhoze P. Raspredelenie plotnosti potoka energii v fokalnom izobrazhenii solnechnoy pechi. [The flux through the focal spot of a solar furnace]. Solnechnyye vyisokotemperaturnyye pechi. Moscow. Izd. inostr. lit. 1960. Pp. 229-239 [in Russian].

8. V.P. Stoudenets, N.N. Tsyryn, S.S. Dovgyi, N.O. Yemanova. The Characteristics of Solar Dish/Stirling System Based on UDS-1 Machine. Proceedings of 8-th International Green Energy Conference (IGEC-8). Kyiv. June 17-19. 2013. Pp. 214-216 [in English].

Стаття надійшла до редакції 02.02.19  
Остаточна версія 12.03.19

XVII МІЖНАРОДНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА

# ЕНЕРГЕТИКА В ПРОМИСЛОВІСТІ '2019

ЕНЕРГЕТИЧНЕ, ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ І ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ, ПІДСТАНЦІЙ,  
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ, СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

5–7 листопада

Технічний партнер: *Росеті Україна*

ОРГАНІЗАТОР:  
МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР  
ЗА ПІДТРИМКИ:  
МІНІСТЕРСТВА ЕНЕРГЕТИКИ  
ТА ВУГЛЯНОЇ ПРОМИСЛОВІСТІ УКРАЇНИ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР  
Киев, Броварской пр-т, 15  
М "Левобережная"  
тел./факс: (044) 201-11-57  
e-mail: [lyudmila@iec-expo.com.ua](mailto:lyudmila@iec-expo.com.ua)  
[www.iec-expo.com.ua](http://www.iec-expo.com.ua), [www.мвц.укр](http://www.мвц.укр)