

УДК 621.472

Птуха А.А., Студенець В.П.

Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ

СОНЯЧНА ЕНЕРГОУСТАНОВКА “ОФСЕТНИЙ КОНЦЕНТРАТОР – ДВИГУН СТІРЛІНГА”

Розглянуто питання перетворення сонячної енергії в механічну на базі створеного дослідницького стенду «офсетний сонячний концентратор – двигун Стірлінга». Наведено методика розрахунку та здійснено аналіз основних характеристик складових елементів стенду.

Рассмотрен вопрос преобразования солнечной энергии в механическую на базе созданного исследовательского стенда «офсетный солнечный концентратор – двигатель Стирлинга». Изложена методика расчета и выполнен анализ основных характеристик составных элементов стенда.

The solar-mechanical energy conversion on the base of assembled research unit “offset solar concentrator – Stirling engine” is considered. The design procedure is observed and the characteristic analysis of unit component elements is performed.

Робота стосується дослідження процесу перетворення енергії сонячного випромінювання у механічну енергію на базі установки «офсетний сонячний концентратор (ОСК) – двигун Стірлінга (ДС)». Метою роботи є створення діючого експериментального стенду та дослідження основних характеристик його складових елементів з метою подальшого перетворення отриманої механічної енергії в електроенергію шляхом поєднання ДС з електрогенератором.

Роботу проведено на лабораторній базі інституту енергозбереження НТУУ «КПІ», зокрема, використано офсетний сонячний концентратор, який було створено з супутникової антени, обклеєної дзеркальною плівкою Agosal з коефіцієнтом відбиття 0,6. Як динамічний перетворювач було використано діючий макетний зразок двигуна Стірлінга УДС-1 [1]. У ході експериментальних досліджень вимірювались наступні параметри: повна сонячна радіація (піранометр Янішевського), температура поверхні теплоприймача (ТХА-термопара + цифровий мультиметр DT838), частота обертання ДС (інфрачервоний фототахометр TIF780). Теоретичний аналіз базувався на роботах [2-5], методика визначення ефективності процесу перетворення була подібною до [6, 7].

1. Загальні відомості

Рис. 1 пояснює як «вирізають» офсетні і симетричні концентратори із первинного параболоїда. Первинний параболоїд – поверхня обертання параболи $y = \frac{x^2}{4F}$, де F -фокусна відстань. Точка фокуса розташована на осі Y на відстані F від початку координат. Параболоїдний офсетний концентратор вирізають з первинного параболоїда січним циліндром, вісь і твірна якого паралельні осі вихідного параболоїда. Якщо січний циліндр розташовується осі первинного параболоїда, то отримуємо симетричний концентратор. Звичайний офсетний концентратор відповідає варіанту, при якому твірна січного циліндра співпадає з віссю первинного параболоїда. Точка фокуса F і напрям на падаюче сонячне

випромінювання залишаються незмінними. Діаметр січного циліндра буде діаметром симетричного концентратора і меншою віссю еліпса розкриву офсетного концентратора. Якщо поглянути на розкрив прямо, то отримаємо еліпс: його утворюють лінія перетину параболоїда обертання і циліндра, паралельного осі обертання.

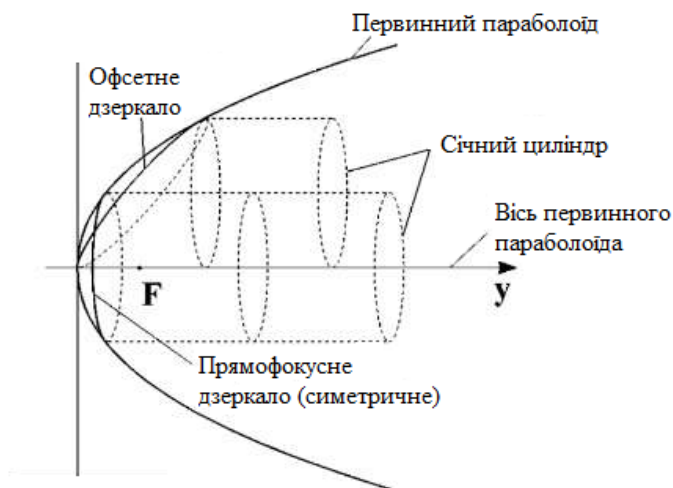


Рис. 1. Утворення симетричного і офсетного дзеркал із вихідного параболоїда

2. Розрахунок параметрів офсетного концентратора

Обравши в якості концентратора сонячної енергії офсетний концентратор з діаметром меншої осі 0,8 м, визначимо інші його параметри. Для максимально можливого використання всієї площі концентратора, відношення $\frac{F}{D}$ має бути 0,5-0,6. При відношенні 0,55 фокусна відстань складає 0,44 м. Апертурний кут на меншу вісь складає 90° , а на більшу змінюється в діапазоні 80° - 90° . В даному випадку кут складає 85° , так як $\frac{F}{D}=0,55$. Виходячи із уже відомих параметрів, більша вісь офсетного дзеркала зазвичай більша від меншої на 10% і визначається:

$$d = \frac{D \cdot (16 \cdot F^2 + D^2)}{4 \cdot F}.$$

Трикутник розмірів офсетного концентратора зображено на рис. 2, а формули для визначення цих параметрів наведені нижче:

$$a = d; \quad b = F + \frac{D^2}{4 \cdot F}; \quad c = F.$$

Для підвищення ступеня концентрації на теплоприймачі, потрібно зменшувати площу фокальної плями, тобто орієнтувати площину приймача якомога перпендикулярніше до точки максимальної глибини концентратора. Ця точка знаходиться наступним чином: сторону b ділять пополам і з її середини паралельно осі параболоїда, тобто паралельно стороні трикутника c , проводять пряму лінію, яка перетинає параболоїд в точці P . Ця точка і є точкою максимальної глибини.

3. Розрахунок і порівняння площ офсетного і симетричного концентраторів

Сторона c трикутника розмірів офсетного концентратора, являється віссю

первинного параболоїда, сторона b – проекцією частини параболоїда на вісь абсцис, а сам концентратор – частиною бічної площі вихідного параболоїда (рис. 3). Тоді, знаючи параметри нашого дзеркала знайдемо рівняння первинного параболоїда.

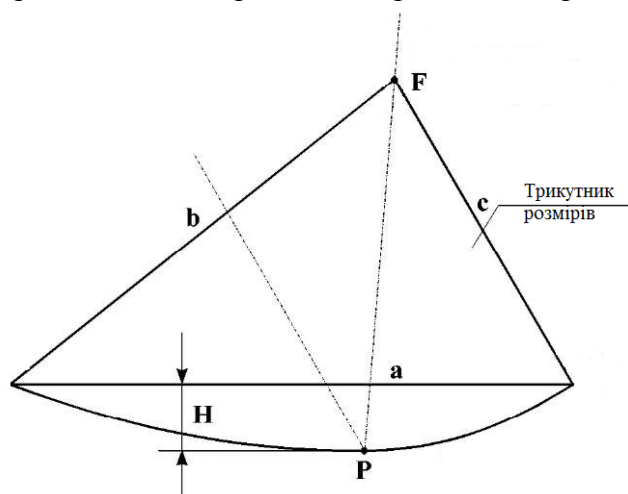


Рис. 2. Трикутник розмірів офсетного концентратора

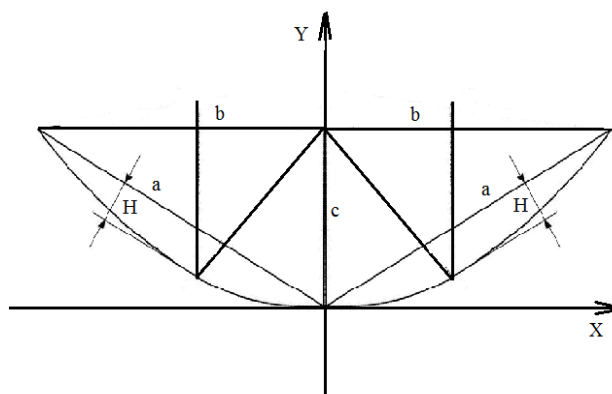


Рис. 3. Представлення вигляду вихідного параболоїда.

Загальний вигляд рівняння параболі:

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c.$$

Розв'язавши рівняння, отримаємо значення параметрів a , b і c :

$$a = 0,6875; \quad b = 0; \quad c = 0.$$

Рівняння вихідної параболі:

$$y = 0,6875 \cdot x^2.$$

Проведемо порівняльний розрахунок бічних площ вихідного параболоїда, офсетного концентратора і симетричного концентратора вирізаного тим же січним циліндром, що і офсетний.

3.1. Розрахунок первинного параболоїда

Для розрахунку площі бічної поверхні вихідного параболоїда потрібно знати рівняння даного параболоїда та січного циліндра. Рівняння січного циліндра в системі координат хуз представлено нижче:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

де a і b – менша і більша півосі еліпса, що лежить в основі циліндра.

Для даного параболоїда, який являється тілом обертання, а в основі лежить круговий циліндр, отримаємо формулу:

$$1,375 \cdot z = x^2 + y^2.$$

Для визначення бічної площі параболоїда скористаємося формулою подвійного інтеграла:

$$S = \iint_{\Omega} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} dx dy,$$

де $z = \frac{x^2}{1,375} + \frac{y^2}{1,375}$.

$$x^2 + y^2 = 0,8^2.$$

Підставляючи отримані значення у вираз подвійного інтеграла і переходячи до полярної системи координат отримаємо значення площі:

$$x^2 + y^2 = r^2,$$

$$\begin{aligned} S &= \iint_{\Omega} \sqrt{1 + \left(\frac{2x}{1,375}\right)^2 + \left(\frac{2y}{1,375}\right)^2} dx dy = \iint_{\Omega} \sqrt{1 + (2,116 \cdot (x^2 + y^2))} dx dy = \\ &= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{0,8} \sqrt{1 + 2,116 \cdot r^2} \cdot r \cdot dr = 1,75 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Аналогічно, як і для первинного параболоїда, проведемо розрахунок бічної площі симетричного концентратора, вирізаного січним циліндром з радіусом 0,4 м.

$$S = \iint_{\Omega} \sqrt{1 + \left(\frac{2x}{1,375}\right)^2 + \left(\frac{2y}{1,375}\right)^2} dx dy \approx 1,1 \text{ м}^2.$$

Розрахунок офсетного концентратора такий як і для двох попередніх випадків, однак радіус січного циліндра складає 0,4 м, але межі інтегрування змінюються в межах $[0;0,8]$, а

полярний кут змінюється в межах $\left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right]$:

$$S = \iint_{\Omega} \sqrt{1 + \left(\frac{2x}{1,375}\right)^2 + \left(\frac{2y}{1,375}\right)^2} dx dy \approx 0,8 \text{ м}^2.$$

4. Розрахунок ступеня концентрації

Сонячні промені падають на параболоїдний концентратор у вигляді конуса з тілесним кутом 32° відповідно до рис. 4.

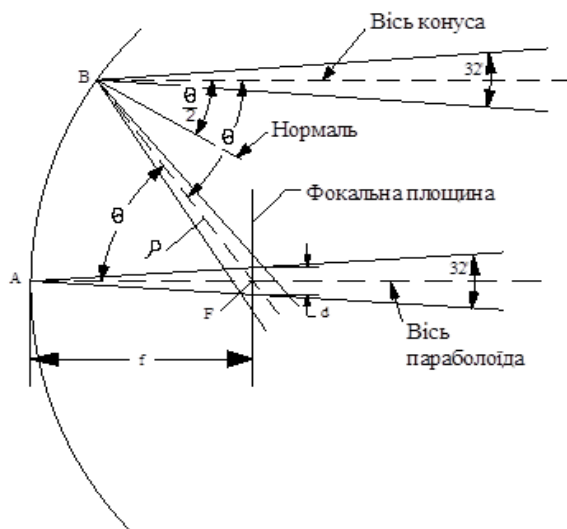


Рис. 4. Схема відображення сонячного проміння в фокус параболоїдного концентратора
 Потужність, яка може бути отримана з елементарного кільця концентратора на зображенні сонця, визначається:

$$\Delta P = \left(\frac{f^2}{\rho^2} \cos \theta \right) \left(p_0 \cdot \Delta S \cdot \cos \frac{\theta}{2} \right),$$

$$\Delta P = p_0 \cdot \frac{f^2}{\rho^2} \cdot \cos \theta \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \Delta S,$$

де f – фокальна відстань;

ρ – відстань від фокуса до будь-якої точки концентратора;

p_0 – сонячна стала;

ΔS – площа елементарного кільця.

Площа елементарного кільця визначається:

$$\Delta S = 2\pi \cdot \rho \cdot \sin \theta \cdot \sqrt{(\Delta \rho)^2 + \rho^2 (\Delta \theta)^2}.$$

Відповідно до методики розрахунку симетричного концентратора [6] визначаються основні характеристики для отримання ступеня концентрації.

Площа кільця:

$$\Delta S = 2\pi \cdot \rho^2 \cdot \sin \theta \cdot \sec \frac{\theta}{2} \cdot \Delta \theta.$$

Повна можлива потужність, яка проходить через зображення:

$$P = \pi \cdot p_0 \cdot f^2 \cdot \sin^2 \theta.$$

Повна наявна потужність:

$$P = \pi \cdot \eta_a \cdot \eta_r \cdot p_0 \cdot f^2 \cdot \sin^2 \theta.$$

Питома потужність:

$$p = 46,1 \cdot 10^3 \cdot \eta_a \cdot \eta_r \cdot p_0 \cdot \sin^2 \theta.$$

Ступінь концентрації:

$$C = \frac{p}{\eta_a \cdot \eta_r \cdot p_0} = 46,1 \cdot 10^3 \cdot \sin^2 \theta.$$

Для приймача у вигляді плоскої пластини, що підкоряється кону Ламберта:

$$C = 30,7 \cdot 10^3 (1 - \cos^3 \theta).$$

Коефіцієнт концентрації для приймача у вигляді плоскої пластини, що підкоряється закону Ламберта:

$$\eta_c = \frac{\varepsilon_n}{6} (1 + \cos \theta)(1 + \cos \theta + \cos^2 \theta).$$

Ступінь концентрації та коефіцієнт концентрації для симетричного та офсетного концентраторів представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Тип концентратора	C	η_c
Симетричний	30679,7	0,12
Офсетний	30057,1	0,17

Залежності ступеня концентрації та коефіцієнта концентрації від кута розкриву дзеркала представлені на рис.5 та рис.6.

Як видно, для симетричних сонячних концентраторів, ступінь концентрації являється доволі зручною безрозмірною характеристикою їх ефективності. Проте для офсетного концентратора дана послідовність розрахунків не може бути використаною, тому що дане дзеркало не є симетричним, а отже в перерізі має вигляд еліпса, що призводить до зміщення фокуса відносно осі, а це в свою чергу призводить до різної крутизни форми концентратора і різної швидкості зміни кута θ від осі до периферійної частини концентратора. Аналізуючи дану ситуацію, для порівняння різних концентраторів, можна перейти до значення густини теплового потоку з таких міркувань:

- густина теплового потоку як і ступінь концентрації змінюється з віддаленням від осі концентратора до його периферійної частини;
- густина теплового потоку являється величиною залежною від площі бічної поверхні концентратора, що дозволяє відмовитися від функціональної залежності даної величини від форми дзеркала і його складного розрахунку.

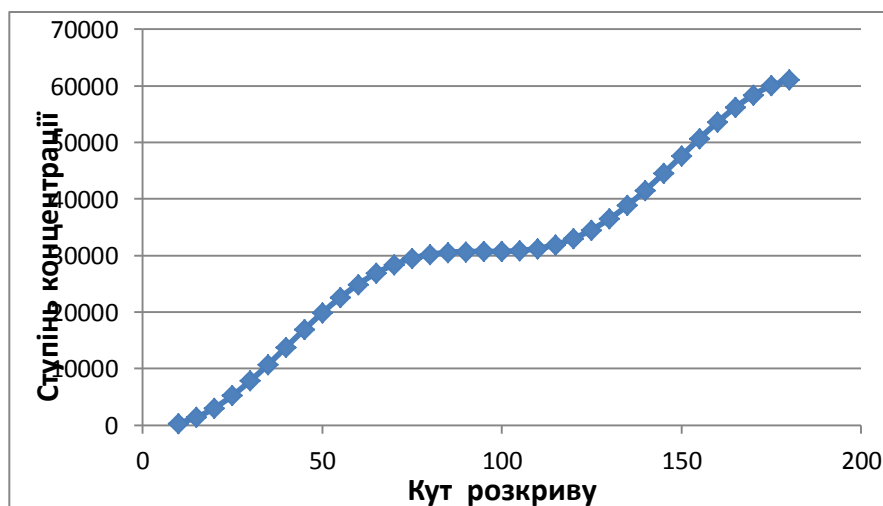


Рис. 5. Залежність ступеня концентрації від кута розкриву

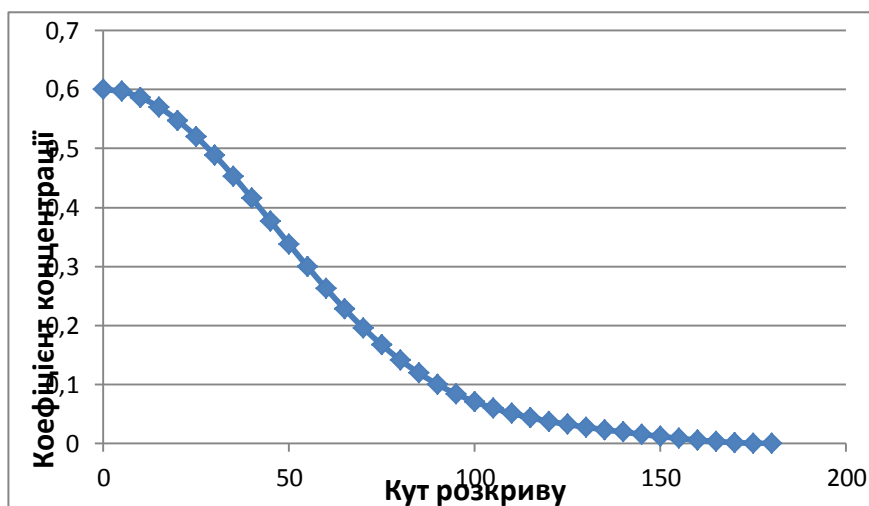


Рис. 6. Залежність коефіцієнта концентрації від кута розкриття

5. Розрахунок густини теплового потоку

Густина прямої сонячної радіації E_C (вимірюється піранометром).

Тепловий потік, що падає на концентратор:

$$Q_{\text{пад}} = E_C \cdot A_K = q_a \cdot A_K,$$

де: $A_K = \frac{\pi D^2}{4}$ – площа міделя концентратора,

D - діаметр концентратора.

Тепловий потік, що потрапляє в теплоприймач. У ролі теплоприймача виступає плоска поверхня – торець циліндра витискувача ДС:

$$Q_S = \eta_a \eta_r q_0 (\pi f^2) \sin^2 \theta = \eta_r q_a (214,6)^2 F_S \sin^2 \theta = \eta_r (214,6)^2 \sin^2 \theta \cdot \frac{F_S}{A_K} Q_{\text{пад}},$$

де: η_a - доля ідеальної сонячної сталої, що відповідає місцезнаходженню концентратора і враховує втрати в атмосфері;

η_r - коефіцієнт відбиття, що характеризує втрати за рахунок відбиття або поглинання оптичної системи;

q_0 - сонячна стала;

$q_a = E_C$ - дійсний потік сонячної радіації у місці розташування концентратора;

$F_S = \pi \frac{f^2}{(214,6)^2}$ - площа зображення Сонця;

густина потоку:

$$q_s = \frac{Q_S}{F_S} = \eta_a \eta_r q_0 (214,6)^2 \sin^2 \theta = \eta_r q_a (214,6)^2 \sin^2 \theta = \eta_r (214,6)^2 \sin^2 \theta \cdot E_C.$$

повний потік:

$$Q_S = N_t = A A_K E_C = A Q_{\text{пад}},$$

де: N_t - теплова потужність концентратора,

A - коефіцієнт ефективності оптичної системи, який дорівнює відношенню енергії, отриманої у фокальній області концентратора, до падаючої на дзеркало (у випадку

прямого наведення концентратора на Сонце можна прийняти рівним 0,6-0,7):

$$A = \frac{Q_{BX}}{Q_{ПАД}} = \rho_3 \eta_{СЛ},$$

де: ρ_3 – коефіцієнт відбиття зеркальної поверхні концентратора ($\rho_3=0,55$),

$\eta_{СЛ}$ – коефіцієнт ефективності системи слідування ($\eta_{СЛ}=1$),

$\eta_{ЮСТ}$ – коефіцієнт, що враховує юстировку дзеркала ($\eta_{ЮСТ}=0,9$).

Розрахунок:

$$Q_S = 0,5 \cdot Q_{ПАД},$$

$$q_S = \frac{Q_S}{F_f},$$

де $F_f = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ - площа фокальної плями.

Оскільки офсетний концентратор являється частиною первинного параболоїдного концентратора, то можна зробити припущення, що середня густина теплового потоку по площі параболоїда буде рівна середній густині теплового потоку офсетного концентратора.

$$Q_{BX} = q_{BX} \cdot F_H,$$

де $F_H = 3,42 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ – площа поверхні нагріву.

Температура на поверхні нагріву теплоприймача T_{BX} :

$$T_{BX} = \left(\frac{3q_{BX}}{2\varepsilon_n \sigma_0} \right)^{0,25},$$

де $\varepsilon_n = 0,6$ - ступінь чорноти поверхні нагріву (латунь, окислена при нагріванні до 600°C).

Поглинтий тепловий потік – тепловий потік, переданий робочому тілу (РТ):

$$q_{РТ} = \frac{2}{3} \varepsilon_n \frac{1 - \cos^3 \theta}{1 - \cos^2 \theta} q_{BX},$$

$$Q_{РТ} = q_{РТ} \cdot F_H.$$

Температура стінки теплоприймача – робочого тіла (для плоского приймача, коли $\varepsilon = \varepsilon_n \cos \theta$):

$$q_{РТ} = \frac{2}{3} (214,6)^2 \eta_a \eta_r q_0 \alpha_n (1 - \cos^3 \theta) = \frac{2}{3} \varepsilon_n \sigma T_m^4,$$

$$T_{РТ} = \left(\frac{3q_{РТ}}{2\varepsilon_n \sigma_0} \right)^{0,25}.$$

За результатами розрахунку побудовано діаграми на рис. 7.

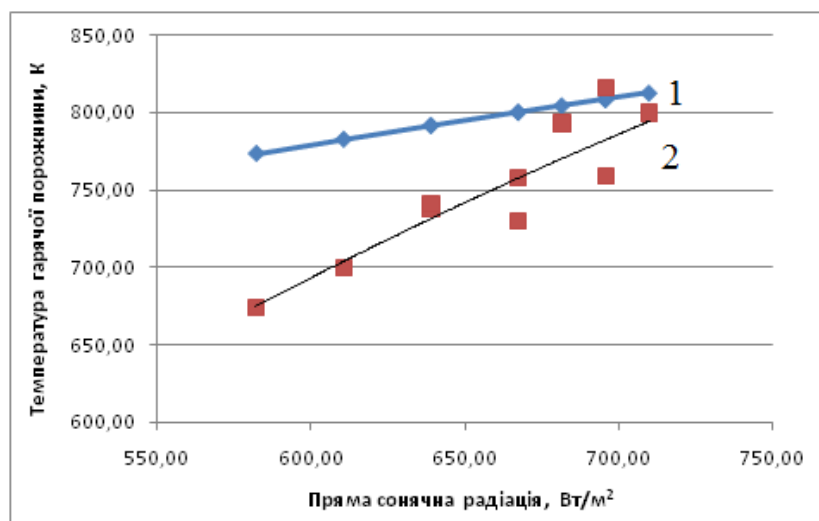


Рис. 7. Порівняння температури гарячої порожнини ДС при теоретичному підході до розрахунку (залежність 1) і теоретично-експериментальному підході (залежність 2)

Термодинамічний аналіз і розрахунок характеристик ДС за ізотермічною моделлю проведено за методом Шмідта, базуючись на методиці [6]. Результати розрахунку відображено на рис. 8 і рис. 9.

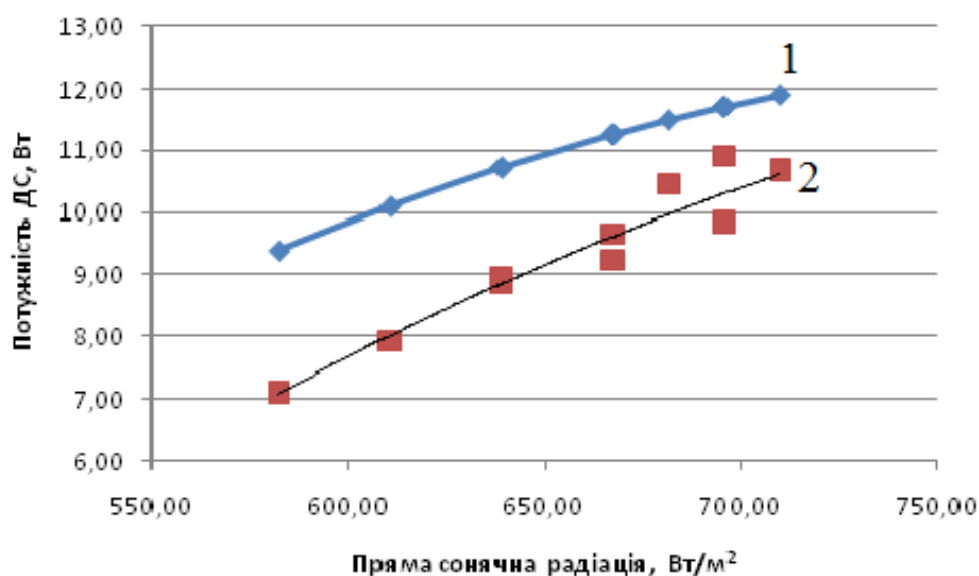


Рис. 8. Залежність потужності двигуна Стірлінга від прямої сонячної радіації: 1- теоретичний підхід, 2- експериментальний підхід.

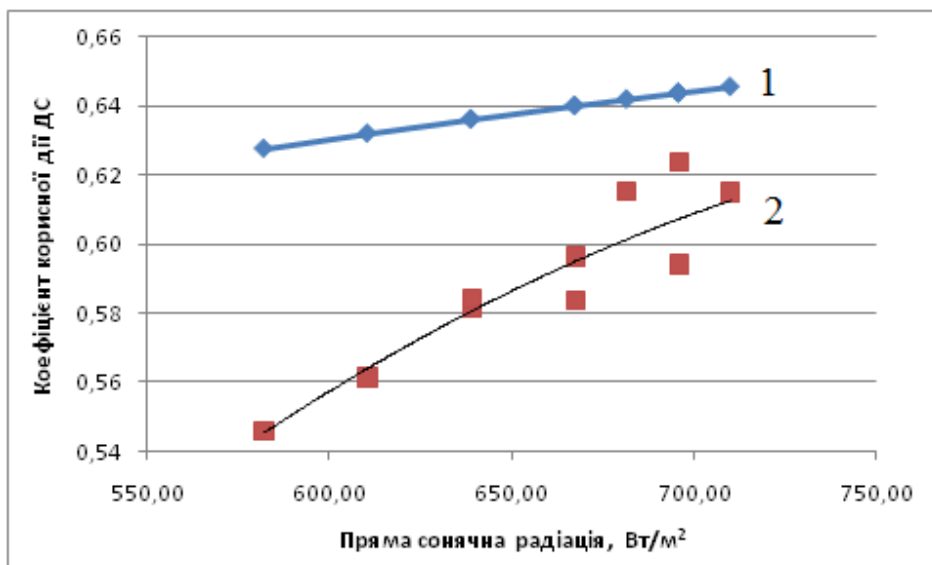


Рис. 9. Залежність коефіцієнта корисної дії двигуна Стірлінга від прямої сонячної радіації: 1- теоретичний підхід, 2- експериментальний підхід.

Розрахунок ефективності сонячної енергетичної установки (СЕУ) в цілому в залежності від густини прямої сонячної радіації.

$$\eta_{CEV} = \eta_{III} \eta_t,$$

де: η_{CEV} - коефіцієнт перетворення сонячної енергетичної установки,

η_{III} - коефіцієнт ефективності теплоприймача,

η_t - ккд двигуна Стірлінга.

За викладеною методикою було проведено розрахунки базових характеристик основних елементів СЕУ та ефективності процесу перетворення. Для цього використовувались як суто теоретична методика, так і підхід, що базувався на експериментальних даних. Результати наведено на рис. 10.

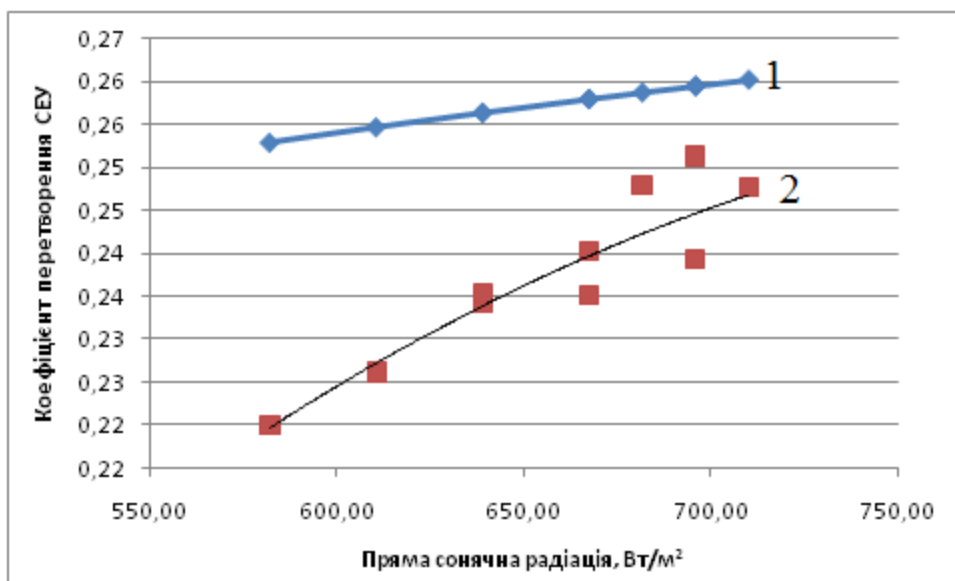


Рис. 10. Залежність коефіцієнта перетворення СЕУ від прямої сонячної радіації: 1- теоретичний підхід, 2- експериментальний підхід.

Висновки.

Отримані результати дозволили встановити ефективність роботи як двигуна Стірлінга, так і установки в цілому в залежності від величини прямої сонячної радіації. В цілому спостерігається кореляція між теоретичними і дослідними даними, що свідчить про коректність застосованих теоретичного та експериментального підходів. Деяка розбіжність у значеннях температури гарячої зони свідчить про необхідність подальшого експериментального фіксування температури, в тому числі при найбільш можливих значеннях температури, для дослідження розбіжності між теоретичними та експериментальними даними.

Література.

1. Долганов К.Е., Лисица В.П. Учебно-демонстрационный двигатель Стирлинга УДС-1. // Двигателестроение. – 1989. – №5. – С. 28, 33.
2. Niester Nevin K., Tietz Thomas E., Loh Eugene, Duwez Pol. Theoretical considerations on performance characteristics of solar furnaces // Jet Propulsion. Journal of the American Rocket Society. – 1957. – vol.27. – №5. – P. 507-513, 546.
3. Солнечные высокотемпературные печи / Сб. переводов под ред. В.А. Баума. – М.: Изд. иностр. л-ры. – 1960. – 471 С.
4. Пасичный В.В., Цыганенко В.С., Пасичная М.С., Еlicheva Г.С. Создание солнечных высокотемпературных энергоустановок из отработанных радиоантенн // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2007. – №6. – С. 9-15.
5. Ридер Г., Хупер Ч. Двигатели Стирлинга: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 464 с., ил.
6. Студенець В.П., Миротюк П.А. Дослідження параметрів динамічного перетворювача в установці «сонячний імітатор – двигун Стірлінга – електрогенератор» // Відновлювана енергетика ХХІ століття. Матеріали 10-ї ювілейної міжнародної науково-практичної конференції. АР Крим, смт. Миколаївка, 14-18 вересня 2009 р.
7. Студенець В.П., Пасичний 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.