

УДК 621.472

В.П.Студенець, канд.техн.наук (Національний технічний ун-т України "КПІ", Київ),

В.В.Пасічний, канд.техн.наук (Ін-т проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України, Київ),

А.А.Птуха (Національний технічний ун-т України "КПІ", Київ)

Базові характеристики дослідницького стенду "офсетний сонячний концентратор – двигун Стірлінга"

Розглянуто питання перетворення сонячної енергії в механічну на базі створеного дослідницького стенду "офсетний сонячний концентратор – двигун Стірлінга". Наведено методику 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.

Робота є продовженням досліджень процесу перетворення енергії сонячного випромінювання у механічну енергію на базі сонячних енергоустановок з тепловим динамічним перетворювачем [1, 2]. Метою роботи є створення діючого експериментального стенду "офсетний сонячний концентратор (ОСК) – двигун Стірлінга (ДС) " 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 виготовлено з супутникової антени, обклеєної дзеркальною плівкою Agosol з коефіцієнтом відбиття 0,6. Як динамічний перетворювач було використано діючий макетний зразок двигуна Стірлінга УДС-1 [3]. У ході експериментальних досліджень вимірювались наступні параметри: повна сонячна радіація (піранометр Янішевського), температура поверхні теплоприймача та ребер охолодження ДС (ТХА-термопари + цифрові мультиметри DT838), частота обертання ДС (інфрачервоний фототахометр TIF780). Теоретичний аналіз базувався на роботах [4–7], методика визначення ефективності процесу перетворення була подібною до [2].

Особливості офсетного варіанту концентратора у порівнянні з симетричним параболоїдним варіантом.

Відомо, що за своєю геометрією офсетні та симетричні концентратори можуть розглядатися як "вирізані" фрагменти первинного параболоїда. Первинний параболоїд – поверхня обертання параболу $y = \frac{x^2}{4F}$, де F – фокусна відстань. Параболоїдний офсетний концентратор вирізають із первинного параболоїда січним циліндром, вісь і твірна якого паралельні осі вихідного параболоїда. Якщо січний циліндр розташовується в осі первинного параболоїда, то отримуємо симетричний концентратор. Звичайний офсетний концентратор відповідає варіанту, при якому твірна січного циліндра співпадає з віссю первинного параболоїда (вісь параболоїда проходить через край концентратора). 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. Ця менша вісь ще називається "умовним діаметром" офсетного концентратора. Якщо поглянути на розкриття прямо, то отримуємо еліпс: його утворюють лінія перетину параболоїда обертання і циліндра, паралельного осі обертання.

Розрахунок параметрів офсетного концентратора.

Обравши концентратором сонячної енергії офсетний варіант із діаметром меншої осі 0,8 м, визначимо інші його параметри. Для того, щоб у фокусі було добре видно весь офсет, тобто для максимального можливого використання всієї площі концентратора, відношення $\frac{F}{D}$ має бути

$0,5 \div 0,6$. Ця величина традиційна для офсетів, тоді як для симетричних концентраторів дане відношення має значення $0,3 \div 0,4$. При відношенні 0,55 фокусна відстань складає 0,44 м. Апертурний кут на меншу вісь складає 90° , а на більшу змінюється в діапазоні $80^\circ \div 90^\circ$. В даному випадку кут складає 85° , оскільки $\frac{F}{D} = 0,55$. Виходячи з уже

відомих параметрів, більша вісь офсетного дзеркала зазвичай перевищує меншу на 10% і визначається так:

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

За умови направлення офсетного концентратора в бік Сонця і нахилу його відносно вертикалі на кут, рівний куту сонцестояння в даний час (день, місяць), має місце так званий трикутник розмірів офсетного концентратора, який за даних умов постійний і дозволяє точно визначити фокусну відстань (це пов'язано зі зміщенням відносно осі фокусом офсету). Даний трикутник розмірів зображено на рис. 1, а формули для визначення його сторін (параметрів концентратора) наведено нижче:

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

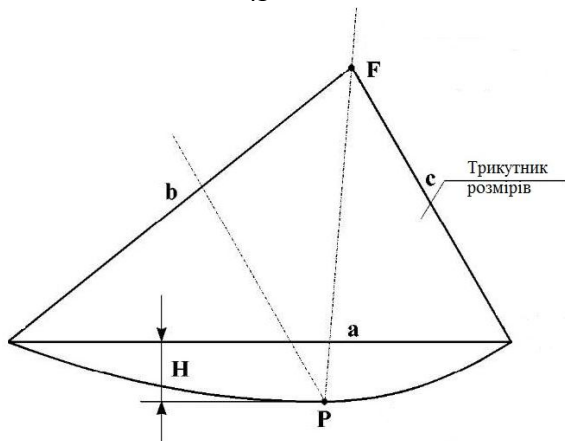


Рис. 1. Трикутник розмірів офсетного концентратора.

Для підвищення ступеня концентрації теплоприймача необхідно зменшувати площу фокальної плями, тобто орієнтувати площину приймача так, щоб максимально наблизити її до положення нормалі до прямої, що поєднує фокус із точкою максимальної глибини концентратора. Ця точка знаходиться наступним чином: сторону b ділять навпіл 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.

Розрахунок і порівняння площ офсетного та симетричного концентраторів.

Як було показано вище, сторона c трикутника розмірів офсетного концентратора є віссю первинного параболоїда, сторона b – проекцією частини параболоїда на вісь абсцис, а сам концентратор – частиною бічної площі вихідного параболоїда (рис. 2). Тоді, знаючи параметри дзеркала, можна знайти рівняння первинного параболоїда.

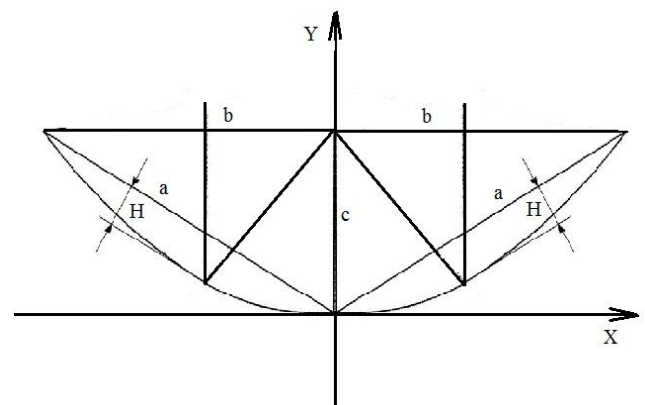


Рис. 2. Геометрія первинного параболоїда.

Загальний вигляд рівняння параболі:

$$y = ax^2 + bx + c.$$

Система рівнянь для розрахунку первинного параболоїда:

$$\begin{cases} 0,44 = a \cdot 0,8^2 + b \cdot 0,8 + c \\ 0,44 = a \cdot (-0,8)^2 + b \cdot (-0,8) + c \\ 0 = a \cdot 0^2 + b \cdot 0 + c. \end{cases}$$

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

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

Рівняння вихідної параболі:

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

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

Розрахунок первинного параболоїда. Для розрахунку площі бічної поверхні вихідного параболоїда потрібно знати рівняння даного параболоїда та січного циліндра.

Якщо параболоїд є тілом обертання, тобто результатом обертання параболі навколо осі, а січний циліндр має кругову основу (в нашому випадку радіус циліндра, тобто радіус первинного параболоїда, становить 0,8 м), тоді рівняння параболоїда матиме наступний вигляд:

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

де p – безрозмірний параметр параболоїда ($p = 0,6875$).

Визначимо площу бічної поверхні параболоїда:

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

$$\text{де } z = \frac{x^2}{1,375} + \frac{y^2}{1,375}; \quad x^2 + y^2 = 0,8^2;$$

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{2x}{1,375}; \quad \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{2y}{1,375}.$$

Підставляючи отримані значення у вираз подвійного інтеграла і переходячи до полярної системи координат (площею бічної поверхні буде площа, обмежена параболоїдом і січним циліндром), отримаємо значення площі:

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

$$\begin{aligned} S &= \iint_{\Omega} \sqrt{1 + \left(\frac{2x}{1,375}\right)^2 + \left(\frac{2y}{1,375}\right)^2} dx dy = \iint_{\Omega} \sqrt{1 + (2,116 \cdot (x^2 + y^2))} dx dy = \\ &= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{0,8} \sqrt{1 + 2,116r^2} \cdot r \cdot dr = (2\pi - 0) \cdot \frac{1}{6,348} \cdot (1 + 2,116 \cdot (0,8 - 0)^2)^{\frac{2}{3}} = \\ &= 2\pi \cdot \frac{1}{6,348} \cdot (1 + 2,116 \cdot 0,8^2)^{\frac{2}{3}} = 0,315\pi \cdot \sqrt[3]{(1 + 2,116 \cdot (0,8)^2)^2} = 1,77 \cdot 0,315\pi = 1,75. \end{aligned}$$

Розрахунок площі симетричного концентратора. Проведемо аналогічний розрахунок площі бічної поверхні симетричного параболоїда, вирізаного січним циліндром із радіусом 0,4 м.

$$\begin{aligned} S &= \iint_{\Omega} \sqrt{1 + \left(\frac{2x}{1,375}\right)^2 + \left(\frac{2y}{1,375}\right)^2} dx dy = \iint_{\Omega} \sqrt{1 + (2,116 \cdot (x^2 + y^2))} dx dy = \\ &= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{0,4} \sqrt{1 + 2,116r^2} \cdot r \cdot dr = (2\pi - 0) \cdot \frac{1}{6,348} \cdot (1 + 2,116 \cdot (0,4 - 0)^2)^{\frac{2}{3}} = \\ &= 2\pi \cdot \frac{1}{6,348} \cdot (1 + 2,116 \cdot 0,4^2)^{\frac{2}{3}} = 0,315\pi \cdot \sqrt[3]{(1 + 2,116 \cdot (0,4)^2)^2} = 1,2145 \cdot 0,315\pi \approx 1,1. \end{aligned}$$

Розрахунок площі офсетного концентратора. Розрахунок офсетного концентратора аналогічний двом попереднім випадкам, коли радіус січного циліндра складає 0,4 м. Натомість, інтегрування проводиться в межах $[0; 0,8]$, а полярний кут змінюється в межах $\left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right]$:

$$\begin{aligned}
 S &= \iint_{\Omega} \sqrt{1 + \left(\frac{2x}{1,375}\right)^2 + \left(\frac{2y}{1,375}\right)^2} dx dy = \iint_{\Omega} \sqrt{1 + (2,116 \cdot (x^2 + y^2))} dx dy = \\
 &= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 + 2,116r^2} \cdot r \cdot dr = \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{1}{6,348} \cdot (1 + 2,116 \cdot (0,8 - 0)^2)^{\frac{2}{3}} = \\
 &= \pi \cdot \frac{1}{6,348} \cdot (1 + 2,116 \cdot 0,8^2)^{\frac{2}{3}} = 0,517\pi \cdot \sqrt[3]{(1 + 2,116 \cdot (0,8)^2)^2} = 1,157 \cdot 1,77\pi \approx 0,8.
 \end{aligned}$$

Розрахунок ступеня концентрації.

Ступінь концентрації – це відношення сонячного потоку в зображенні Сонця до сонячного потоку, відбитого концентратором одиницею площі, яке залежить лише від геометричних показників концентратора:

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

Для приймача у вигляді плоскої пластини, що підпорядковується закону Ламберта:

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

Коефіцієнт концентрації – це відношення кількості енергії, що отримується в межах сонячного зображення, до загальної кількості енергії, що отримується у фокальній площині (відношення теплового потоку, що падає в області сонячного зображення, до повного потоку, що падає на параболоїдний концентратор). Для приймача у вигляді плоскої пластини, що підпорядковується 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 наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Ступінь концентрації та коефіцієнт концентрації для симетричного та офсетного концентраторів

Тип концентратора	C	η_C
Симетричний	30679,67	0,119
Офсетний	30057,08	0,172

Розрахунок густини теплового потоку на поверхні теплоприймача.

Тепловий потік, що падає на концентратор:

$$Q_{ПАД} = E_C \cdot A_K = q_a \cdot A_K,$$

де E_C – густина потоку повної сонячної радіації

(вимірюється піранометром); $A_K = \frac{\pi D^2}{4}$ – площа

міделя концентратора; D – діаметр концентратора.

Визначимо тепловий потік, що потрапляє в теплоприймач (потенційно можливий потік теплоти, зібраний на зображенні Сонця в реальних умовах). У ролі теплоприймача виступає плоска поверхня – торець циліндра витискувача ДС.

$$\begin{aligned}
 Q_S &= \eta_a \eta_r q_0 (\pi f^2) \sin^2 \theta = \\
 &= \eta_r q_a (214,6)^2 F_S \sin^2 \theta = \\
 &= \eta_r (214,6)^2 \sin^2 \theta \cdot \frac{F_S}{A_K} Q_{ПАД},
 \end{aligned}$$

де η_a – частка 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:

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

Повний потік:

$$Q_S = \rho_3 \eta_{СТ} Q_{ПАД},$$

де ρ_3 – коефіцієнт відбиття дзеркальної поверхні концентратора; η_{CT} – коефіцієнт ефективності системи стеження.

З іншого боку:

$$Q_S = N_t = AA_K E_C = A Q_{ПАД},$$

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 дзеркальної поверхні концентратора ($\rho_3 = 0,55$); $\eta_{СЛ}$ – коефіцієнт ефективності системи слідкування ($\eta_{СЛ} = 1$); $\eta_{ЮСТ}$ – 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 є частиною первинного параболоїдного концентратора, то можна зробити припущення, що середня густина теплового потоку по площі параболоїда буде дорівнювати середній густині теплового потоку офсетного концентратора.

Густина теплового потоку в точках, що лежать поза фокальним зображенням (на діаметрі поверхні нагріву):

$$q_{BX} = \frac{2q_S}{\sin^2 \theta_1} \left[\cos \theta_1 - \ln(1 + \cos \theta_1) + \frac{\sin^2 \theta_1}{2} - \cos \theta_3 + \ln(1 + \cos \theta_3) - \frac{\sin^2 \theta_3}{2} \right],$$

де $\theta_1 = \theta$; $\cos \theta_3 = \frac{-1 + \sqrt{1 + 8 \frac{r_f}{r}}}{2}$; $r_f = 0,02$ – радіус фокальної плями; $r = 0,033 \text{ м}$ – радіус поверхні нагріву.

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

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

Температура площі поверхні нагріву 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).

Поглинутий тепловий потік – це тепловий потік, переданий робочому тілу (РТ):

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

$$Q_{РТ} = \eta_{ТП} Q_{BX},$$

де $\eta_{ТП} = \frac{Q_{РТ}}{Q_{BX}}$ – коефіцієнт ефективності теплоприймача.

Розрахунок:

$$Q_{РТ} = q_{РТ} \cdot F_H.$$

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

$$q_{РТ} = \frac{2}{3} \varepsilon_n \sigma_0 T_m^4; T_{РТ} = \left(\frac{3q_{РТ}}{2\varepsilon_n \sigma_0} \right)^{0,25}.$$

Розрахунок значення теплового потоку, переданого робочому тілу, через експериментальне значення температури $T_{РТ}$:

$$q_{РТ} = \frac{2}{3} \varepsilon_n \sigma T_{РТ}^4; Q_{РТ} = q_{РТ} \cdot F_H.$$

На рис. 3 наведено порівняння температури гарячої порожнини ДС при теоретичному підході до розрахунку (залежність 1) і теоретично-експериментальному підході (залежність 2).

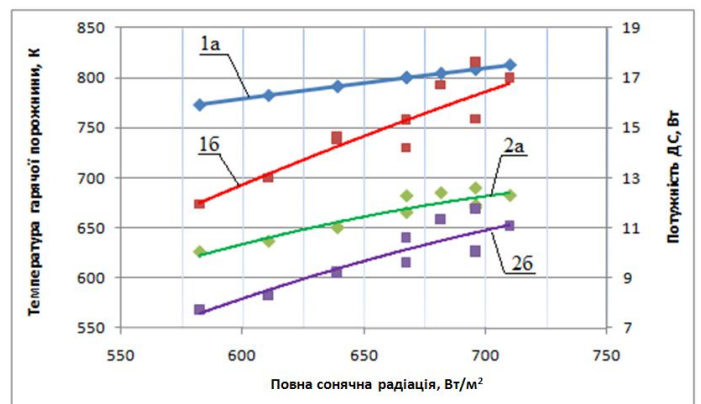


Рис. 3. Температура робочого тіла двигуна Стірлінга у гарячій порожнині (1) та потужність двигуна Стірлінга (2) в залежності від сонячної радіації: а – теоретичний підхід; б – теоретично-експериментальний підхід.

Таблиця 2. Вихідні дані для розрахунку характеристик двигуна Стірлінга

№	Найменування характеристики ДС	Символ	Величина
1	Діаметр робочого циліндра	D	40 мм
2	Діаметр циліндра витискувача	D_B	65 мм
3	Діаметр витискувача	d_B	63,4 мм
4	Хід поршня та витискувача	S	30 мм
5	Відношення ходу поршня до діаметра циліндра	SD	0,75
6	Робочий об'єм	V_S	37,68 см ³
7	Повний об'єм	V_T	130,86 см ³
8	Мертвий об'єм	V_D	93,18 см ³
9	Мінімальний тиск у робочих порожнинах	P_{min}	0,1 МПа

Термодинамічний аналіз і розрахунок характеристик ДС за ізотермічною моделлю (метод Шмідта).

Вихідні дані для розрахунку наведено в таблиці 2. Термодинамічний аналіз і розрахунок характеристик ДС за ізотермічною моделлю проведено за методом Шмідта, базуючись на методиці [7]. Результати розрахунку зображено на рис. 3.

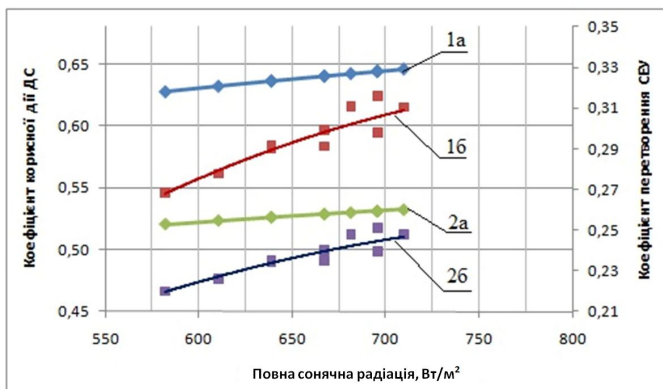


Рис. 4. ККД двигуна Стірлінга (1) та коефіцієнт перетворення сонячної енергетичної установки (2) в залежності від сонячної радіації: а – теоретичний підхід; б – теоретично-експериментальний підхід.

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

$$\eta_{CEU} = \eta_{ТП} \eta_t,$$

де η_{CEU} – коефіцієнт перетворення сонячної енер-

гетичної установки; $\eta_{ТП}$ – 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. 4.

Висновки. Отримані результати дозволили встановити ефективність роботи як двигуна Стірлінга, так і установки в цілому в залежності від величини сонячної радіації. В цілому спостерігається кореляція між теоретичними і дослідними даними, що свідчить про коректність застосованих теоретичного та експериментального підходів.

1. Студенець В.П., Миротюк П.А. Дослідження параметрів динамічного перетворювача в установці "сонячний імітатор – двигун Стірлінга – електрогенератор. "Відновлювана енергетика XXI століття", матеріали 10-ї ювілейної міжн. науково-практичної конференції. – АР Крим, смт. Миколаївка, 14-18 вересня 2009 р. – 347 с.
2. 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.
3. Долганов К.Е., Лисица В.П. Учебно-демонстрационный двигатель Стирлинга УДС-1 // Двигателестроение. – 1989. – №5. – С. 28, 33.
4. Hiester 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.
5. Солнечные высокотемпературные печи / Сб. переводов под ред. В.А. Баума. – М.: Изд. иностр. л-ры. – 1960. – 471 с.
6. Пасичный В.В., Цыганенко В.С., Пасичная М.С., Еличева Г.С. Создание солнечных высокотемпературных энергоустановок из отработанных радиоантенн // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2007. – №6. – С. 9–15.
7. Ридер Г., Хунер Ч. Двигатели Стирлинга: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 464 с.