

## АНАЛІЗ КОНЦЕНТРАЦІЙНИХ УСТАНОВОК СОНЯЧНОГО ВИПРОМІННЮВАННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБОТИ ДВИГУНА СТРІЛІНГА

Отримано 03 вер. 2023 р.; рекомендовано до публікації 21 вер. 2023 р.  
Доступно онлайн 30 вер. 2023 р.

**В. М. Головка<sup>1</sup>, М. М. Бережнюк<sup>2</sup>**

Автор для кореспонденції: Володимир Головка,  
e-mail: golovkovm@ukr.net

<sup>1</sup> д-р техн. наук, професор.  
<https://orcid.org/0000-0003-0195-96542>

<sup>2</sup> аспірант.  
<https://orcid.org/0000-0002-0863-9269>

*Щороку відновлювані джерела енергії стають поширенишими завдяки можливості їх використання як децентралізованого та автономного джерела енергії. Таким джерелом енергії може бути установка з двигуном Стірлінга, яка може використовувати теплоту від Сонця або від спалювання традиційного палива для виробництва електроенергії та використання відпрацьованої теплоти. В статті проведено аналіз концентраційних установок сонячного випромінювання для забезпечення різниці температур, при якій робота двигуна Стірлінга стає можливою. Результатом аналізу є визначення переваг, недоліків та порівняльних характеристик концентраційних сонячних установок, а саме: рефлекторів параболічного типу, лінійних рефлекторів Френеля, концентраційних веж, параболічних концентраторів тарілчастого типу та концентраторів з використанням лінз (Френеля).*

**Ключові слова:** двигун Стірлінга, рефлектори параболічного типу, лінійні рефлектори Френеля, концентраційна вежа, параболічні концентратори тарілчастого типу, концентратори з використанням лінз (Френеля).

## ANALYSIS OF SOLAR RADIATION CONCENTRATION PLANTS TO ENSURE THE OPERATION OF THE STIRLING ENGINE

Received Sept. 03, 2023; accepted Sept. 21, 2023  
Available online Sept. 30, 2023

**V. Golovko<sup>1</sup>, M. Berezhniuk<sup>2</sup>**

Author for correspondence: Volodymyr Golovko,  
e-mail: golovkovm@ukr.net

<sup>1</sup> Dr. of Tech. Sciences, prof.  
<https://orcid.org/0000-0003-0195-96542>

<sup>2</sup> Postgraduate student.  
<https://orcid.org/0000-0002-0863-9269>

*Every year, renewable energy sources are becoming more widespread due to the possibility of using them as a decentralized and autonomous energy source. Such an energy source can be a Stirling engine plant, which can use heat from the sun or from the combustion of traditional fuels to generate electricity and utilize waste heat. The article analyzes concentrating solar radiation plants to ensure the temperature difference at which the operation of the Stirling engine becomes possible. The result of the analysis is the presentation of the advantages, disadvantages and comparative characteristics of concentrating solar installations, namely: parabolic trough, linear Fresnel reflector, concentration tower, parabolic dish and concentrators using lenses (Fresnel).*

**Keywords:** Stirling engine, parabolic trough, linear Fresnel reflector, concentration tower, parabolic dish and concentrators using lenses (Fresnel).

**Вступ.** Очікується, що в майбутньому енергетичний сектор менше залежатиме від використання викопних палив завдяки збільшенню виробництва енергії з відновлюваних джерел. Серед них особливо великий потенціал має сонячна енергія. Енергія сонячного випромінювання у тисячі разів більше енергії, що споживається суспільством, але використання цієї чистої енергії може бути неефективним. Найпоширенішим методами є використання фотоелектричних модулів, які перетворюють сонячне випромінювання безпосередньо на електричну енергію, а також використання енергії Сонця для отримання теплоти. Системи комбінованого виробництва теплоти й електроенергії можуть використовувати паливо або енергію Сонця для виробництва електроенергії, а відпрацьовану теплоту – для опалення приміщень або нагрівання води. Потенційна енергоефективність для таких систем становить понад 80 % [1], і широке впровадження цих систем дасть змогу скоротити втрати енергії та викиди CO<sub>2</sub>. Установкою для комбінованого генерування теплоти й електроенергії може бути двигун Стірлінга. Проте щоб отримати теплоту, необхідну для досягнення температури, достатньої для роботи двигуна Стірлінга, необхідно сконцентрувати сонячне випромінювання, яке можна використовувати для виробництва електроенергії.

**Постановка завдання.** Провести аналіз концентраційних установок сонячного випромінювання для

забезпечення роботи двигуна Стірлінга та вивчити можливості їх використання.

**Виклад основного матеріалу.** Двигун Стірлінга не є новою технологією, його винахід датується 1816 роком [2]. Проте існує новий інтерес до його застосування як розподільчого джерела генерації електроенергії, при якій електроенергія виробляється в точці споживання.

Двигун Стірлінга працює шляхом почергового нагрівання та охолодження газу зовнішнім джерелом теплоти (яким може бути сонячне випромінювання), отримуючи енергію від розширення та стиснення газу. Це призводить до різниці тисків, що своєю чергою використовується для зміни положення поршня всередині двигуна. Термодинамічна нагрівальна машина перетворює різницю температур (теплову енергію) на механічну енергію (кінетичну енергію). Електричний генератор, безпосередньо з'єднаний з валом двигуна Стірлінга, перетворює механічну енергію на необхідну електричну енергію змінного струму і являє собою систему, в якій різниця температур відіграє важливу роль. Вихідна потужність двигуна Стірлінга в основному регулюється зміною робочого тиску газу всередині поршневого циліндра [3].

Перевага циклу Стірлінга полягає в тому, що він дозволяє досягти ефективності, яка наближається до справжньої ефективності Карно. Цикл складається з двох ізотермічних процесів і двох ізохорних процесів. P-V і T-S діаграми для циклу Стірлінга наведені на рис. 1 [4].

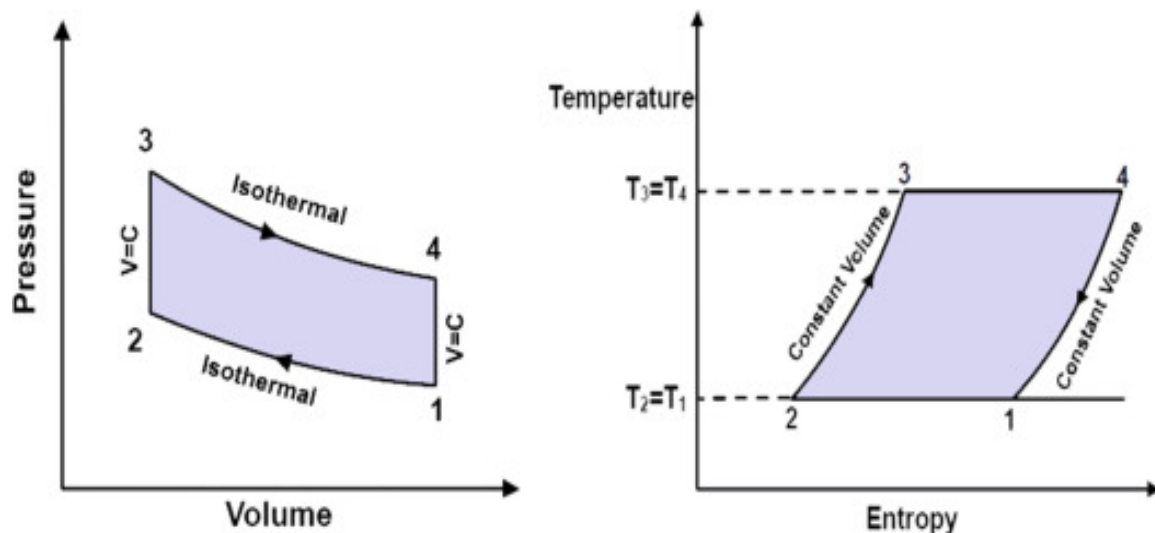


Рис. 1. P-V і T-S діаграми для циклу Стірлінга [4]

Fig. 1. Stirling cycle processes on P-V and T-S diagrams [4]

Отже, для ефективної роботи двигуна Стірлінга потрібна достатньо велика різниця температур між нагрівачем та охолоджувальною частиною двигуна. Ця різниця температур, відома як температурний градієнт, є основним фактором, що дозволяє досягнути високої

продуктивності двигуна. Зазвичай для роботи двигуна Стірлінга різниця температур повинна бути від 200 °C [5]. На рис. 2 зображено залежність вихідної потужності двигуна Стірлінга від температури охолоджувача при двох різних температурах нагрівача.

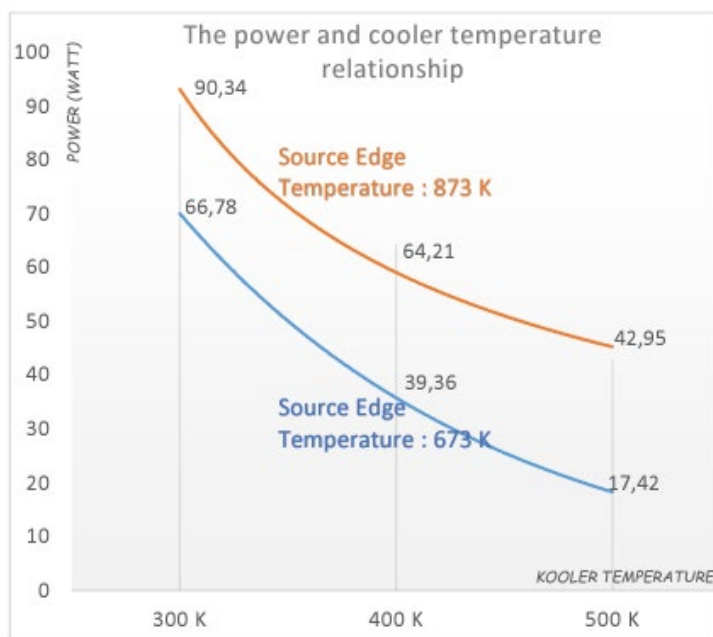


Рис. 2. Залежність вихідної потужності двигуна Стірлінга від температури охолоджувача [6]

Fig. 2. The power and cooler temperature relationship in the Stirling engines [6]

Щоб забезпечити таку різницю температур використовують різні типи та методи охолодження для підтримання низьких температур охолоджувача і джерел теплоти, які можуть досягати високих температур на боці нагрівача двигуна Стірлінга. Для використання Сонця як джерела теплоти необхідно застосовувати концентраційні установки.

Сонячні концентраційні установки зазвичай класифікуються відповідно до геометрії фокусування сонячного випромінювання, а саме [7]:

- концентратори лінійного фокусу (трекінг Сонця за однією віссю):
  - рефлектори параболічного типу (параболічний жолоб) – рис. 3, А;
  - лінійні рефлектори Френеля – рис. 3, В;
- концентратори точкового фокусу (трекінг Сонця за двома осями):
  - концентраційна вежа – рис. 3, С;
  - параболічні концентратори тарілчастого типу – рис. 3, D.

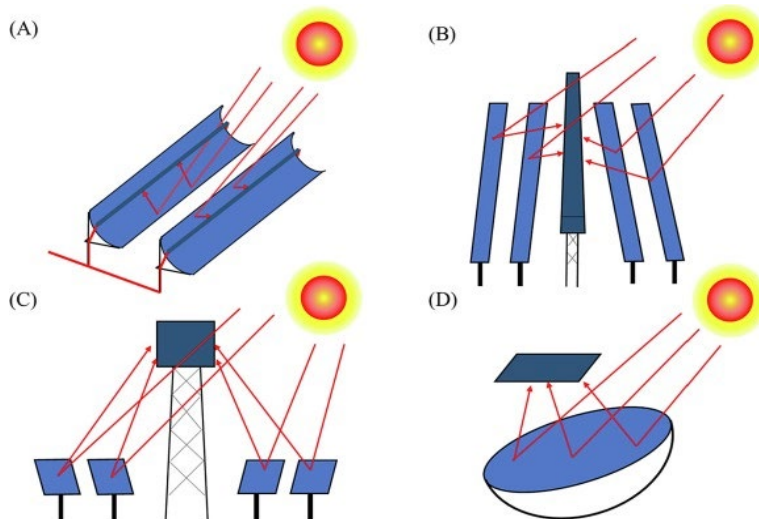


Рис. 3. Технології концентрації сонячного випромінювання [8]

Fig. 3. Technologies for concentrating solar radiation [8]

**Рефлектори параболічного типу.** Складаються з п'яти основних компонентів: дзеркал, опорної конструкції, приймача, робочої рідини й системи стеження. Зазвичай дзеркала виготовляють зі срібним покриттям з анодованого листового алюмінію (іноді

покривають полімерною плівкою), алюмінізованих полімерів та посріблених полімерних плівок. Усі ці матеріали здатні відбивати більше 90 % сонячного проміння. [9] Дзеркало циліндрично-параболічної форми з приймачем, розташованим уздовж параболіч-

ного жолоба на фокусній відстані, як показано на рис. 4. Така конфігурація збільшує інтенсивність енергії сонячного світла вздовж приймача, де сонячне світло перетворюється на теплоту й передається

рідині, що циркулює в приймачі. Такі системи працюють при низьких і середніх температурах, при цьому робоча рідина досягає температури від 50 до 400 °C [10].

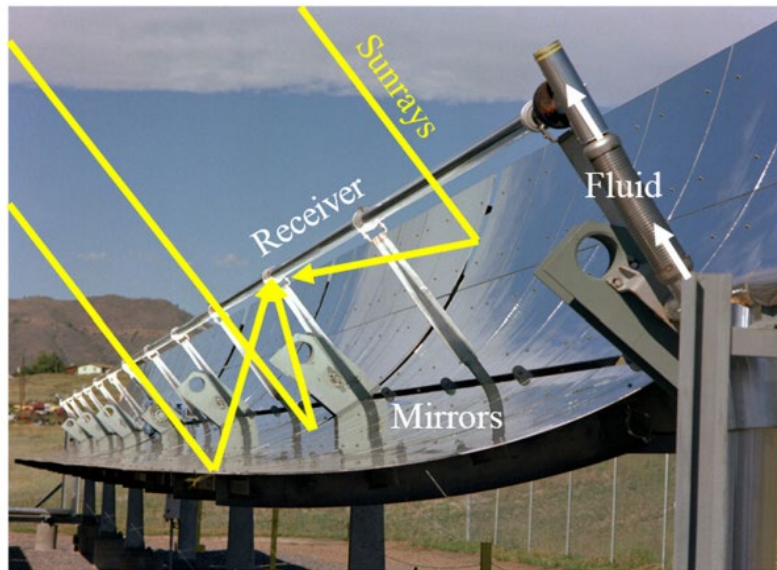


Рис. 4. Рефлектори параболічного типу (параболічний жолоб) [11]

Fig. 4. Parabolic trough collector system [11]

Ця система використовує пряме сонячне випромінювання як джерело теплоти. Оскільки відносно положення Сонця змінюється щосекунди, то для підвищення ефективності установки необхідна система стеження за Сонцем. Існує два типи стеження за Сонцем для цієї

установки, а саме: з півночі на південь та зі сходу на захід, як показано на рис. 5. Відстеження названі на основі напрямку обертання площини колектора. Метод відстеження з півночі на південь потребує менше енергії для відстеження, тому має вищий кінцевий ефект [11].

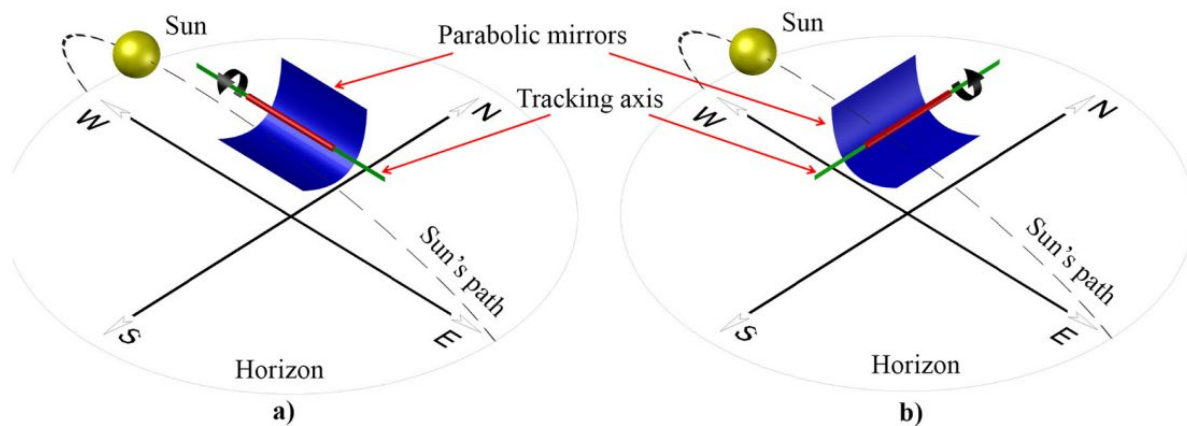


Рис. 5. Загальні методи відстеження: (a) північ-південь, (b) схід-захід [11]

Fig. 5. Common tracking methods: (a) north-south, (b) east-west [11]

Основні переваги рефлекторів параболічного типу:

- низькі викиди в навколишнє середовище протягом життєвого циклу системи – починаючи з виробництва компонентів до їх використання вплив на навколишнє середовище залишається на низькому рівні [12, 13];
- простота конструкції;
- низькі витрати на технічне обслуговування та експлуатацію;
- довгий термін експлуатації за рахунок відносно низьких робочих температур.

Основні недоліки рефлекторів параболічного типу:

- необхідна велика площа установки, щоб досягти необхідної робочої температури;
- система працює лише з прямим сонячним випромінюванням;
- високі початкові витрати;
- відносно низька максимальна температура – до 400 °C [10].

**Лінійні рефлектори Френеля.** Мають лінійне фокусування й складаються з дзеркального поля, системи стеження за

Сонцем і приймального елемента, як показано на рис. 6. Сонячне випромінювання потрапляє на дзеркальне поле, що відбиває його до приймача. Дзеркальне поле

складається з масивів дзеркал, що слідує за сонячною траєкторією протягом дня. Рух дзеркал відбувається за допомогою системи сонячних трекерів [14].

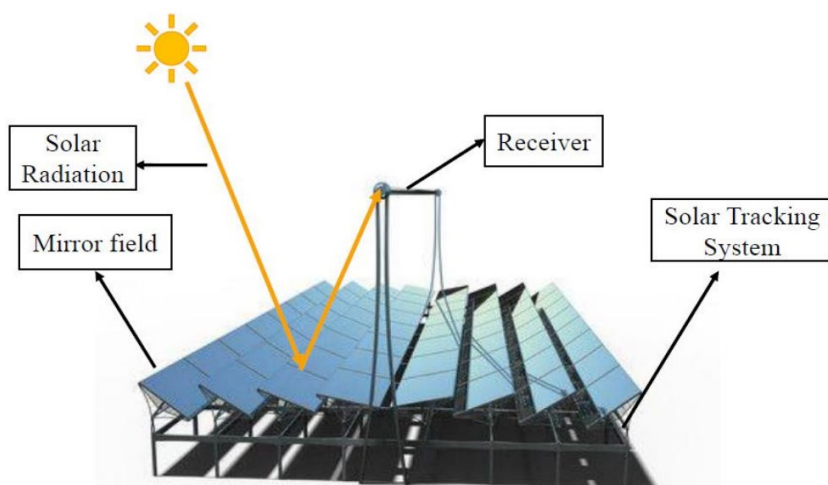
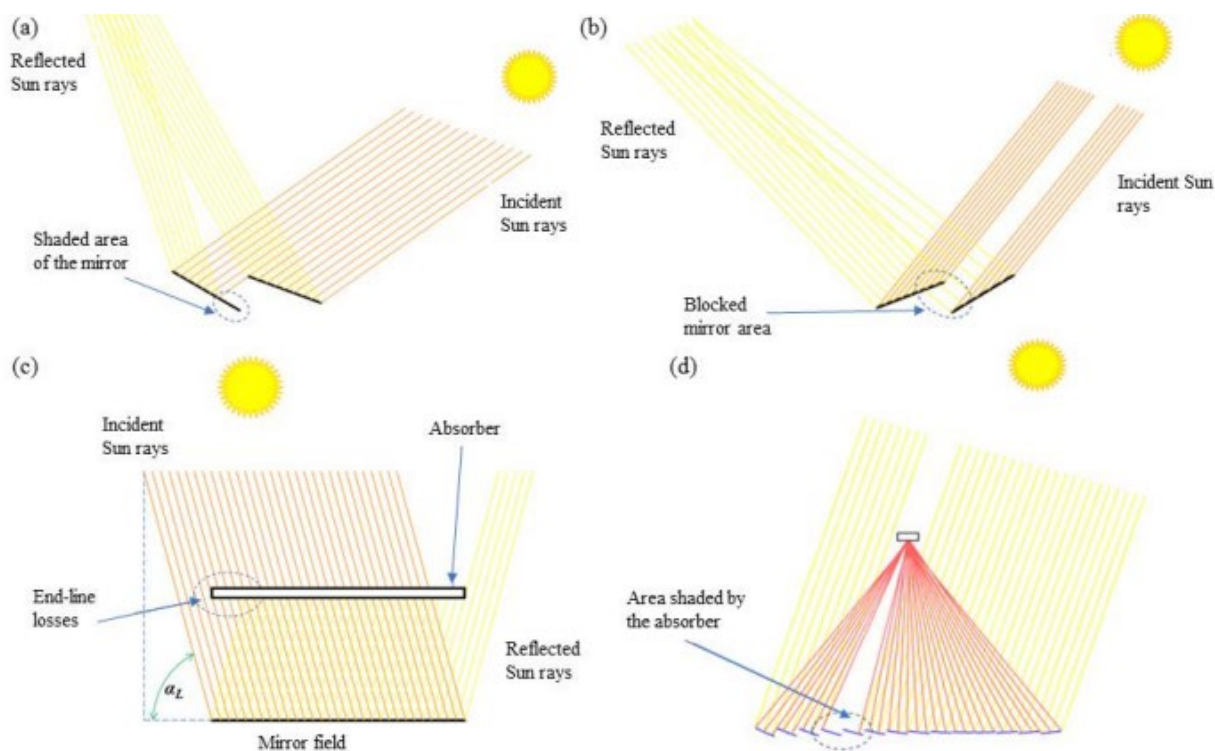


Рис. 6. Лінійні рефлектори Френеля [14]

Fig. 6. Linear Fresnel Reflector system representation [14]

У цих системах кожна лінія дзеркал переміщується таким чином, щоб її нахил дозволяв відбивати пряме випромінювання на поглинач. Однак дзеркала піддаються впливу затінення й блокування від сусідніх дзеркал. Затінення дзеркала – це блокування сонячних променів, що потрапляють на дзеркало, його сусідом (сусідами) (рис. 7, а), а блокування – це блокування відбитих сонячних променів, що досягають приймача, сусіднім (сусідніми) дзеркалом (дзеркалами) (рис. 7, b). Також у цих системах відслідковується рух Сонця тільки за віссю схід-захід. Таким чином, частина відбитих променів не доходить до нагрівача. Цей ефект називається кінцевими втратами (рис. 7, c). Крім цього, ще одним

важливим обмеженням системи є затінення, спричинене елементом поглинач на дзеркала (рис. 7, d). Косинусний ефект виникає через те, що видима площа дзеркал змінюється залежно від кута падіння сонячного променя на нормаль до поверхні (рис. 7, e). До того ж частина падаючого випромінювання втрачається в зазорі між дзеркалами й не потрапляє на поверхню поглинача (рис. 7, f). На рис. 8 зображена залежність всіх вище перерахованих втрат від відстані між дзеркалами (від 0 до 40 мм). Також ефективність дзеркал залежить від їх наближеності до приймача (чим більша відстань, тим нижча ефективність)(рис. 9) [15–17].



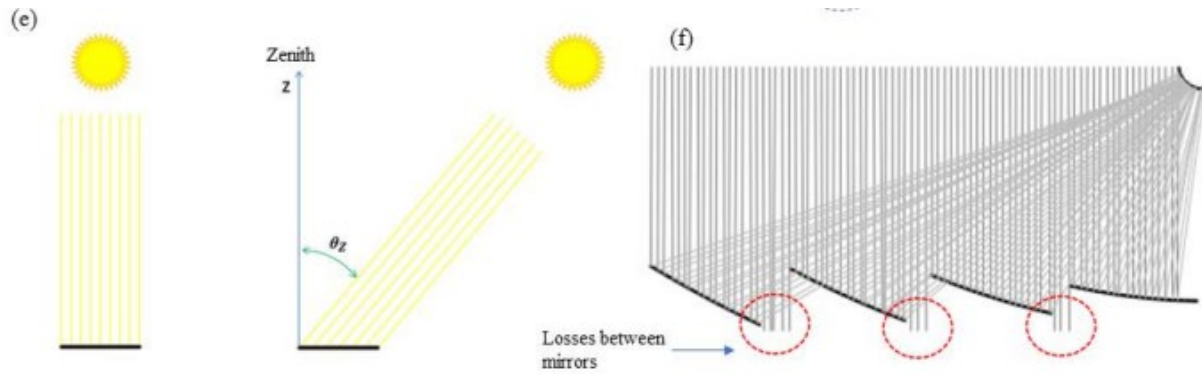


Рис. 7. Втрати внаслідок (а) затінення та (б) блокування між сусідніми дзеркалами; (с) кінцеві втрати та (д) затінення спричинене поглиначем; (е) косинусний ефект та (ф) втрати між дзеркалами [15, 16]

Fig. 7. Representation of losses due to (a) shading and (b) blocking between adjacent mirrors; (c) end-line losses and (d) shading by the absorber structure; (e) cosine effect, and (f) losses between mirrors [15, 16]

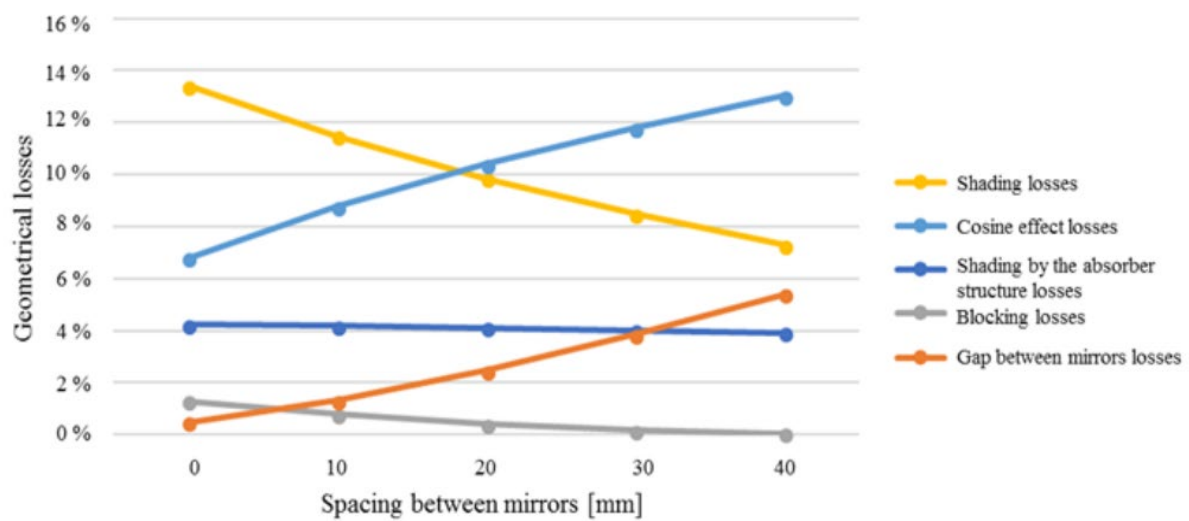


Рис. 8. Залежність втрат від відстані між дзеркалами (від 0 до 40 мм) [15]

Fig. 8. Geometrical losses as a function of the spacing between mirrors [15]

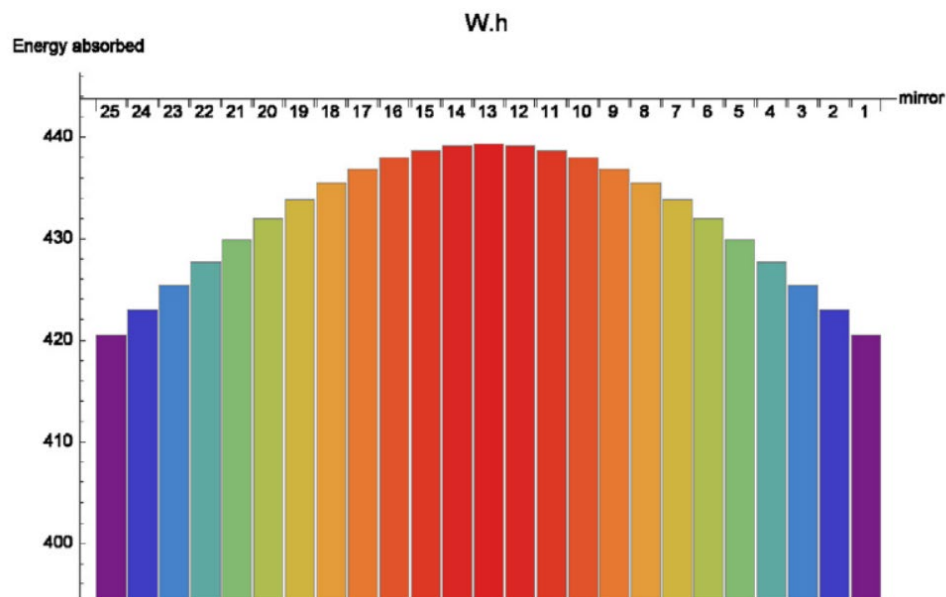


Рис. 9. Поглинена потужність (21 червня) в кожному дзеркалі системи [17]

Fig. 9. Absorbed power (June 21) in each mirror of the system [17]

Основні переваги лінійних рефлекторів Френеля:

- гнучкість у масштабуванні – ці рефлектори можуть бути масштабовані від дрібних установок для домашнього використання до великих електростанцій, вони можуть адаптуватися до різних потреб та розмірів проектів;
- простота конструкції плоских дзеркал полегшує обслуговування та знижує вартість на будівництво та експлуатацію;
- низьке вітрове навантаження.

Основні недоліки лінійних рефлекторів Френеля:

- потрібна велика площа установки, щоб досягти необхідної робочої температури;
- працює лише з прямим сонячним випромінюванням;
- високі оптичні втрати, які можуть сягати до 30 % [15];
- порівняно низька максимальна температура, що мо-

же обмежити їхнє застосування, – до 400 °C [18].

**Концентраційна вежа.** Належить до систем точкового фокусування і складається з великої кількості дзеркал з системами трекінгу за Сонцем для концентрації сонячного випромінювання на нагрівачу, який розміщений на вершині вежі (рис. 10). Уся теплова енергія, отримана на нагрівачі, передається теплоносію. Теплоносієм у цих системах може бути водяна пара, розплавлена сіль, рідкий натрій, надкритичний двоокис вуглецю (це рідкий стан вуглекислого газу, де він утримується при критичній температурі та критичному тиску або вище) та повітря, яке є найдешевшим варіантом, може досягати температури більше 1000 °C, не є корозійним та є стійким до замороження та кипіння, проте має низьку теплоємність [20]. Залежність температури та ефективності нагрівача від типу теплоносія зображено на рис. 11.



Рис. 10. Концентраційна вежа [19]

Fig. 10. Solar tower system representation [19]

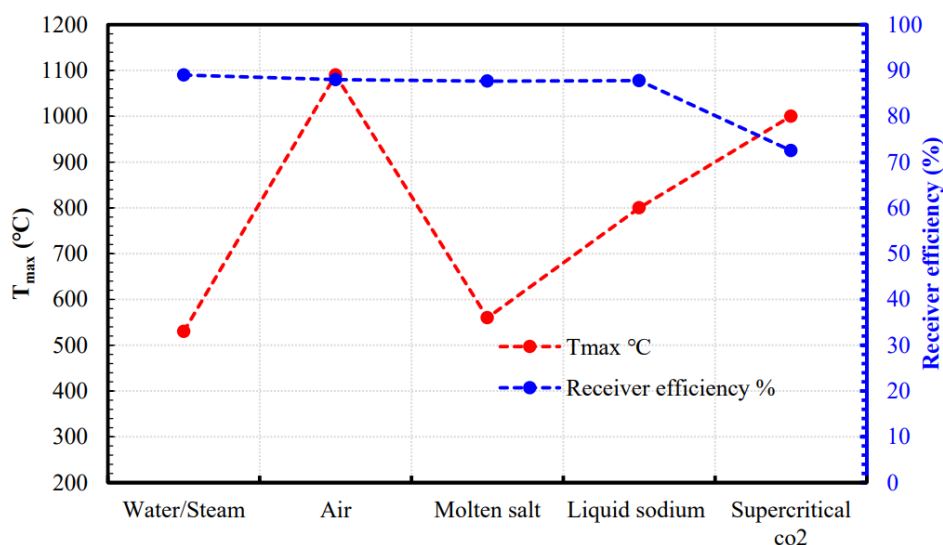


Рис. 11. Залежність температури та ефективності нагрівача від типу теплоносія [20]

Fig. 11. Comparison between  $T_{max}$  and receiver efficiency for the reviewed heat transfer fluids [20]

Основні переваги концентраційної вежі:

- висока робоча температура, яка може досягати більше 1000 °C [20];
- стабільна робота за рахунок накопичувача енергії;
- високий концентраційний коефіцієнт – більше 1000 [21];
- висока ефективність системи – до 35 % [21].
- Основні недоліки концентраційної вежі:
- велика площа системи;
- працює лише з прямим сонячним випромінюванням;
- високий кошторис будівництва;
- складність системи та, як наслідок, висока вартість експлуатації.

**Параболічні концентратори тарілчастого типу.** Це система точкового фокусування, що складається з трьох основних компонентів:

**Концентратора**, який має форму параболічного диску з рефлекторного матеріалу та який концентрує сонячне випромінювання на фокусній відстані. У цих установках коефіцієнт концентрації може досягати більше 5000

[23]. Основним параметром під час проектування концентратора є його діаметр, оскільки загальна ефективність установки прямо пропорційно залежить від нього [24]. Як видно з рис. 13, загальна ефективність системи опівдні немає ніяких змін, проте вранці та ввечері ефективність системи більша в установках з більшим діаметром концентратора.

**Приймача (нагрівача)**, який розміщений на фокусній відстані від концентратора та який перетворює відбиті сонячні промені на теплову енергію. Зазвичай у цих системах як приймач виступає нагрівач двигуна Стірлінга, який безпосередньо перетворює теплову енергію на механічну. Залежність оптичної та температурної ефективності системи від відстані між приймачем та концентратором наведена на рис. 14.

**Системи стеження за Сонцем**, яка відстежує положення Сонця за двома осями та підвищує ефективність системи за рахунок більшої концентрації сонячних променів протягом дня [22]. Структура параболічної концентраційної установки тарілчастого типу зображена на рис. 12.

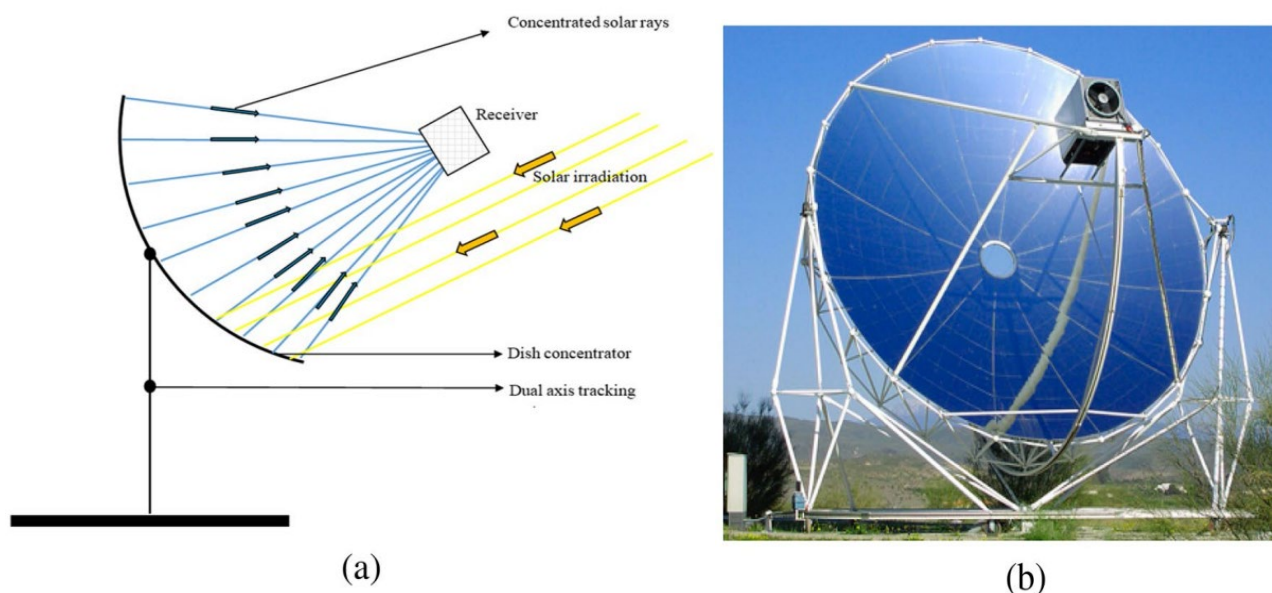


Рис. 12: а – модель параболічного концентратора тарілчастого типу; б – система концентраційної установки тарілчастого типу з двигуном Стірлінга [22]

Fig. 12: a – Parabolic dish solar concentrator model; b – Parabolic dish solar concentrator system with Stirling engine [22]

Основні переваги параболічних концентраторів тарілчастого типу:

- висока температура на приймачі, яка може досягати більше 1200 °C [20];
- висока ефективність за рахунок розміщення двигуна Стірлінга безпосередньо на конструкції установки – може сягати 30 % [21];
- високий концентраційний коефіцієнт – більше 5000 [23];
- високий робочий час системи протягом дня за рахунок двоосової системи трекінгу за Сонцем;

- мала площа системи;
- можливість працювати в автономному режимі;
- легко масштабується.

Основні недоліки параболічних концентраторів тарілчастого типу:

- низька стабільність системи;
- система працює лише з прямим сонячним випромінюванням;
- низька потужність системи;
- високе вітрове навантаження на систему.

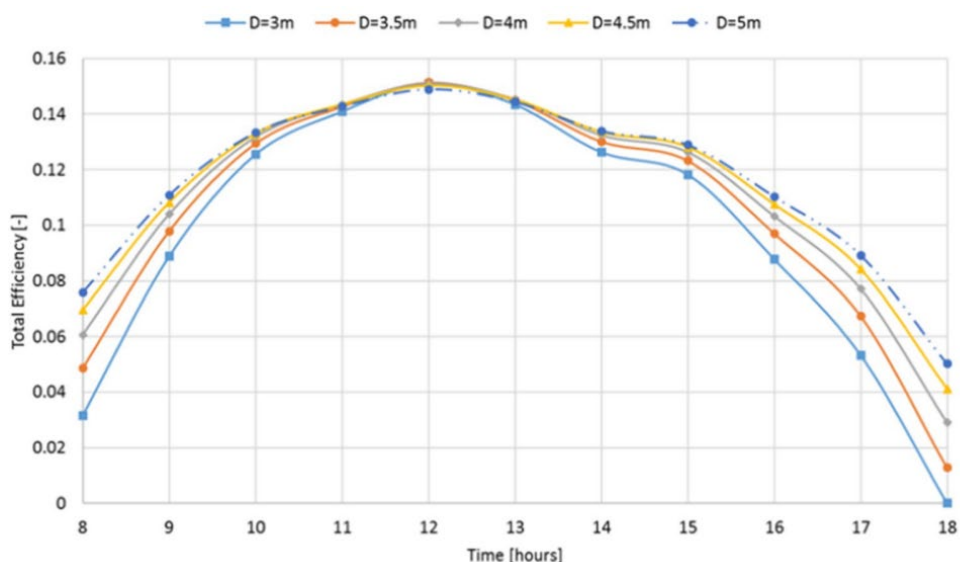


Рис. 13. Залежність загальної ефективності системи від діаметра диску протягом дня [24]

Fig. 13. Change in total efficiency with respect to change in dish diameter [24]

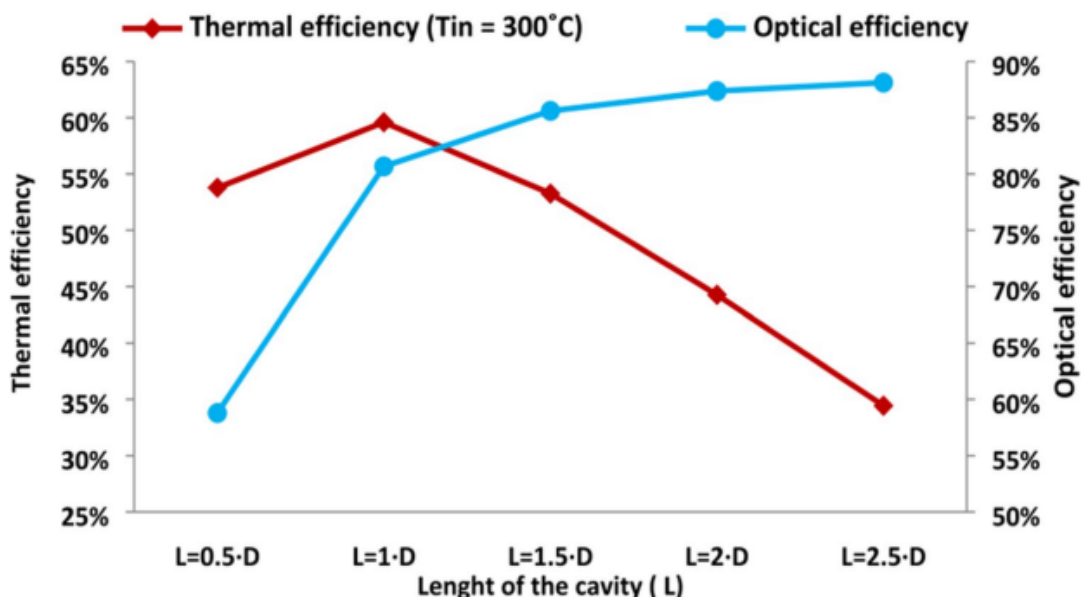


Рис. 14. Залежність оптичної та температурної ефективності системи від відстані між приймачем і концентратором [25]

Fig. 14. Thermal and optical efficiency with respect to the height of the receiver [25]

Ще одним варіантом установок для концентрації сонячного проміння є **конструкції з використанням лінз**. Вони складаються з нагрівача, лінзи й системи трекінгу за Сонцем та поділяються на дві групи: лінійного фокусування та точкового фокусування (рис. 15). Зазвичай ці установки використовують лінзи Френеля, оскільки вони мають менший об'єм та масу, коротшу фокусну відстань, меншу вартість виробництва порівняно зі звичайними випуклими лінзами [26] та високу оптичну ефективність, що може досягати 90 % залежно від фокусної відстані (рис. 16)[31]. Також лінзи Френеля мають досить високий концентраційний коефіцієнт, що може

становити – більше 2500 (рис. 17) [27]. Залежність концентраційного ефекту від відстані від центру концентраційної плями при різних відстанях нагрівача від фокусної відстані зображено на рис. 16. Однією з переваг цих установок є висока ефективність за рахунок розміщення нагрівача двигуна Стірлінга під фокусною плямою лінзи, внаслідок чого температура на нагрівачі двигуна може сягати більше 1000 °C [30]. Залежність температури на нагрівачі двигуна Стірлінга від часу при різних положеннях нагрівача відносно фокусу лінзи зображено на рис. 18, а залежність температури на нагрівачі двигуна Стірлінга від сонячної інсоляції протягом дня – на рис. 19.

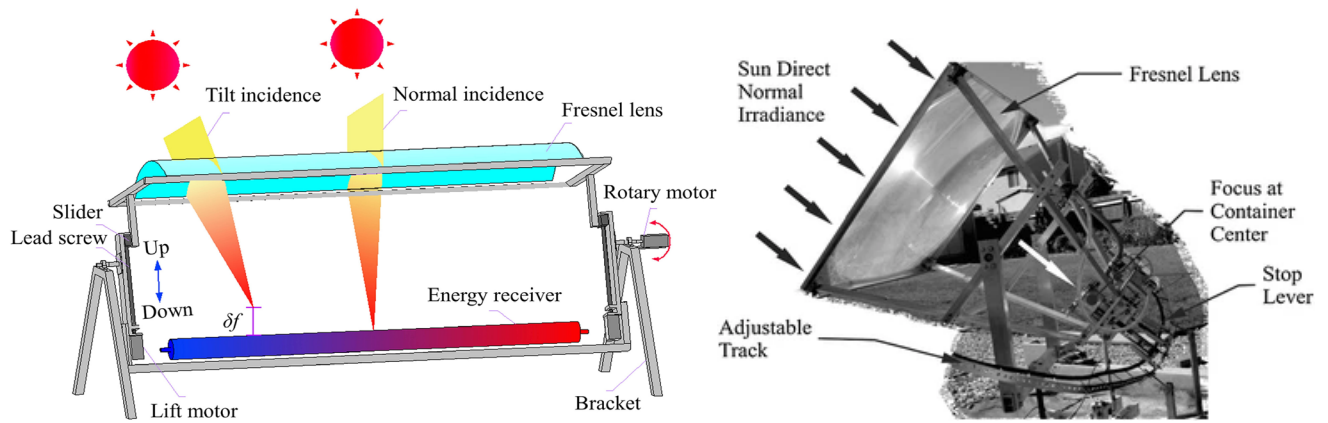


Рис. 15: а – концентратор з лінзою Френеля з лінійним фокусуванням, б – концентратор з лінзою Френеля з точковим фокусуванням [28, 29]

Fig. 15: a – linear Fresnel lens concentrator, b – circular Fresnel lens concentrator [28, 29]

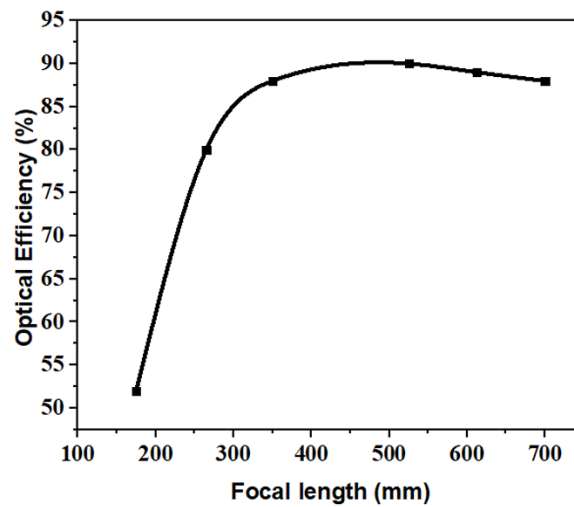


Рис. 16. Залежність оптичної ефективності від фокусної відстані [31]

Fig. 16. Optical Efficiency versus focal length [31]

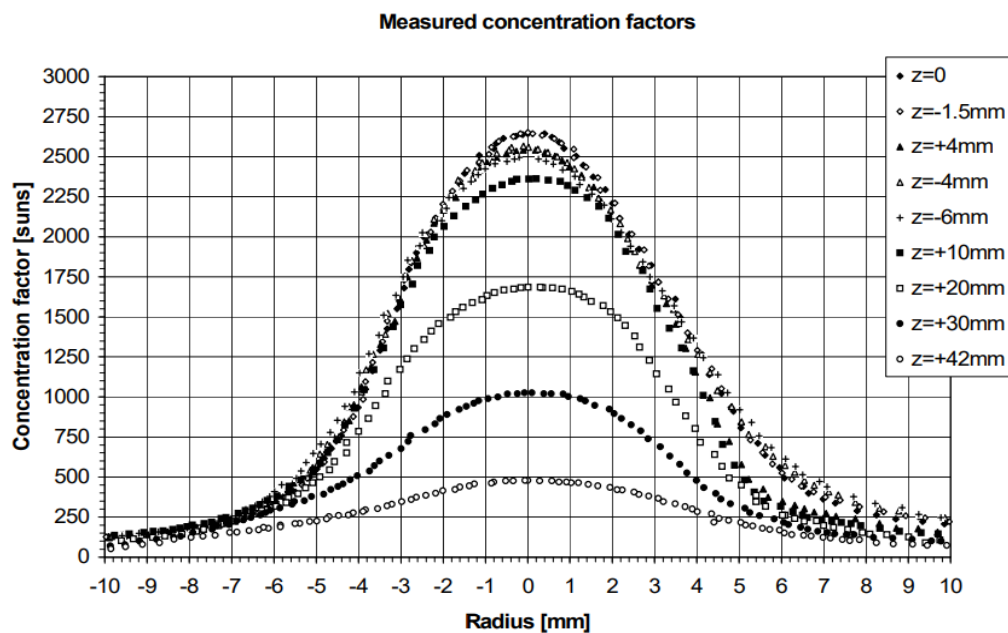


Рис. 17. Концентраційний коефіцієнт лінзи Френеля [27]

Fig. 17. Concentration factor of the Fresnel lens [27]

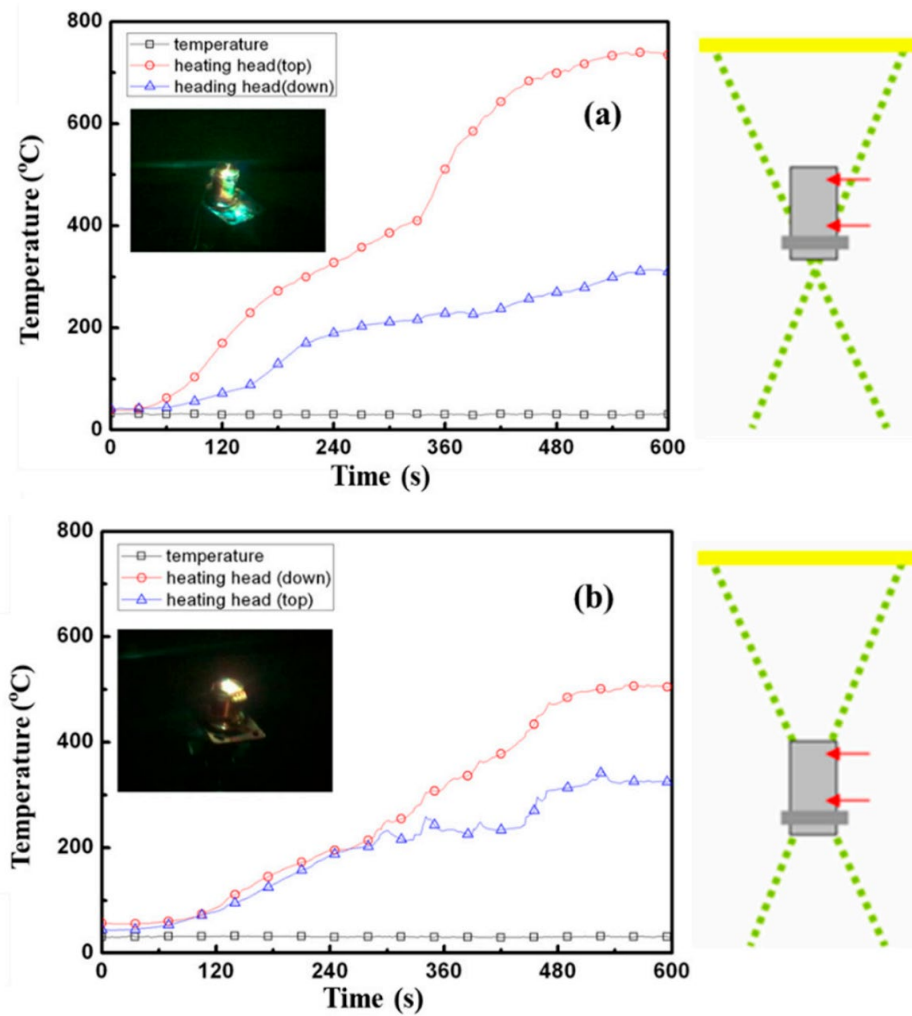


Рис. 18. Залежність температури на нагрівачу двигуна Стірлінга від часу з різним фокусуванням: а – фокусування на низу нагрівача; б – фокусування на верху нагрівача [30]

Fig. 18. Heating temperature diagram with different focus location of the heating head: a – sunlight cover the heating head; b – sunlight focused on top of the heating head [30]

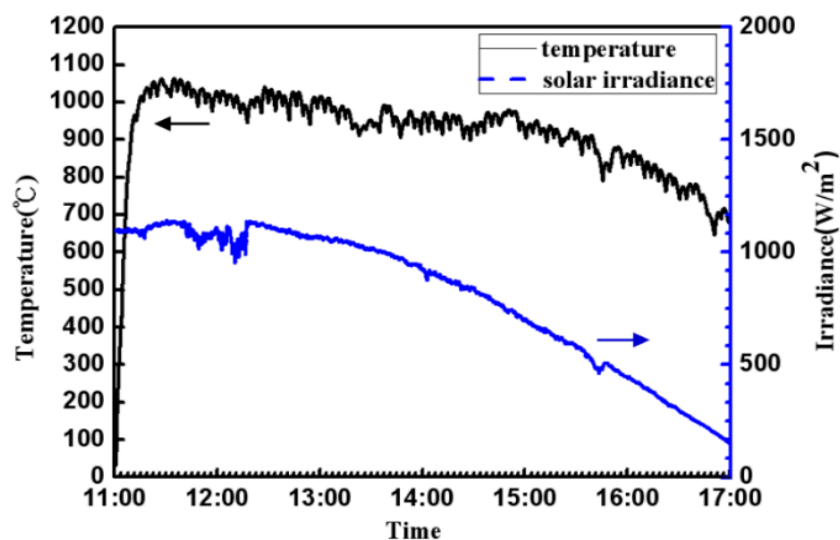


Рис. 19. Залежність температури на нагрівачу двигуна Стірлінга від сонячної радіації [30]

Fig. 19. Dependence of the temperature on the Stirling engine heater on solar radiation [30]

Основні переваги концентраторів з лінзою Френеля:

- висока температура на приймачі, яка може досягати більше 1000 °C [30];
- висока ефективність роботи за рахунок розміщення двигуна Стірлінга безпосередньо на конструкції установки – може сягати більше 30 % для виробництва електроенергії та більше 50 % – для комбінованого виробництва електроенергії і теплоти [30];
- високий концентраційний коефіцієнт – більше 2500 [27];
- високий робочий час системи протягом дня за рахунок двохосової системи трекінгу за Сонцем;
- висока оптична ефективність – більше 90 %;
- мала площа системи;
- можливість працювати в автономному режимі;

- легко масштабується;
- система здатна працювати при дифузній сонячній радіації;
- дешевина.

Основні недоліки концентраторів з лінзою Френеля:

- низька стабільність системи;
- низька потужність системи;
- високе вітрове навантаження на систему;
- лінзи Френеля можуть бути вразливі до бруду, пилу, вологості та інших факторів навколишнього середовища; це може вплинути на їхню оптичну ефективність та потребувати регулярного обслуговування.

Порівняння концентраційних установок сонячного випромінювання різних типів наведено в таблиці.

**Таблиця. Порівняння концентраційних технологій**

**Table. Comparison of concentration technologies**

| Тип концентраційної установки               | Рефлектори параболічного типу           | Лінійні рефлектори Френеля                                               | Концентраційна вежа                     | Параболічні концентратори тарілчастого типу | Концентратори з використанням лінз (Френеля)       |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Тип фокусу                                  | Лінійний                                | Лінійний                                                                 | Точковий                                | Точковий                                    | Лінійний та точковий                               |
| Тип трекінгу за Сонцем                      | Одноосовий                              | Одноосовий                                                               | Двохосовий                              | Двохосовий                                  | Одноосовий та двохосовий (залежно від типу фокусу) |
| Робоча температура                          | > 400 °C                                | < 400 °C                                                                 | > 1000 °C                               | > 1200 °C                                   | > 1000 °C                                          |
| Концентраційний коефіцієнт                  | < 80                                    | > 60                                                                     | > 1000                                  | > 5000                                      | > 2500                                             |
| Двигун Стірлінга як поглинач випромінювання | Ні                                      | Ні                                                                       | Ні                                      | Так                                         | Залежить від типу конструкції                      |
| Накопичувач енергії                         | Резервуар з розплавленою сіллю (400 °C) | Короткотерміновий накопичувач енергії за рахунок водяної пари (до 10 хв) | Резервуар з розплавленою сіллю (550 °C) | Немає                                       | Немає                                              |
| Тип концентрації                            | Відбиті сонячні промені                 | Відбиті сонячні промені                                                  | Відбиті сонячні промені                 | Відбиті сонячні промені                     | Прямі сонячні промені                              |

**Висновки.** Аналіз концентраційних установок сонячного випромінювання показав, що вони здатні забезпечити різницю температур для роботи двигуна Стірлінга. Найменша температура досягається за допомогою лінійних рефлекторів Френеля – 400 °C, а найвища – за допомогою параболічних концентраторів тарілчастого типу – більше 1200 °C. Двигун Стірлінга як поглинач сонячного випромінювання може використовуватися в параболічних концентраторах тарілчастого типу та концентраторах з використанням лінз Френеля точкового фокусування, що забезпечує вищу ефективність системи, за рахунок відсутності втрат теплоти від

теплоносія. Основним недоліком для всіх систем є необхідність використання системи трекінгу за Сонцем для забезпечення більшої ефективності протягом дня. Концентратор з використанням лінз Френеля порівняно з іншими установками є більш доцільним рішенням для забезпечення електроенергією домогосподарств за рахунок простоти конструкції, дешевини установки та експлуатації, високої температури (>1000 °C), легкості масштабування та відносно високої ефективності, що становить більше 30 % для виробництва електроенергії та більше 50 % – для комбінованого виробництва електроенергії й теплоти.

## ПОСИЛАННЯ

- Kribus A., Zaibel R., Carey D., Segal A., Karni J. A solar-driven combined cycle power plant. *Solar Energy*. 1998. Pp. 121–129.
- Kongtragool, B. and S. Wongwises. Thermodynamic analysis of a Stirling engine including dead volumes of hot space, cold space and regenerator. *Renewable Energy*, 2006. 31(3). Pp. 345–359.
- Rajput R. K. *Internal Combustion Engine*. Laxmi Publication/ 2011. P/163.
- Bahman Zohuri. Chapter 13 - Gas Power and Air Cycles. *Physics of Cryogenics*. 2018. Pp. 331–385.
- Mehmet Sait Cengiz, Mehmet Salih Memiş, Metin Kaynakli. The Temperature-Pressure-Frequency Relationship Between Electrical Power Generating in Stirling Engines. *International Journal of Engineering Research and Development*. 2017. Pp. 59–64.
- Karabulut H., Aksoy F., and Öztürk F. Thermodynamic analysis of a Beta type Stirling engine with a displacer driving mechanism by means of a lever. *Renewable Energy*. 2009. 34(2). Pp. 202–208.
- Hans Müller-Steinhagen, Freng And Franz Trieb. Concentrating solar power. *International Journal of Engineering Research and Development*. A review of the technology. 2004. Pp. 1–9.
- Fuying Chen, Qing Yang. Assessment of concentrated solar power generation potential in China based on Geographic Information System (GIS). 2022.
- Granqvist CG. Preparation of thin films and nanostructured coatings for clean tech applications: a primer. *Solar Energy Mater Sol Cell*. 2012. 99/ Pp/ 166–175.
- Kalogirou S. Solar thermal collectors and applications. *Prog Energ Combust*. 2004; 30(3):231–95.
- Pablo D. Tagle-Salazar, Krishna D.P. Nigam, and Carlos I. Rivera-Solorio. Parabolic trough solar collectors: A general overview of technology, industrial applications, energy market, modeling, and standards. *Green Processing and Synthesis*. 2020. 9. Pp. 595–649.
- Burkhardt III J, Heath G, Turchi C. Life cycle assessment of a parabolic trough concentrating solar power plant and the impacts of key design alternatives. *Env Sci Technol*. 2011. 45(6). Pp. 2457–2464.
- Klein S, Rubin E. Life cycle assessment of greenhouse gas emissions, water and land use for concentrated solar power plants with different energy backup systems. *Energy Policy*. 2013. 63. Pp. 935–950.
- Scalco P., Copetti J. C., Macagnan M. H., Oliveira J. D. Linear Fresnel Solar Collector Concentrator – A review. 26th International Congress of Mechanical Engineering. 2021. Brazil.
- Webler, L. C., Macagnan, M. H., and Copetti, J. B., 2019. "Study of the geometric efficiency of a linear Fresnel reflector". Conference Proceedings of 1st Franco-AMSUD Energy and Environment Meeting, Marseille, France, March 18-21, 2019.
- Mertins, M. Technische und wirtschaftliche analyse von horizontalen Fresnel-kollektoren. Universität Karlsruhe. 2009.
- Barbón, A., Bayón-Cueli, C., Bayón, L. and Ayuso, P. F., 2020. "Influence of solar tracking error on the performance of a small-scale linear Fresnel reflector". *Renewable Energy*. Vol. 162. Pp. 43–54.
- Salem Ghazzi and Rabah Boukhanouf. A Review of Small Scale Distributed Power Generation Technologies Using Solar Energy Driven Stirling Engine. *International Conference on Environmental Science and Technology*. 2014. Pp. 129–135.
- Internet resource - ENERGY MATTERS. Solar Power Tower: Use Molten Salt as an Energy Storage System. Access mode: <https://www.energymatters.com.au/renewable-news/solar-power-tower-use-molten-salt-as-an-energy-storage-system/>
- Falahat, F. M., Gomaa, M. R. (2022). A review study on solar tower using different heat transfer fluid. *Technology Audit and Production Reserves*, 5 (1 (67)), 00–00. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.267560>
- International Renewable Energy Agency. Renewable power generation costs in 2014. Bonn, Germany: IRENA Publications; 2015. [cited 2020 Aug 19]. Available from: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA\\_RE\\_Power\\_Costs\\_2014\\_report.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_RE_Power_Costs_2014_report.pdf)
- Hafez AZ, Soliman A, El-Metwally KA, Ismail IM (2017) Design analysis factors and specifications of solar dish technologies for different systems and applications. *Renew Sustain Energy Rev* 67:1019–36. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.077>
- Azzouzi D, Boumeddane B, Abene A, Said N (2015) Experimental and parametric study of a solar paraboloid designed to receive a stirling engine. *Mech Indust* 16(2). <https://doi.org/10.1051/meca/2014082>
- Gholamalizadeh Ehsan, Chung Jae Dong (2017) Design of the collector of a solar dish-Stirling system: a case study. *IEEE Access* 5:20754–62. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2758354>
- Bellos Evangelos, Bousi Erion, Tzivanidis Christos, Pavlovic Sasa (2019) Optical and thermal analysis of different cavity receiver designs for solar dish concentrators. *Energy Convers Manag*: X 2(June):100013. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2019.100013>
- Leutz R, Suzuki A, Akisawa A, Kashiwagi T. Developments and designs of solar engineering Fresnel lenses. Hong Kong, China. In: *Proceedings Symposium on Energy Engineering (SEE 2000)*. 2000. Vol. 2. Pp. 759–765.
- Ferriere, A.; Rodríguez, G.P. & Sobrino, J.A. (2004). Flux distribution delivered by a fresnel lens used for concentrating solar energy, *Journal of Solar Energy Engineering*, 126, 1, 654–660, ISSN 0199-6231
- Shen Liang, Qian He, Hongfei Zheng, Zhiyong Zhao, Huifang Kang, Xinglong Ma, Ge Wang. Optical and thermal performance of a uniaxial bidirectional tracked linear-focusing Fresnel lens solar concentrator. *International journal of energy research*. 2022. Vol. 44. Pp.18768–18780.
- Luis Rafael Sanchez Vega. Modeling and experimental evaluation of a small-scale fresnel solar concentrator system. *Renewables: Wind, Water and Solar a SpringerOpen Journal*. 2016.
- Tsung Chieh Cheng, Chao Kai Yang and I Lin. Biaxial-Type Concentrated Solar Tracking System with a Fresnel Lens for Solar-Thermal Applications. *Applied Sciences*, 2016.
- Sarah El Himer, Salima Al Ayane, Ali Ahaitouf. Optical modeling and Performance Design Of A Fresnel Lens For CPV Units. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 937, 2020.

## REFERENCES:

1. Kribus A., Zaibel R., Carey D., Segal A., Karni J. A solar-driven combined cycle power plant. *Solar Energy*. 1998. Pp. 121–129.
2. Kongtragool, B. and S. Wongwises. Thermodynamic analysis of a Stirling engine including dead volumes of hot space, cold space and regenerator. *Renewable Energy*. 2006. 31(3). Pp. 345–359.
3. Rajput R. K. *Internal Combustion Engine*. Laxmi Publication. 2011. P. 163.
4. Bahman Zohuri. Chapter 13 - Gas Power and Air Cycles. *Physics of Cryogenics*. 2018. Pp. 331–385.
5. Mehmet Sait Cengiz, Mehmet Salih Memiş, Metin Kaynakli. The Temperature-Pressure-Frequency Relationship Between Electrical Power Generating in Stirling Engines. *International Journal of Engineering Research and Development*. 2017. Pp. 59–64.
6. Karabulut H., Aksoy F., and Öztürk F. Thermodynamic analysis of a Beta type Stirling engine with a displacer driving mechanism by means of a lever. *Renewable Energy*. 2009. 34(2). Pp. 202–208.
7. Hans Müller-Steinhagen, Freng And Franz Trieb. Concentrating solar power. *International Journal of Engineering Research and Development*. A review of the technology. 2004. Pp. 1–9.
8. Fuying Chen, Qing Yang. Assessment of concentrated solar power generation potential in China based on Geographic Information System (GIS). 2022.
9. Granqvist CG. Preparation of thin films and nanostructured coatings for clean tech applications: a primer. *Sol Energy Mater Sol Cell*. 2012;99:166–75.
10. Kalogirou S. Solar thermal collectors and applications. *Prog Energy Combust*. 2004. 30(3). Pp.231–295.
11. Pablo D. Tagle-Salazar, Krishna D. P. Nigam, and Carlos I. Rivera-Solorio. Parabolic trough solar collectors: A general overview of technology, industrial applications, energy market, modeling, and standards. *Green Processing and Synthesis*. 2020. 9. Pp. 595–649.
12. Burkhardt III J, Heath G, Turchi C. Life cycle assessment of a parabolic trough concentrating solar power plant and the impacts of key design alternatives. *Env Sci Technol*. 2011. 45(6). Pp. 2457–2464.
13. Klein S, Rubin E. Life cycle assessment of greenhouse gas emissions, water and land use for concentrated solar power plants with different energy backup systems. *Energy Policy*. 2013. 63. Pp. 935–950.
14. Scalco P., Copetti J. C., Macagnan M. H., Oliveira J. D. Linear Fresnel Solar Collector Concentrator – A review. 26th International Congress of Mechanical Engineering. 2021. Brazil.
15. Webler, L. C., Macagnan, M. H., and Copetti, J. B., 2019. "Study of the geometric efficiency of a linear Fresnel reflector". Conference Proceedings of 1st Franco-AMSUD Energy and Environment Meeting, Marseille, France, March 18–21, 2019.
16. Mertins, M. Technische und wirtschaftliche analyse von horizontalen Fresnel-kollektoren. Universität Karlsruhe. 2009.
17. Barbón, A., Bayón-Cueli, C., Bayón, L. and Ayuso, P. F., 2020. "Influence of solar tracking error on the performance of a small-scale linear Fresnel reflector". *Renewable Energy*, Vol. 162, pp. 43–54.
18. Salem Ghazzi and Rabah Boukhanouf. A Review of Small Scale Distributed Power Generation Technologies Using Solar Energy Driven Stirling Engine. *International Conference on Environmental Science and Technology*. 2014. Pp. 129–135.
19. Internet resource - ENERGY MATTERS. Solar Power Tower: Use Molten Salt as an Energy Storage System. Access mode: <https://www.energymatters.com.au/renewable-news/solar-power-tower-use-molten-salt-as-an-energy-storage-system/>
20. Falahat, F. M., Gomaa, M. R. (2022). A review study on solar tower using different heat transfer fluid. *Technology Audit and Production Reserves*, 5 (1 (67)), 00–00. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.267560>
21. International Renewable Energy Agency. Renewable power generation costs in 2014. Bonn, Germany: IRENA Publications; 2015. [cited 2020 Aug 19]. Available from: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA\\_RE\\_Power\\_Costs\\_2014\\_report.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_RE_Power_Costs_2014_report.pdf)
22. Hafez AZ, Soliman A, El-Metwally KA, Ismail IM (2017) Design analysis factors and specifications of solar dish technologies for different systems and applications. *Renew Sustain Energy Rev* 67:1019–36. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.077>
23. Azzouzi D, Boumeddane B, Abene A, Said N (2015) Experimental and parametric study of a solar paraboloid designed to receive a stirling engine. *Mech Indust* 16(2). <https://doi.org/10.1051/meca/2014082>
24. Gholamalizadeh Ehsan, Chung Jae Dong (2017) Design of the collector of a solar dish-Stirling system: a case study. *IEEE Access* 5:20754–62. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2758354>
25. Bellos Evangelos, Bousi Erion, Tzivanidis Christos, Pavlovic Sasa (2019) Optical and thermal analysis of different cavity receiver designs for solar dish concentrators. *Energy Convers Manag*: X 2(June):100013. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2019.100013>
26. Leutz R, Suzuki A, Akisawa A, Kashiwagi T. Developments and designs of solar engineering Fresnel lenses. Hong Kong, China. In: *Proceedings Symposium on Energy Engineering (SEE 2000)*. 2000. Vol. 2. Pp. 759–765.
27. Ferriere, A.; Rodríguez, G.P. & Sobrino, J.A. (2004). Flux distribution delivered by a fresnel lens used for concentrating solar energy, *Journal of Solar Energy Engineering*, 126, 1, 654–660, ISSN 0199-6231
28. Shen Liang, Qian He, Hongfei Zheng, Zhiyong Zhao, Huifang Kang, Xinglong Ma, Ge Wang. Optical and thermal performance of a uniaxial bidirectional tracked linear-focusing Fresnel lens solar concentrator. *International journal of energy research*. 2022. Vol. 44. Pp.18768–18780.
29. Luis Rafael Sanchez Vega. Modeling and experimental evaluation of a small-scale fresnel solar concentrator system. *Renewables: Wind, Water and Solar a SpringerOpen Journal*. 2016.
30. Tsung Chieh Cheng, Chao Kai Yang and I Lin. Biaxial-Type Concentrated Solar Tracking System with a Fresnel Lens for Solar-Thermal Applications. *Applied Sciences*, 2016.
31. Sarah El Himer, Salima Al Ayane, Ali Ahaitouf. Optical modeling and Performance Design Of A Fresnel Lens For CPV Units. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 937, 2020.