

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГЕЛИОУСТАНОВКИ «ЛУЧ»

Введение. На сегодняшний день существует множество различных конструкций для улавливания энергии Солнца. Они являются дорогостоящими и сложными сооружениями, что препятствует их широкому использованию. Таким образом, требуется провести исследование, направленные на увеличение эффективности улавливания солнечной энергии за счет совершенствования как физических особенностей оптических систем, так и конструктивных разработок, позволяющих уменьшить стоимость оборудования, улучшить эксплуатационные свойства, увеличить надежность гелиооборудования.

Принципиальная схема. Солнечные нагревательные установки по принципу улавливания солнечной энергии делятся на два типа [1]:

- *гелиоколлекторы* — представляют собой лёгкие, компактные конструкции, собираемые по модульному принципу. Основой является плёночно-трубчатый адсорбирующий коллектор. В зависимости от конкретных условий можно получить установку любой производительности;
- *гелиоконцентраторы* — представляют собой установки, фокусирующие параллельные солнечные лучи с помощью линзы в одной точке для выработки электричества или тепла. По причине дороговизны и сложности изготовления огромных линз, используют массивы вогнутых зеркал (классические зеркальные панели или листы полированного алюминия).

Поставим задачу упростить конструкцию гелиоконцентратора, его изготовления и эксплуатации [2, 3].

Одним из путей решения этой задачи является расщепление параболоида вращения на отдельные конусы. В результате концентратор представляет собой совокупность концентрических конусов. Каждый конус — это лента из листового материала, согнутая в виде усечённого конуса, внутренняя поверхность которой выполнена зеркальной. Угол образующей конуса к его оси выбираем таким, чтобы солнечный луч после отражения был направлен в фокус. Понятно, что все конуса имеют один и тот же фокус. Основное правило при расположении и расчёте этих конусов — их проекции на Солнце не должны перекрывать друг друга и полностью, без пропусков, заполнять концентрируемый солнечный поток. Или, другими словами, площадь улавливаемого солнечного потока $S_{с.п.}$ равна площади проекций всех конусов $S_{п.к.}$:

$$S_{с.п.} = S_{п.к.} \quad (1)$$

Конусы дистанционируются относительно друг друга радиусами, при этом образуется продуваемая прочная пространственная конструкция. Радиусы — это плоские элементы с креплениями для конусов. Радиусы закреплены на кольцах, которые крепятся к стойкам.

В фокусе конусов расположен приёмник лучистой энергии — это полая сфера, установленная наверху трубчатой колонны.

Оптическая система гелиоустановки «Луч» состоит из трех основных элементов:

1. Радиусов.
2. Конусов.
3. Крепежных колец.

Радиусы имеют специально вырезанные формы, рассчитанные для крепления конусов под требуемым заданным углом, что является необходимым условием для наилучшего приема потока солнечных лучей.

Важно отметить, что конуса должны располагаться таким образом, чтобы угол падения солнечного луча был равен углу отражения, и, в то же время, конуса не перекрывали друг друга. Солнечные

лучи, попадая на поверхность конуса, отражаются и фокусируются в виде прямой фокусной линии. Таким образом, солнечные лучи, попадая на каждый из конусов и отражаясь, фокусируются в виде размытого фокусного пятна.

Расчёт конусов. На рис. 1 схематично изображено одно из сечений конуса, схема падения и отражения солнечных лучей, показаны некоторые геометрические зависимости между искомыми величинами.

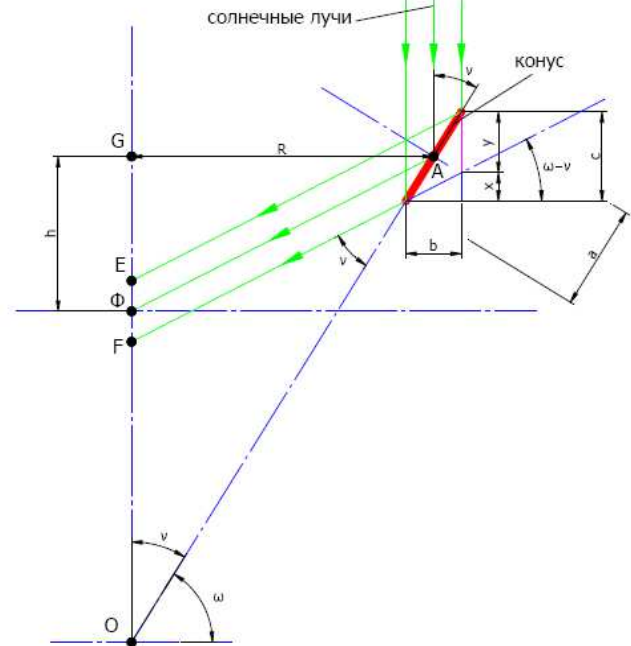


Рис. 1. Определение зависимости среднего радиуса конуса от угла падения солнечных лучей

Фокусную линию EF условно заменяем точкой Φ и дальнейший анализ будем вести относительно этой точки. На основании этих геометрических соображений h – фокусное расстояние:

$$G\Phi = h \quad (2)$$

Задаваясь параметрами R и h , вычисляем угол ω , под которым располагаются конуса, каждый под своим углом ω_i . Из треугольника OAG видно, что ω равен:

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{h + \sqrt{R^2 + h^2}}{R} \quad (3)$$

$$\omega = \operatorname{arctg} \left(\frac{h + \sqrt{R^2 + h^2}}{R} \right) \quad (4)$$

где ω – угол между образующей конуса и направлением радиуса; R – средний радиус конуса (расстояние от середины конуса до оси $O\Phi$).

Угол падения солнечного луча на конус v равен:

$$v = 90 - \omega \quad (5)$$

Принимаем ширину образующей конуса a , тогда конус занимает кольцевое сечение солнечных лучей шириной b :

Янчилин Павел Федорович, ассистент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

$$b = a \cdot \cos \omega . \quad (6)$$

И длиной c :

$$c = a \cdot \sin \omega . \quad (7)$$

Запишем ещё несколько выражений исходя из рис. 1:

$$x = a \cdot \cos \omega \cdot \operatorname{tg}(\omega - v) , \quad (8)$$

$$y = a \cdot \sin \omega - a \cdot \cos \omega \cdot \operatorname{tg}(\omega - v) . \quad (9)$$

Далее рассмотрим зависимости для группы конусов, показанных на рис. 2, при этом должно соблюдаться условие (1).

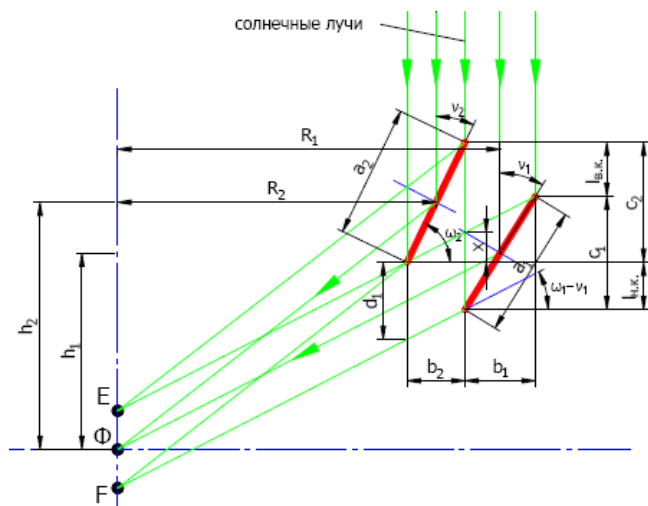


Рис. 2. Определение расстояния между конусами

Расстояние по вертикали между нижними краями конусов $I_{н.к.}$ должно быть равно:

$$I_{н.к.} = d_1 - x , \quad (10)$$

где d_1 – фокусная линия ($d_1 = EF$);

x – расстояние, определяется по формуле (8), с учётом наклона первого конуса:

$$x = b_2 \cdot \operatorname{tg}(\omega_1 - v_1) , \quad (11)$$

где b_2 – проекция образующей конуса 2 на горизонтальную плоскость, определяется по (6).

Выразим d_1 через ширину конуса a_1 :

$$d_1 = \frac{a_1}{2 \cdot \cos v_1} . \quad (12)$$

Подставив выражения (11) и (12) в (10) получим конечную формулу для нахождения $I_{н.к.}$:

$$I_{н.к.} = \frac{a_1}{2 \cdot \cos v_1} - a_2 \cdot \cos \omega_2 \cdot \operatorname{tg}(\omega_1 - v_1) , \quad (13)$$

где a_1, a_2 – ширина образующей конуса 1 и конуса 2 соответственно; ω_1, ω_2 – угол наклона относительно горизонта конуса 1 и конуса 2 соответственно, определяется по (4);

v_1, v_2 – угол падения солнечного луча на конус 1 и конус 2 соответственно, определяется по (5).

Расстояние между верхними краями конусов $I_{в.к.}$, как видно из рис. 2, будет определяться по выражению:

$$I_{в.к.} = c_2 + I_{н.к.} - c_1 , \quad (14)$$

где c_1, c_2 – проекция образующей конуса 1 и конуса 2 на вертикальную плоскость соответственно, определяется по (7).

Подставив выражения (7) и (13) в (14), получим конечную формулу для нахождения $I_{в.к.}$:

$$I_{в.к.} = a_2 \cdot \sin \omega_2 + \frac{a_1}{2 \cdot \cos v_1} - \quad (15)$$

$$- a_2 \cdot \cos \omega_2 \cdot \operatorname{tg}(\omega_1 - v_1) - a_1 \cdot \sin \omega_1 .$$

Эти размеры необходимы для изготовления конусов оптической системы.

Таким образом, вычисляя расстояния до последующих конусов, можно получить следующие выражения:

• по вертикали между нижними краями конусов $I_{н.к.}$:

$$I_{н.к.} = d_i - b_{i+1} \cdot \operatorname{tg}(\omega_i - v_i) \quad (16)$$

или в общем виде, согласно (13):

$$I_{н.к.} = \frac{a_i}{2 \cdot \cos v_i} - a_{i+1} \cdot \cos \omega_{i+1} \cdot \operatorname{tg}(\omega_i - v_i) ; \quad (17)$$

• по вертикали между верхними краями $I_{в.к.}$:

$$I_{в.к.} = c_{i+1} + I_{н.к.} - c_i \quad (18)$$

или в общем виде, согласно (15):

$$I_{в.к.} = a_{i+1} \cdot \sin \omega_{i+1} + \frac{a_i}{2 \cdot \cos v_i} - \quad (19)$$

$$- a_{i+1} \cdot \cos \omega_{i+1} \cdot \operatorname{tg}(\omega_i - v_i) - a_i \cdot \sin \omega_i .$$

Каждый конус занимает кольцо солнечного потока шириной b_i – по формуле (6). Тогда, если ширина образующей конусов a одинаковая, то количество конусов N равно:

$$N = \frac{R_{\max}}{a \cdot \cos \omega_{cp}} , \quad (20)$$

где R_{\max} – радиус максимально удалённой точки первого конуса от оси $O\Phi$:

$$R_{\max} = R_1 + \frac{b_1}{2} , \quad (21)$$

ω_{cp} – средний угол наклона относительно горизонта всех конусов.

При конструировании оптической системы по схеме «к фокусу и вверх» (по направлению расчёта конусов) возникает проблема: угол ω каждый раз увеличивается и при достижении 65–70° дальнейшее расположение «в том же порядке» конусов нецелесообразно. С каждым последующим конусом расстояния между ними уменьшаются и конуса располагаются чаще. Эффективность использования площади поверхности конуса при этом уменьшается, т.к. она обусловлена кольцевым сечением солнечных лучей шириной b по формуле (6). Очевидно, что чем больше угол ω , тем меньше $\cos \omega$ ($\cos 90^\circ = 0$) и, следовательно, полезная ширина b . Оптимальный угол ω для самого верхнего конуса принимаем 65–70°.

Ширина кольцевого сечения отражённых солнечных лучей «верхними» или «передними» конусами $B_{вепх}$ равна:

$$B_{вепх} = \sum_{i=1}^n b_i , \quad (22)$$

где b_i – проекция образующей i -го конуса на горизонтальную плоскость, определяется по (6);

n – количество «верхних» конусов (определяется по построению при достижении угла $\omega=65-70^\circ$);

При условии, что ширина образующей конусов a одинаковая, получим:

$$B_{вепх} = \sum_{i=1}^n a \cdot \cos \omega_i . \quad (23)$$

Но, выполняя условие (1), мы должны всю площадь солнечного потока $S_{с.п.}$ образованную максимальным радиусом конуса R_{\max} , направить в фокус (точку Φ). При помощи «верхних» конусов мы

собираем площадь солнечного потока $S_{с.п.}^e$ (площадь кругового кольца) равную:

$$S_{с.п.}^e = \pi \cdot [R_{\max}^2 - (R_{\max} - B_{\text{верх}})^2]. \quad (24)$$

После преобразования получим:

$$S_{с.п.}^e = \pi \cdot B_{\text{верх}} \cdot (2R_{\max} - B_{\text{верх}}). \quad (25)$$

Осталось собрать площадь солнечного потока заключённую внутри нашего кругового кольца. Т.к. «сверху» располагать далее конуса нецелесообразно, то остаётся вариант «нижнего» или «заднего» сбора солнечного потока относительно плоскости перпендикулярной оси $O\Phi$. В итоге при помощи «нижних» конусов получим площадь $S_{с.п.}^H$:

$$S_{с.п.}^H = S_{с.п.} - S_{с.п.}^e. \quad (26)$$

Дальнейшее конструирование оптической системы осуществляется по схеме «к фокусу и вниз», соблюдая условие — угол образующей конуса к его оси выбирается так, чтобы солнечный луч после отражения был направлен в фокус.

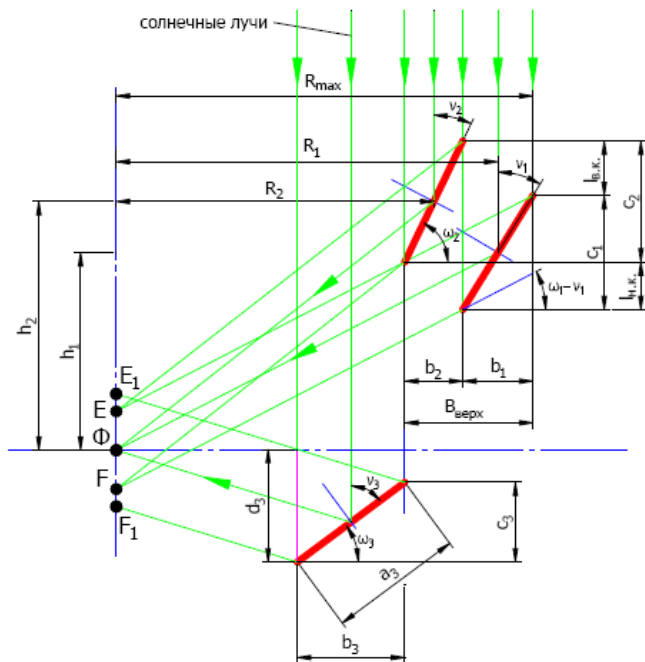


Рис. 3. Определение зависимостей между «верхними» и «нижними» конусами

На рис. 3 видно, что фокусная линия d_3 (E_1F_1) от «нижнего» конуса несколько больше, чем фокусные линии (EF) от «верхних» конусов. Обусловлено это тем, что мы принимаем ширину образующей конуса a равной для всех конусов, а по формуле (12) фокусная линия зависит от величины a и косинуса угла падения солнечного луча на конус v . С изменением угла v меняется и $\cos v$ — следовательно, фокусная линия для каждого конуса имеет свой размер.

Формула для определения фокусной линии «верхних» и «нижних» конусов одинакова и имеет вид (по формуле (12)):

$$d_i = \frac{a_i}{2 \cdot \cos v_i}. \quad (27)$$

По завершению расчёта оптической системы мы получаем множество фокусных линий, меняющихся в диапазоне от EF до E_1F_1 . Центры всех этих линий лежат в точке Φ . В этой же точке должен располагаться теплоприёмник, желательнее сферической формы. Его размеры будут обуславливаться размерами полученных фокусных линий.

Изготовление конусов. Конуса могут изготавливаться из стеклопластика, алюминиевой полосы, пластмассы и покрываются светоот-

ражающим покрытием, например, аэрозольной краской MARPA M-8920 — акриловая краска с эффектом хрома. Хром является обязательным компонентом нержавеющих, кислотоупорных и жаропрочных сталей и большого числа других сплавов. Краски на его основе устойчивы к кислороду и свету, наносятся на поверхность изделий для повышения твердости, предотвращения коррозии, что в свою очередь является хорошей характеристикой долговечности установки.

Внешне конус оптической системы показан на рис. 4. Его основные параметры: диаметр большей дуги D_6 и диаметр меньшей дуги D_M . Для изготовления конуса нам потребуется его развёртка. Основные параметры развёртки конуса: внешний радиус или радиус развёртки R_p , длина внешней дуги L , угол развёртки α и ширина пластины a .

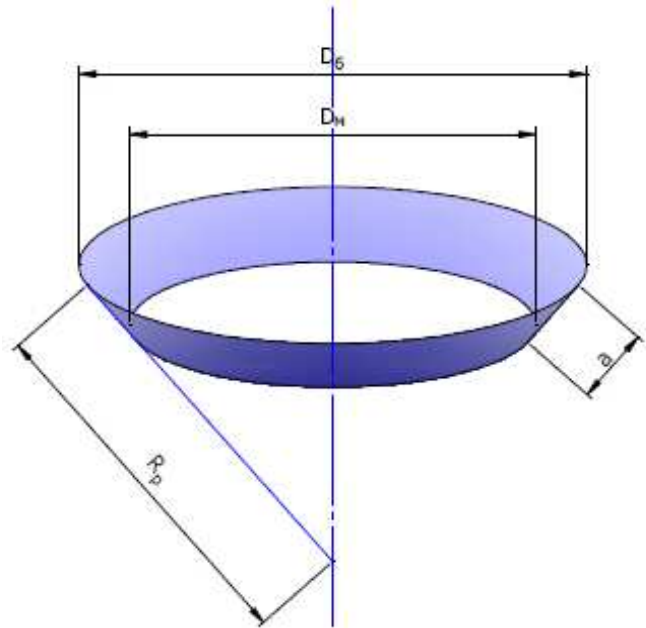


Рис. 4. Внешний вид конуса оптической системы

Имея определённое количество конусов и их основные размеры D_6 и D_M по итогам первого пункта, нужно рассчитать размеры их развёрток.

Радиус развёртки R_p :

$$R_p = a \frac{D_6}{D_6 - D_M}. \quad (28)$$

Длина внешней дуги L :

$$L = \pi \cdot D_6. \quad (29)$$

Чтобы найти угол развёртки α рассмотрим соотношение: длина внешней окружности $2\pi R$ относится к углу 360° , так как длина внешней дуги L относится к углу $360^\circ - \alpha$.

$$\frac{360^\circ}{360^\circ - \alpha} = \frac{2\pi R_p}{L}. \quad (30)$$

После преобразования получим:

$$\frac{360^\circ}{360^\circ - \alpha} = \frac{2R_p}{D_6}. \quad (31)$$

Угол развёртки α равен:

$$\alpha = 360^\circ \cdot \left(1 - \frac{D_6}{2R_p}\right). \quad (32)$$

Используя вышеприведённые выражения и зависимости, была рассчитана оптическая система гелиоцентрактора диаметром 2,4 метра. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Геометрические размеры конусов гелиоконцентратора

N конусов	Диаметр большой, D_b	Диаметр меньший, D_m	Ширина, a	Радиус раз- вертки, R_p	Дуга раз- вертки, L	Угол раз- вертки, α	$\beta=360-\alpha$
«Верхние» конуса							
1	2408	2204	150	1771	7565	115,3	244,7
2	2204	2012	150	1722	6924	129,6	230,4
3	2012	1836	150	1715	6321	148,8	211,2
4	1836	1672	150	1679	5768	163,2	196,8
5	1672	1528	150	1742	5253	187,2	172,8
6	1528	1384	150	1592	4800	187,2	172,8
7	1384	1252	150	1573	4348	201,6	158,4
«Нижние» конуса							
8	1260	1028	150	815	3958	81,7	278,3
9	1028	780	150	622	3230	62,5	297,5
10	792	516	150	430	2488	28,5	331,5
11	516	220	150	262	1621	5,5	354,5
12	220	0	110	110	691	0	360,0

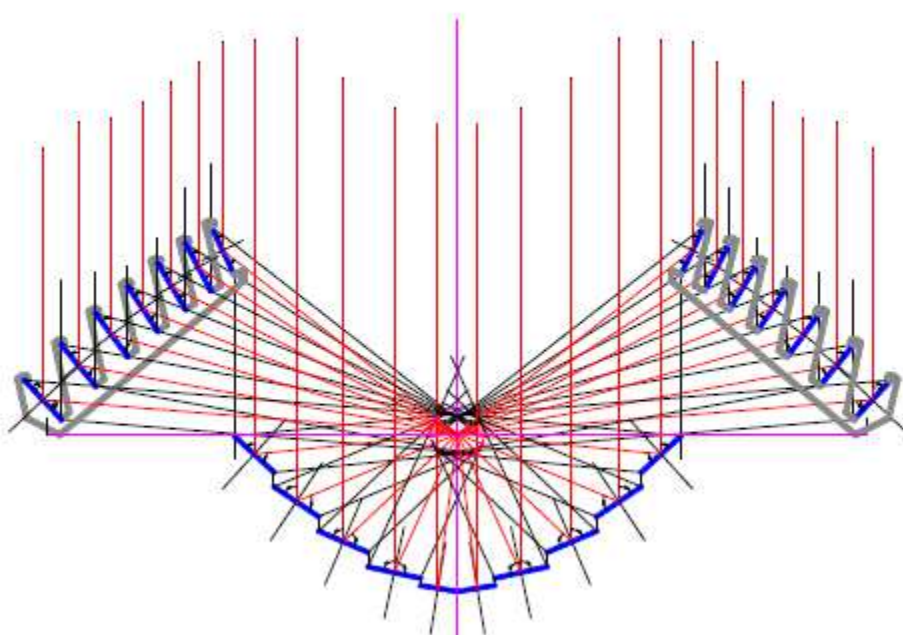


Рис. 5. Рассчитанная схема оптической системы гелиоконцентратора

Полная компоновка «верхних» (передних) и «нижних» (задних) конусов, т.е. поперечное сечение гелиоконцентратора с центральным теплоприёмником, на котором сходятся лучи, показана на рис. 5, как результат выведенных выше математических зависимостей.

Этот гелиоконцентратор разработанной механической схемой наводится на Солнце, поэтому гелиоустановка авторами названа «ЛУЧ».

Заключение. Задача упрощения конструкции гелиоконцентратора решена путём расщепления параболоида вращения на отдельные конусы. Гелиоконцентратор представляет собой совокупность концентрических конусов, имеющих общий фокус на теплоприёмнике. Рассчитаны параметры этих конусов и их компоновочная схема.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кузьмич, В.В. Расчёт гелиоводонагревательных систем и их применение в сельском хозяйстве. – Минск: БелНИИСХМ, 1997. – 87 с.
2. Гелиоустановка: пат. 3998 Респ. Беларусь, МПК F 24J 2/00 / Северянин В.С.; заявитель Брестск. гос. техн. ун-т – № 20070327 заявл. 02.05.2007, опубл. 01.08.2007.
3. Гелиоконцентратор: пат. 4296 Респ. Беларусь, МПК F 24J 2/00 / Северянин В.С.; заявитель Брестск. гос. техн. ун-т – № 20070576 заявл. 03.08.2007, опубл. 17.12.2007.

Материал поступил в редакцию 01.03.10

SEVERAYNIN V.S., YANCHILIN P.F. Features of calculation of optical system of a solar power plant "LUCH"

For today there is a set of various designs for catching of energy of the Sun. They are expensive and difficult constructions that interferes with their wide use. Thus, it is required to carry out the researches directed on increase of efficiency of catching of a solar energy at the expense of perfection both physical features of optical systems, and the constructive workings out, allowing to reduce equipment cost, to improve an operating ability, to increase reliability of helio-installation. Therefore the problem is put to simplify a design of helio-concentrator, its manufacturing and operation. The decision is splitting of a paraboloid of rotation on separate cones. As a result the concentrator represents set of the concentric cones having general focus on a heat receiver.