

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ОТРАЖАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СОСТАВНЫХ ФАЦЕТНЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ

Кучкаров Акмалжон Ахмадалиевич, старший научный сотрудник Института материаловедения Научно-производственного объединения «Физика-Солнце» АН РУз. Ташкент, Узбекистан. E-mail: ims-79@mail.ru

Абдурахманов Абдужаббар, доктор технических наук, профессор; зав. лабораторией № 2 Института материаловедения Научно-производственного объединения «Физика-Солнце» АН РУз. Ташкент, Узбекистан. E-mail: aabdujabbar46@mail.ru

Рахимов Рустам Хакимович, доктор технических наук, профессор; зав. лабораторией № 1. Института материаловедения Научно-производственного объединения «Физика-Солнце» АН РУз. Ташкент, Узбекистан. E-mail: rustam-shsul@yandex.com

Аннотация. В работе рассмотрены основные соотношения выбора оптимальных размеров элементов мозаичных концентраторов, а также элементов-фацет крупногабаритных на параболической и параболической дрической основе с учетом оптимального размера пятна рассеяния (приемника) при максимальном значении КПД, получаемого для ЗКС энергетического назначения.

Ключевые слова: парабола, параболический цилиндр, фокус, фацета и концентратор, приемник.

Производство крупногабаритных цельных параболических, параболических дрических в основном энергетического назначения технологического или энергетического назначения и зеркал связано с большими технологическими в изготовлении трудностями, поэтому мощные энергетические и технологические концентраторы экономичнее изготавливать из отдельных отражающих элементов – фацет [1–4]. К таким составным концентраторам можно отнести солнечные энергетические установки башенного типа, состоящие из многих численных плоских с оптически отражающей поверхностью гелиостатов с определенной площадью [5]. Одним из первичных, простых в изготовлении вариантов таких типов: являются мозаичные концентраторы, отдельные элементы которых имеют плоскую отражающую поверхность [6]. Имея приближенную параболическую и параболическую цилиндрическую поверхность, изготовленную тем или иным способом в процессе приклейки оптимальных размера плоских отражающих элементов на поверхность концентратора, юстируя эти элементы, можно добиться хорошего качества фокального пятна [7–8].

Оптимальный апертурный угол U_{opt} с учетом неточности изготовления $\Delta\alpha$ мозаичного концентратора аналогичен для цельного параболического вращения приставленному в работах [9].

Зависимость оптимального размера приемника с максимальным значениям КПД системы, получаем из выражения:

$$dCk = \frac{\pi y^2}{\pi r_4^2} = \frac{y^2}{\pi r_4^2} = \frac{4f^2 \operatorname{tg} \frac{U}{2}}{r_4} = dU = 0. \quad (1)$$

Решение этого уравнения дает значения для $\operatorname{tg} U_{\text{opt}}$

$$\operatorname{tg} U_{\text{opt}} = -\operatorname{tg}(\gamma_0 + \Delta\alpha) + \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\gamma_0 + \Delta\alpha)}. \quad (2)$$

Для мозаичного концентратора, состоящего из плоских элементов величина $\Delta\alpha$ определяется как сумма:

$$\Delta\alpha = \Delta\alpha_n + \Delta\alpha_c, \quad (3)$$

где $\Delta\alpha_n$ – точностные характеристики изготовления поверхности отдельных элементов; $\Delta\alpha_c$ – погрешности, возникающие из-за отличия оптически плоской поверхности отдельного плоского элемента от соответствующей зоны параболического.

В общем виде изменение концентрации определяется:

- в зоне от 0 до r_0 :

$$Ck_0 = \int_0^{\operatorname{tg}(U/2)} \frac{y^2}{r_0^2} d \operatorname{tg} \left(\frac{U}{2} \right) + \int_0^{\operatorname{tg}(U/2)} \frac{y^2}{r_2^2} d \operatorname{tg} \left(\frac{U}{2} \right) + \int_0^{\operatorname{tg}(U/2)} \frac{y^2}{r_3^2} d \operatorname{tg} \left(\frac{U}{2} \right) + \int_0^{\operatorname{tg}(U/2)} \frac{y^2}{r_4^2} d \operatorname{tg} \left(\frac{U}{2} \right), \quad (4)$$

где $r_0 = f \operatorname{tg}(\gamma_0 + \Delta\alpha)$;

- в зоне от r_0 до r_2

$$Ck_2 = \int_0^{\operatorname{tg}(U/2)} \frac{y^2}{r_2^2} d \operatorname{tg} \left(\frac{U}{2} \right) + \int_0^{\operatorname{tg}(U/2)} \frac{y^2}{r_3^2} d \operatorname{tg} \left(\frac{U}{2} \right) + \int_0^{\operatorname{tg}(U/2)} \frac{y^2}{r_4^2} d \operatorname{tg} \left(\frac{U}{2} \right), \quad (5)$$

где

$$r_2 = f \left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(\frac{U}{2} \right) \right) \operatorname{tg}(\gamma_0 + \Delta\alpha);$$

- в зоне от r_2 до r_3

$$Ck_3 = \int_0^{\operatorname{tg}(U/2)} \frac{y^2}{r_3^2} d \operatorname{tg} \left(\frac{U}{2} \right) + \int_0^{\operatorname{tg}(U/2)} \frac{y^2}{r_4^2} d \operatorname{tg} \left(\frac{U}{2} \right), \quad (6)$$

где

$$r_3 = \frac{f \left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(\frac{U}{2} \right) \right)^2 \operatorname{tg}(\gamma_0 + \Delta\alpha)}{1 - \operatorname{tg}^2 \left(\frac{U}{2} \right) + 2 \operatorname{tg} \left(\frac{U}{2} \right) \operatorname{tg}(\gamma_0 + \Delta\alpha)};$$

Кучкаров А.А., Абдурахманов А., Рахимов Р.Х.

- в зоне от r_3 до r_4

$$Ck_4 = \int_0^{\text{tg}(U/2)} \frac{y^2}{r_4^2} d \text{tg} \left(\frac{U}{2} \right), \quad (7)$$

где r_4 равно величине

$$r_4 = \frac{f \left(1 + \text{tg}^2 \left(\frac{U}{2} \right) \right)^2 \text{tg}(\gamma_0 + \Delta\alpha)}{1 - \text{tg}^2 \left(\frac{U}{2} \right) - 2 \text{tg} \left(\frac{U}{2} \right) \text{tg}(\gamma_0 + \Delta\alpha)}, \quad (8)$$

где

$$y = 2f \text{tg} \left(\frac{U}{2} \right);$$

U, f – конкретные значения параметров изготавливаемого концентратора.

Для технологических установок размерность элементов – фацет также из-за формирования более плотной зоны на площади величиной радиуса $r_0 = f \text{tg}(\gamma_0 + \Delta\alpha)$ соответствует указанному выше оптимальному размеру. Хотя в указанном выражении отсутствует влияния апертурного угла, но в зону $0-r_0$ поступает излучения без исключения т всех зон концентратора с апертурным углом от 0 до U_{max} но с постоянным уменьшением плотности из-за косоуго падения эллиптических отображений в фокальную плоскость на величину $\pi u^2 / \pi r_4^2$ [10].

С помощью теоретически точного параболоида вращения диаметром $2u$ с круглосимметричным оптимальным размером фокального пятна $d_{\text{опт}} = 2r_4$ или параболоцилиндра вращения определенного размера миделя $2Ly = 4fL \text{tg}(U/2)$, где f – фокусное расстояние. Попытаемся решить задачу определения оптимального размера элемента мозаичного концентратора или линейного элемента параболоцилиндра. Отдельное плоское зеркало определенного размера l_n устанавливается касательно к этой параболической или параболоцилиндрической поверхности. Найдем оптимальную зависимость размера элемента (плоского зеркала) от оптимального в энергетическом плане размера (диаметра) фо-

кального пятна. При этом рассмотрим случай, когда на параболическую поверхность падают пучок лучей с видимым угловым размером Солнца $2\gamma_0$ (например, для условия Земли $2\gamma_0 = 32'$), центральный луч поступающего пучка можно считать параллельной оптической оси параболоида вращения или параболоцилиндра из-за $2\gamma \ll L_c$ рассматриваемая плоскость проходит через фокальную точку перпендикулярно к главной оптической оси.

Угол между оптической осью и N_1, N_2 нормалью β к параболоиду (см. рис. 1) имеет различные значения для различных точек параболической поверхности, причем наименьшее значение приобретает для самой крайней точки концентратора.

$$N, N_3 = 2f \sqrt{1 + \text{tg}^2(U/2)} \quad (9)$$

где $N_1, N_2 = l_n$ – размер элемента мозаичного концентратора (l_n – длина нормали рассматриваемой точки параболоида).

Это означает, что от плоского зеркала, установленного в этой точке, пойдет пучок лучей с видимым угловым размером Солнца $2\gamma_0$, наиболее отклоненных к оптической оси, и эти лучи, пересекаясь в фокальной плоскости, дадут образуют размер пятна рассеяния с наибольшим r_4 . Кроме того, необходимо учитывать не только пересечение этих пучков, но и пересечение отраженных пучков от крайних точек плоского зеркала симметрично расположенных к рассматриваемой точке параболоида. Поэтому при условии, что размеры зеркал одинаковы, производятся расчеты для крайнего зеркала, из условия, что отраженные от других зеркал, расположенных касательно к точке параболоида с меньшим апертурным углом $U < U_{\text{max}}$ имеют размер фокального пятна меньше угла раскрытия $2U_{\text{max}}$. β_{max} – угол между оптической осью параболоида и нормалью к отражающей поверхности β связаны, т.е.

$$U_{\text{max}} = 2\beta_{\text{max}} \quad (10)$$

то есть угол пересечения нормали оптической осью $\beta = U/2$. Равно половине апертурного угла U параболоида.

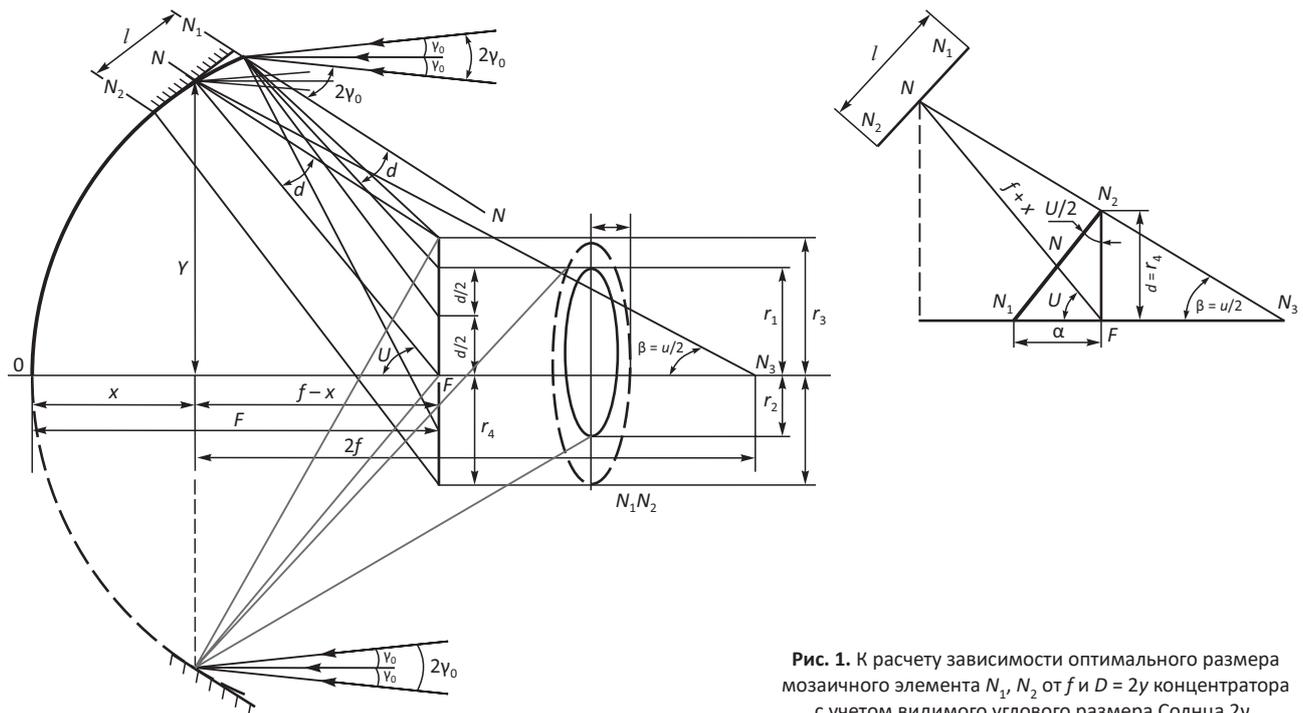


Рис. 1. К расчету зависимости оптимального размера мозаичного элемента N_1, N_2 от f и $D = 2u$ концентратора с учетом видимого углового размера Солнца $2\gamma_0$

Размер элемента мозаичного концентратора выразим через N_1, N_2 , где $2u = D = 4f \operatorname{tg}(U/2)$ – диаметр и f – фокусное расстояние концентратора. То есть оптимальный размер элемента – фаcet составного концентратора (мозаичного концентратора), а также линейного элемента парабоцилиндрического концентратора определяется аналогично и зависит от диаметра $2u$ и фокусного расстояния f . Эти величины определяют мощность концентратора в целом

$$W = E_c R_z \pi u^2 = E_c R_z C_{cp} \pi r_4^2. \quad (11)$$

где E_c – плотность прямо падающего лучистого потока Солнца; R_z – коэффициент зеркального отражения.

Необходимость такого рассмотрения вытекает из условия закона сохранения энергии лучистых потоков, поступающих в мидель концентратора и на основании этого перераспределения ее в фокальной плоскости.

С учетом свойств параболической и парабоцилиндрической поверхностей можно записать следующие выражения:

$$(N_1 N_2)^2 = r_4^2 + a^2, \quad (12)$$

$$a/r_4 = \operatorname{tg} \beta,$$

откуда

$$a = r_4 \operatorname{tg}^2 \left(\frac{U}{2} \right), \quad (13)$$

тогда

$$(N_1, N_2)^2 = r_4 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \left(\frac{U}{2} \right)}. \quad (14)$$

Учитывая (8) получим

$$l = N_1 N_2 = f \frac{\left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(\frac{U}{2} \right) \right)^2 \operatorname{tg}(\gamma_0 + \Delta\alpha)}{1 - \operatorname{tg}^2 \left(\frac{U}{2} \right) - 2 \operatorname{tg} \left(\frac{U}{2} \right) \operatorname{tg}(\gamma_0 + \Delta\alpha)} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \left(\frac{U}{2} \right)}. \quad (15)$$

Рассмотрим действительное условие работы концентратора, как энергетической установки и с максимальным значением КПД, когда на каждую точку ее поверхности падают пучки лучей, идущих от Солнца должны войти в приемник оптимального размера. Учитывая, что средний угловой размер Солнца, $2\gamma_0 = \operatorname{tg}(32') = 0,0093$ и $\gamma_0 = \operatorname{tg}(16') = 0,00465$ для условия Земли как было указано выше, получаем зависимость оптимального диаметра фокального пятна r_4 от углового размера Солнца, фокусного расстояния при учете U_{opt} имеет следующее значение:

$$r_{4opt} = f \frac{\left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(\frac{U_{opt}}{2} \right) \right)^2 \operatorname{tg}(\gamma_0 + \Delta\alpha)}{1 - \operatorname{tg}^2 \left(\frac{U_{opt}}{2} \right) - 2 \operatorname{tg} \left(\frac{U_{opt}}{2} \right) \operatorname{tg}(\gamma_0 + \Delta\alpha)}. \quad (16)$$

В первом приближении можно считать, что лучи от крайнего зеркала и определяют дополнительное увеличение, т.е. действительный диаметр фокального пятна с учетом углового размера Солнца от отдельного плоского зеркала, установленного, касательно к параболическим и парабоцилиндрическим поверхностям равен:

$$d = d' + d'' = 2r_{opt} + 2r_{4r}, \quad (17)$$

но при этом потери энергии лучистого потока от крайней точки facets незначительны, то есть $E_{кр}$ от крайней точки F :

$$E_{кр} = E_c R_z \frac{\pi r_0^2}{\pi r_4^2} = E_c R_z \frac{r_0^2}{r_4^2} = E_c R_z \frac{\left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(\frac{U_{opt}}{2} \right) \right)^2 \operatorname{tg}^2(\gamma_0 + \Delta\alpha)}{\left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(\frac{U_{opt}}{2} \right) \right)^4 \operatorname{tg}^2(\gamma_0 + \Delta\alpha)} \times \left(1 - \operatorname{tg}^2 \left(\frac{U_{opt}}{2} \right) - 2 \operatorname{tg} \left(\frac{U_{opt}}{2} \right) \operatorname{tg}(\gamma_0 + \Delta\alpha) \right), \quad (18)$$

откуда

$$E_{кр} = E_c R_z \frac{\left(1 - \operatorname{tg}^2 \left(\frac{U_{opt}}{2} \right) - 2 \operatorname{tg} \left(\frac{U_{opt}}{2} \right) \operatorname{tg}(\gamma_0 + \Delta\alpha) \right)}{\left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(\frac{U_{opt}}{2} \right) \right)^2}. \quad (19)$$

Получены основные выражения для оптимальных вариантов расчета размеров отдельных элементов составных ЗКС, а также расчетные уравнения для концентрирующей способности и энергетических характеристик указанных систем.

Выводы

1. Выявлена зависимость размера элемента (плоского зеркала) от размера (диаметра) фокального пятна для концентрирующих систем с парабоидными и парабоцилиндрическими зеркалами для случая плоской формы фокальной зоны.
2. Разработан метод расчета размеров отдельных отражающих элементов мозаичного концентратора с жесткой параболической поверхностью.

Литература

1. *Zakhidov R.A.* Technology and Testing of Solar Energy Concentrating Systems // (English Edition) Gujarat Energy Development Agency Vadodara. 1996. P. 184.
2. *Абдурахманов А.А.* Зеркально-концентрирующие системы солнечных энергосиловых и технологических установок и их эффективность при использовании приемников селективного лучепоглощения: Дис. доктора технических наук. М.: 1992. 300 с.
3. *Стребков Д.С., Тверьянович Э.В.* Концентраторы солнечного излучения // под. ред. академика РАСХН Д.С. Стребкова. М.: ГНУ ВИЭСХ. 2007. С. 316.
4. *Бронштейн Ю.Л.* Крупногабаритные зеркальные системы (контроль геометрии, юстировка). М.: ДПК Пресс. 2015. С. 600.
5. *Клычев Ш.И.* Моделирование приемно-концентрирующих устройств солнечных теплоэнергетических установок: Дис. ... д-ра техн. наук. Ташкент: ФТИ, 2004. 268 с.
6. *Кучкаров А.А., Абдурахманов А.* Расчет оптимальных размеров отражающих элементов мозаичного концентратора // Материалы Республ. науч.-техн. конф. «Современные проблемы возобновляемой энергетики». 18–19 мая 2018, Карши. С. 67–71.
7. *Kuchkarov A.A., Kholova Sh.R., Abdumuminov A.A., Abdurakhmanov A.* Optical energy characteristics of the optimal module of a solar composite parabolic-cylindrical plant // Applied Solar Energy. New York, 2018. Vol. 54. № 4. P. 293–296.
8. *Akbarov R.Yu., Kuchkarov A.A.* Modeling and Calculation of Optical-Geometric Characteristics of a Solar Concentrator with Flat Fresnel Mirrors // Applied Solar Energy. New York. 2018. Vol. 54. № 3. P. 187–192.
9. *Абдурахманов А.А., Ахадов Ж.З., Маматкосимов М.А., Клычев Ш.И.* Концентрирующие системы и выбор оптимальных параметров лучевос-принимающей поверхности // Гелиотехника. 2009. № 2. С. 72–76.
10. *Kuchkarov A.A., Holov Sh.R., Abdumuminov A.A., Abdurakhmanov A.* Calculation of optical-geometrical characteristics of parabolic-cylindrical mirror concentrating systems // European science review. 2017. № 1–2. P. 28–32.

СТАТЬЯ ПРОШЛА РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ 05.14.01
ЧЛЕНАМИ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ
ЖУРНАЛА «COMPUTATIONAL NANOTECHNOLOGY»

DOI: 10.33693/2313-223X-2019-6-3-100-103

CALCULATION OF THE OPTIMAL SIZE
OF THE REFLECTING ELEMENT LARGE COMPOUND
FACET CONCENTRATORS

Kuchkarov Akmaljon Akhmadalievich, senior researcher at the Institute of Materials Science «Physics-Sun» of the Uzbekistan Academy of Sciences. Tashkent, Uzbekistan. E-mail: ims-79@mail.ru

Abdurakhmanov Abdujabbar Achmadalievich, doctor of the Technical Sciences, professor; head of Laboratory № 2 at the Institute of Materials Science «Physics-Sun» of the Uzbekistan Academy of Sciences. Tashkent, Uzbekistan. E-mail: aabdujabbar46@mail.ru

Rakhimov Rustam Khakimovich, doctor of the Technical Sciences, professor; head of Laboratory № 1 at the Institute of Materials Science «Physics-Sun» of the Uzbekistan Academy of Sciences. Tashkent, Uzbekistan. E-mail: rustamshsul@yandex.com

Abstract. The main relationships of choosing the optimal sizes of elements of mosaic concentrators, as well as large-sized facet elements on a paraboloid and parabolacylindrical basis, are considered taking into account the optimal size of the scattering spot (receiver) at the maximum value of the efficiency obtained for energy-based MCS.

Key words: parabola, parabolacylinder, focus, facet and concentrator, receiver.

Referent list

1. Zakhidov R.A. Technology and Testing of Solar Energy Concentrating Systems (English Edition). Gujarat Energy Development Agency Vadodara. 1996. P. 184.
2. Abdurakhmanov A.A. Mirror-concentrating solar power and process plants and their efficiency when using the receivers selective lucapagano: Dis. doctor of technical Sciences. M: 1992. 300 p.
3. Strebkov D.S. Tver'yanovich E.V. The Concentrators of solar radiation Under / ed. of academician D.S. Strebkova. Moscow: GNU VIESKH. 2007. P. 316.
4. Bronstein Yu.L. Bulky mirror system (control of geometry, alignment). Moscow: DPK Press, 2015. 600 p.
5. Klychev Sh.I. Modeling of receiving-concentrating devices of solar thermal power plants: Dis. Ph.D. Tashkent: FTI, 2004. 268 p.
6. Kuchkarov A. A., Abdurakhmanov A. Calculation of the optimal sizes of the reflecting elements of the mosaic concentrator. *Proceedings of the Republican scientific and technical conference "Modern problems of renewable energy"*. May 18–19, 2018, Karshi. P. 67–71.
7. Kuchkarov A.A., Kholova Sh.R., Abdumuminov A.A., Abdurakhmanov A. Optical energy characteristics of the optimal module of a solar composite parabolic-cylindrical plant. *Applied Solar Energy*. New York. 2018. Vol. 54. № 4. P. 293–296.
8. Akbarov R.Yu., Kuchkarov A.A. Modeling and Calculation of Optical-Geometric Characteristics of a Solar Concentrator with Flat Fresnel Mirrors. *Applied Solar Energy*. New York. 2018. Vol. 54. № 3. P. 187–192.
9. Abdurakhmanov A.A., Akhadov J.Z., Mamadazimov M.A. Klychev Sh.I. The concentrating system and the choice of optimal parameters lucios-receiving surface. *The Solar Engineering*. 2009. № 2. P. 72–76.
10. Kuchkarov A.A., Holov Sh.R., Abdumuminov A.A., Abdurakhmanov A. Calculation of optical-geometrical characteristics of parabolic-cylindrical mirror concentrating systems. *European science review*. 2017. № 1–2. P. 28–32.