

DOI: 10.17516/1999-494X-0286

УДК 004.714

Solar Parabolocylindrical Installations, Constructive Features and Calculation of Individual Parameters

Sirozhiddin F. Ergashev and Ulugbek Zh. Nigmatov*
*Ferghana Polytechnic Institute
Ferghana, Republic of Uzbekistan*

Received 12.01.2021, received in revised form 09.02.2021, accepted 16.02.2021

Abstract. The article gives a brief description of a solar parabolic-cylindrical installation and its main element, an optical concentrator. The analysis is based on the most simplified and sufficiently accurate methodology for calculating the coefficient of geometric concentration of parabolic-cylindrical mirrors. The cases of an ideal parabolic-cylindrical concentrator having a small aperture are considered. A variant of calculating the concentration coefficient of a parabolic cylindrical concentrator for cylindrical and flat receivers is presented.

Keywords: parabolic cylinder, concentrator, geometric, aperture, receiver, focusing, elliptical.

Citation: Ergashev S.F., Nigmatov U.Zh. Solar parabolocylindrical installations, constructive features and calculation of individual parameters, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2021, 14(1), 33-41. DOI: 10.17516/1999-494X-0286

Солнечные параболоцилиндрические установки, конструктивные особенности и расчет отдельных параметров

С. Ф. Ергашев, У. Ж. Нигматов
*Ферганский политехнический институт
Республика Узбекистан, Фергана*

Аннотация. В статье дана краткая характеристика солнечной параболоцилиндрической установки и его основного элемента – оптического концентратора. Произведен анализ на основе наиболее упрощенной и достаточно точной методики расчета коэффициента геометрической концентрации параболоцилиндрических зеркал. Рассмотрены случаи идеального параболоцилиндрического

концентратора, имеющего небольшую апертуру. Представлен вариант вычисления коэффициента концентрации параболоцилиндрического концентратора для цилиндрических и плоских приемников.

Ключевые слова: параболоцилиндр, концентратор, геометрический, апертура, приемник, фокусирование, эллиптический.

Цитирование: Ергашев, С.Ф. Солнечные параболоцилиндрические установки, конструктивные особенности и расчет отдельных параметров / С.Ф. Ергашев, У.Ж. Нигматов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2021, 14(1). С. 33-41. DOI: 10.17516/1999-494X-0286

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется разработке, экспериментальному исследованию и практическому применению солнечных параболоцилиндрических энергетических установок как одного из наиболее дешевых и перспективных вариантов преобразования солнечной энергии в электрическую и тепловую [1–4]. Это связано с тем, что в параболоцилиндрических концентраторах регулировка и фокусировка зеркал осуществляются с относительно невысокой точностью и легко [5, 6]. Они могут работать с простыми системами слежения за Солнцем. Вследствие этого в целом капитальные затраты на эти установки могут быть небольшими [7].

Зеркальная поверхность оптического концентратора образуется продольным передвижением параболы по длине оси, перпендикулярной к оси, проходящей через ее вершину. Поэтому параболоцилиндрическими называются зеркала, имеющие вид корыта (желоба) с профильным сечением в форме параболы, а в продольном сечении – в виде прямой плоскости. В отличие от параболоидных параболоцилиндрические концентраторы не создают максимальную концентрацию лучистого потока, так как они в профильной плоскости работают аналогично параболоидному отражателю, а в продольной – плоскому зеркалу. Следовательно, параболоцилиндрические установки относят к среднетемпературным солнечным установкам. Диапазон их рабочих температур $60 \div 460$ °С [8].

Следует отметить, что конструктивно и технологично удобно выполнять параболоцилиндрические установки по модульной схеме, когда каждый модуль представляет собой оптический концентратор с приемником тепла и системой слежения.

Исполнение по модульной схеме позволяет собирать установку любой необходимой мощности, а также существенно упрощать опорные конструкции и механизмы привода системы слежения за Солнцем. Систематизирование методов расчета и технологии изготовления, а по конструктивным признакам выявление конструктивных и технологических достоинств и недостатков каждого элемента параболоцилиндрической системы, а также сравнительная оценка их энергетических и технико-экономических характеристик актуальны и представляют определенный практический интерес.

Методы и материалы

Проанализируем наиболее упрощенную и достаточно точную методику расчета коэффициента геометрической концентрации параболоцилиндрических зеркал. Вопросы расчета коэффициента геометрической концентрации K_{Γ} параболоцилиндрических зеркал рассма-

тривались многими авторами [9–12]. Были предложены простые выражения для определения среднегеометрической и максимальной величины коэффициента геометрической концентрации. Кроме того, решались задачи выбора оптимальных размеров и формы приемника для достижения максимальной степени концентрации.

В случае идеального параболоцилиндрического концентратора, имеющего небольшую апертуру (рис. 1), степень геометрической концентрации определяется выражением

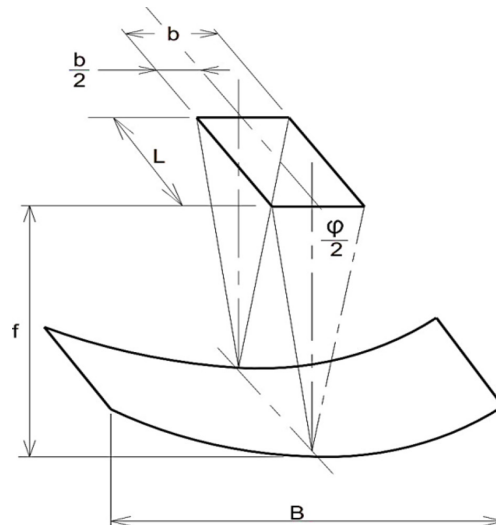


Рис. 1. Схема параболоцилиндрического концентратора с небольшой апертурой B

Fig. 1. Diagram of a parabolic cylindrical concentrator with a small aperture B

$$K_r = \frac{BL}{bL} = \frac{B}{b}. \quad (1)$$

Известно, что с увеличением апертуры увеличивается и фокусное расстояние, а также угол раскрытия (охвата) концентратора. Эта связь (так называемая степень раскрытия зеркала) характеризуется уравнением

$$\frac{B}{f} = n; \quad (2)$$

на рис. 1 видно, что ширина фокального пятна b определяется выражением

$$b = 2ftg\frac{\varphi}{2}; \quad (3)$$

подставляя выражения (2) и (3) в уравнение (1), получаем

$$K_r = \frac{n}{2tg\varphi/2}; \quad (4)$$

с учетом того, что для идеального концентратора $\varphi/2 = 16'$ или 0,00467 рад, уравнение (4) имеет вид [9,11]

$$K_r = 107,3n. \quad (5)$$

Наиболее оптимальная аппроксимация данного уравнения осуществляется при $n < 5$ и $n \rightarrow 0$.

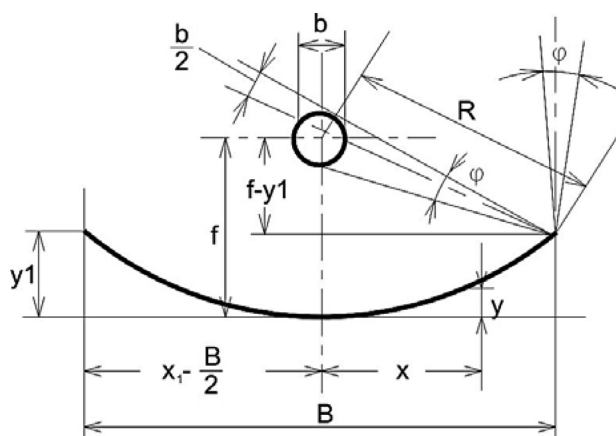


Рис. 2. Схема параболического концентратора с цилиндрическим приемником

Fig. 2. Diagram of a parabolic-cylindrical concentrator with a cylindrical receiver

Вычислим коэффициент геометрической концентрации K_G параболического концентратора для цилиндрических и плоских приемников.

Для цилиндрического приемника (рис. 2) коэффициент геометрической концентрации определяется формулой

$$K_G = \frac{BL}{\pi dL} = \frac{B}{\pi d}; \quad (6)$$

диаметр приемника находится из выражения

$$\sin \frac{\varphi}{2} = \frac{d/2}{R} = \frac{d}{2R}; \quad (7)$$

откуда

$$d = b = R(2 \sin \varphi / 2); \quad (8)$$

где R – радиус отражающей точки относительно фокуса.

На рис. 2 видно, что радиус R выражается уравнением

$$R = \sqrt{(f - y_1)^2 + x_1^2}; \quad (9)$$

согласно свойству параболы,

$$x^2 = 4fy; \quad (10)$$

и, следовательно,

$$R = \sqrt{(f - y_1)^2 + 4fy_1} = \sqrt{(f + y_1)^2} = f + y_1; \quad (11)$$

однако

$$y_1 = x_1^2 / 4f \quad (12)$$

и

$$n = \frac{B}{f} = \frac{2x_1}{f} \quad (13)$$

или

$$x_1 = \frac{nf}{2}; \quad (14)$$

с учетом уравнений (6) – (12) и (13) выражение коэффициента K_r для цилиндрического приемника имеет вид

$$K_r = \frac{B}{\pi d} = \frac{nf}{\pi \left[R \left(2 \sin \frac{\varphi}{2} \right) \right]} = \frac{nf}{\pi \left[f \left(1 + \frac{n^2}{16} \right) \left(2 \sin \frac{\varphi}{2} \right) \right]} = \frac{n}{\pi \left(1 + \frac{n^2}{16} \right) \left(2 \sin \frac{\varphi}{2} \right)} \cong \frac{107,3n}{\pi \left(1 + \frac{n^2}{16} \right)}. \quad (15)$$

Продифференцировав уравнение (15) по n , можно вычислить максимальную степень концентрации $K_r^{\max} = 68,2$ для цилиндрического приемника [9].

Рассмотрим коэффициент концентрации параболоцилиндрического концентратора для плоского приемника (рис. 3):

$$K_r = \frac{BL}{bL} = \frac{B}{b}; \quad (16)$$

На рис. 3 видно, что ширина приемника b равна

$$b = 2b_1; \quad (17)$$

а b_1 , из $\triangle ABC$ –

$$\frac{b_1}{\sin \gamma} = \frac{b'_1 \sin \alpha}{\sin \delta}; \quad (18)$$

следовательно,

$$b_1 = \frac{b'_1 \sin \gamma}{2 \sin \delta}; \quad (19)$$

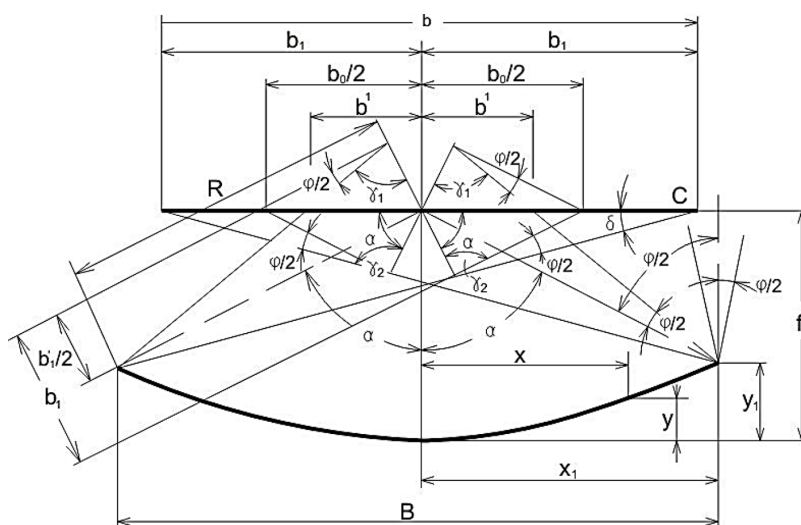


Рис. 3. Расчетная схема параболоцилиндрического концентратора с плоским приемником [9]

Fig. 3. Calculation diagram of a parabolic-cylindrical concentrator with a flat receiver [9]

с учетом того, что

$$\gamma = 90^\circ + \frac{\varphi}{2}, \quad (20)$$

выражение (19) принимает вид

$$\delta = 180^\circ - \gamma - \alpha = 90^\circ - \frac{\varphi}{2} - \alpha; \quad (21)$$

однако для $\varphi = 32'$

$$\cos \frac{\varphi}{2} = 1,00, \quad (22)$$

$$\sin \frac{\varphi}{2} = 0,00467, \quad (23)$$

с учетом (22) и (23) уравнение (21) принимает вид

$$b_1 = b'_1 / 2 \cos \alpha; \quad (24)$$

величина b'_1 (рис. 3) определяется формулой

$$b'_1 = R \left(2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) f \left(1 + \frac{n^2}{16} \right) \left(2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right); \quad (25)$$

угол охвата α (рис. 3) выражается формулой

$$\cos \alpha = \frac{f - y}{R}; \quad (26)$$

или

$$\cos \alpha_1 = \frac{f - y_1}{R_1} = \frac{f - y_1}{f + y_1}. \quad (27)$$

Используя соотношения (27) и (26), уравнение (25) можно записать в следующем виде:

$$\cos \alpha_1 = \frac{f - \frac{n^2 f}{16}}{f + \frac{n^2 f}{16}} = \frac{1 - \frac{n^2}{16}}{1 + \frac{n^2}{16}}; \quad (28)$$

и, наконец, ширина приемника определяется по формуле

$$b = \frac{b'_1}{\cos \alpha} \cong \frac{f \left(1 + \frac{n^2}{16} \right)^2 \left(2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right)}{\left(1 + \frac{n^2}{16} \right)}; \quad (29)$$

подставив выражения (29) и (28) в уравнение (15), получим

$$K_T = \frac{nf}{f \left(1 + \frac{n^2}{16} \right)^2 \left(2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right)} = \frac{107,3n \left(1 - \frac{n^2}{16} \right)}{\left(1 + \frac{n^2}{16} \right)^2}. \quad (30)$$

Дифференцируя выражение (30) по n , можно вычислить максимальную степень концентрации $K_T^{\max} = 107,3$ для плоского приемника [9,13,14].

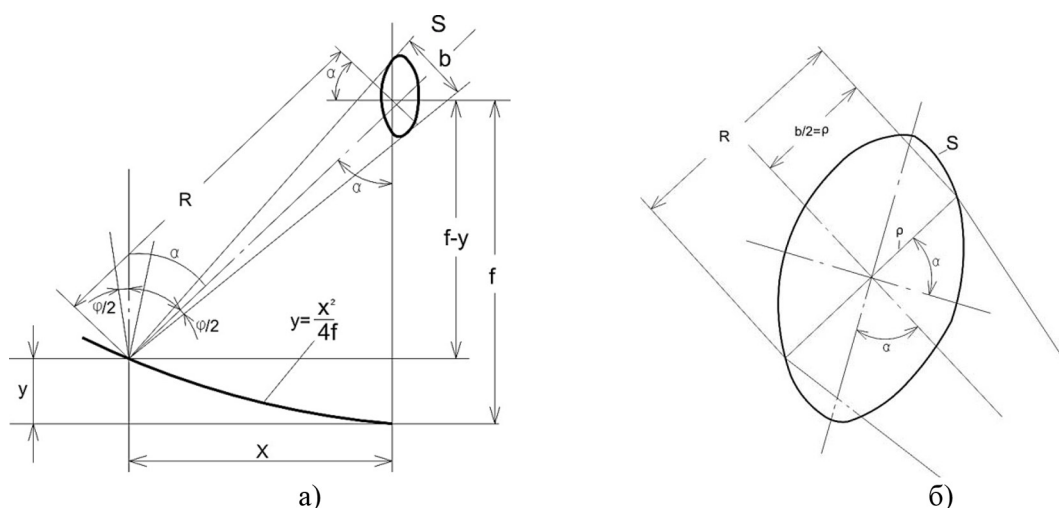


Рис. 4. Расчетная схема концентратора (а) и оптимальная форма приемника (б), имеющая сечение эллиптического цилиндра [9]

Fig. 4. Calculation diagram for the concentrator (a) and the optimal shape of the receiver (b), having a cross-section elliptical cylinder [9]

Для параболоцилиндрического концентратора оптимальной является форма приемника, имеющего сечение эллиптического цилиндра (рис. 4).

Коэффициент геометрической концентрации для приемника, имеющего форму эллиптического цилиндра, выражается формулой

$$K_G = \frac{BL}{SL} = \frac{B}{S}, \quad (31)$$

где S – длина окружности эллиптического цилиндра.

С учетом рис. 3 и рис. 4, а также выражений, приведенных выше для S , М.Н. Cobble [1] получил соотношение

$$S \approx 4,598f \left(2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right). \quad (32)$$

Подставив (31) в (32) для K_G , получим

$$K_G = \frac{nf}{4,598f \left(2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right)} = \frac{n}{4,598 \left(2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right)} \quad (33)$$

или

$$K_G = \frac{107,3n}{4,598} = 23,34n. \quad (34)$$

Для параболоцилиндрического концентратора, имеющего степень раскрытия $n = 4$, величина $K_G^{opt} = 93,8$, что по сравнению с цилиндрическим приемником, имеющим $K_G^{max} = 68,3$ при $n = 4$, является существенным. Однако реализовать эффективность эллиптических приемников на практике невозможно (трудно технологически), так как промышленность выпускает только цилиндрические трубы.

Приведенный выше аналитический расчет геометрической концентрации параболоцилиндрических концентраторов с приемниками различной формы показывает, что геометрическая

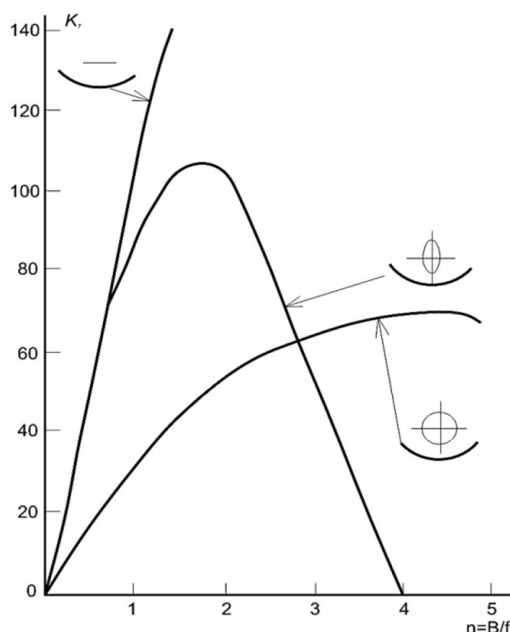


Рис. 5. Зависимость коэффициента концентрации параболоцилиндрического концентратора КГ в функциях степени раскрытия для различных форм приемников [9]

Fig. 5. The concentration factor dependence for the parabolic-cylindrical concentrator KG in functions of the opening degree for various receivers' forms [9]

концентрация K_r параболоцилиндрического концентратора с приемником в форме цилиндрической трубы равна 34,2 п, а с плоским приемником – 107,3 п, которые можно использовать в инженерных расчетах солнечных энергетических установок.

Выводы

Систематизированы и установлены расчетные выражения для определения оптико-геометрических, точностных и энергетических параметров параболоцилиндрического концентратора: распределения отраженного потока лучистой энергии в фокальной плоскости E_f ; коэффициента средней энергетической K_{sp} и геометрической концентрации K_r ; параметр (мера) точности h ; расчетный угол раскрытия отраженного пучка φ ; угловая характеристика неточности зеркала $\Delta\varphi$.

Список литературы / References

- [1] Kalogirou, S. A. *Solar Energy Engineering-Processes and Systems*, 2nd ed., Elsevier. 2014. 762 p.
- [2] Roman Bader, Andrea Pedretti, Aldo Steinfeld. A 9-m-Aperture Solar Parabolic Trough Concentrator Based on a Multilayer Polymer Mirror Membrane Mounted on a Concrete Structure. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2011, 133, 12–16.
- [3] Avezova N.R., Khaitmukhamedov A. E., Usmanov A. Yu., and Boliyev B. B. Solar Thermal Power Plants in the World: The Experience of Development and Operation, *Applied Solar Energy*, 2017, 53, 1, 72–77, doi: 10.3103/S0003701X17010030.

- [4] Klychev S.I., Abdurakhmanov A. A., Kuchkarov A. A. Optical-geometric parameters of a linear Fresnel mirror with flat facets, *Applied Solar Energy*, 2014, 50, 168–170, doi.org/ 10.3103/S0003701X14030074.
- [5] Lovegrove K., Stein W. Concentrating solar power technology 1st Edition (Principles, developments and applications), *Woodhead Publishing Series in Energy*, 2012, 21, 704. <https://www.elsevier.com/books/concentrating-solar-power-technology/lovegrove/978-1-84569-769-3>.
- [6] Kuchkarov A.A. et al. Calculation of Thermal and Exergy Efficiency of Solar Power Units with Linear Radiation Concentrator. *Applied Solar Energy*, 2020, 56(1), 42–46.
- [7] Klychev, Sh.I., *Modeling of receiving – concentrating devices of solar thermal power units*, Doctoral (Tech.Sci.) Dissertation, Tashkent, FTI, 2004.
- [8] Mukhitdinov, M.M. and Ergashev, S.F. *Solnechnye parabolotsilindricheskie ustanovki (Solar Parabolic Cylinders)*, Tashkent: FAN, 1995.
- [9] Cobble M.H. Theoretical concentrations for solar furnaces. *Solar Energy*, 1961, 5(61), 72.
- [10] Klychev Sh.I., Zakhidov R. A., Bakhranov S. A., Fasylov A. K., Dudko Yu. A. Solar Radiation Concentration in Parabolocylindrical System with Focusing Wedge. *Applied Solar Energy*, 2009, 45, 2, 99–101.
- [11] Kuchkarov A. A., Abdurakhmanov A. A., Mamatkosimov M. A., Akhadov Zh. The optimization of the optical-geometric characteristics of mirror concentrating systems. *Applied Solar Energy*, 2014, 50, 244–251.
- [12] Fernandez-Garcia, A., Zarza, E., Valenzuela, L., and Perez, M., Parabolic-trough solar collectors and their applications, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 2010, 14(7), 1695–1721.
- [13] Kuchkarov, A.A., Kholova, Sh.R., Abdumuminov, A.A., and Abdurakhmanov, A., Optical energy characteristics of the optimal module of a solar composite parabolic cylindrical plant, *Appl. Sol. Energy*, 2018, 54(4), 293–296.
- [14] Fei Chen, Ming Li, Peng Zhang. Distribution of Energy Density and Optimization on the Surface of the Receiver for Parabolic Trough Solar Concentrator, *International Journal of Photoenergy*, 2015. Article ID120917. P. 10.