

**УДК 667.1.(072)**

**Тожибоев Аброр Кахорович**

**старший преподаватель**

**Ферганский политехнический институт**

**Узбекистан, Фергана**

**Хакимов Муротжон Фозилович**

**ассистент**

**Ферганский политехнический институт**

**Узбекистан, Фергана**

**РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ И ОСНОВНЫЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИЕМНИКА  
ПАРАБОЛОЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ СО  
СТАЦИОНАРНЫМ КОНЦЕНТРАТОРОМ**

**Аннотация:** В данной работе приведён расчет оптических потерь и основные характеристики приемника параболоцилиндрической установки со стационарным концентратором. Проделанные расчёты позволяют систематизировать большое количество различных конструкций, выявить конструктивные и технологические достоинства и недостатки каждой из основных элементов параболоцилиндрической системы. Сравнительно оценить их энергетические и технико-экономические характеристики, а также эксплуатационные показатели современных параболоцилиндрических установок, разработать научно-обоснованные методологические рекомендации, способствующие поднять на новый качественный уровень научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по разработке, изготовлению, испытанию и серийного выпуска подобных установок, а также внедрению их в практику различных хозяйств.

**Ключевые слова:** оптико-энергетические параметры, распределение плотности потока, тепловая труба, энергетический баланс, модели расчёта.

**Tojiboev A.K.**

**senior teacher**

**Fergana Polytechnic Institute**

**Uzbekistan, Fergana**

**Xakimov M.F**

**assistant**

**Fergana Polytechnic Institute**

**Uzbekistan, Fergana**

**CALCULATION OF OPTICAL LOSSES AND THE BASIC  
CHARACTERISTICS OF THE RECEIVER OF THE  
PARABOLOCYLINDRICAL INSTALLATION WITH THE  
STATIONARY HUB**

**Abstract:** *In this paper, the calculation of optical losses and the main characteristics of the receiver of a parabolic-cylindrical installation with a stationary concentrator are presented. The calculations made allow us to systematize a large number of different designs, to identify the structural and technological advantages and disadvantages of each of the main elements of the parabolic cylinder system. Comparatively evaluate their energy and technical and economic characteristics, as well as the performance indicators of modern parabolic cylinders, develop scientifically based methodological recommendations that help to raise the research and development work on the development, manufacture, testing and serial production of such installations to a new qualitative level, as well as their implementation in the practice of various farms.*

**Key words:** optical-energy parameters, distribution of flux density, heat pipe, energy balance, calculation models.

В настоящее время проблема применения концентраторов заключается в решении задач повышения их оптической эффективности и обеспечения экономической рентабельности в эксплуатации.

В данной статье приводятся расчет оптических потерь и основные характеристики приемника параболоцилиндрической установки со стационарным концентратором.

Оптические потери, солнечного параболоцилиндрического концентратора в первую очередь, связаны радиационными свойствами поверхности отражателя, прозрачной изоляции и поглощающей поверхности приемника. Отражательная способность  $R_3$  зависит от природы поверхности и ее шероховатости. Для большинства практически используемых зеркальных покрытий  $R_3$  равна  $0,76 \div 0,9$ , а в некоторых случаях достигает  $0,94 \div 0,96$ . Пропускательная способность прозрачной изоляций  $\tau_c$  и поглощательная способность поверхности приемника  $A_S$  (приведенная поглощательная способность) также зависят от материала и средних углов падения радиации. Угол падения отраженного луча на приемник зависит от места отражения луча на поверхности концентратора и от формы приемника. Точное значение произведения  $\tau_c \cdot A_S$  получается интегрированием по всему концентратору потока радиации, проходящего через прозрачное покрытие и падающего на приемник. Для практических расчетов можно принимать среднее значение этих коэффициентов. Коэффициент пропускания большинства практически применяемых прозрачных изоляций из термостойкого стекла составляет  $0,85 \div 0,92$ , а просветленных - достигает  $0,94 \div 0,96$ . Коэффициент поглощения черно окрашенной и селективно окрашенной поверхности приемника колеблется в пределах  $0,85 \div 0,96$ . Оптические потери, связанные с непопадающей частью фокусируемой радиации на приемнике ограниченного размера, оцениваются коэффициентом улавливания  $Y$  (фактор формы).

Коэффициент улавливания  $Y$  можно оценить по кривой нормального распределения плотности потока в фокальной плоскости, используя следующую формулу [1]:

$$Y = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{h(b/B)} e^{-h^2 \cdot (b/B)^2} \cdot d\left(\frac{h \cdot b}{B}\right), \quad (1)$$

где:  $b$  - расстояние от центра нормального фокального изображения;  $h$  - коэффициент нормального распределения связанной с максимальной плотностью потока в центре фокального пятна зависимостью

$$h = E_{\max} \cdot B \sqrt{\pi}, \quad (2)$$

Для решения уравнения (1) можно использовать таблицы интегралов вероятности  $\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} \cdot dt$ ; подставляя предел  $x = h(b/B)$ , получим значения  $Y$  для определенных отношений ширин и  $h$ . Таким образом, исходя из выбранного значения  $h$  (или из значения, более или менее соответствующего практически существующему отражателю) можно определить кривую распределения плотности потока энергии и вычислить значение  $Y$  в зависимости  $b/B$ . Например, при  $h = 60$  приемник имеет ширину, составляющую 0,01 и 0,02 от ширины концентратора. При  $b/B = 0,01$  предел интегрирования вероятности равен  $60/(0,01) = 0,60$ . Из таблицы интегралов вероятности находим  $Y = 0,604$ . Для удвоенной ширины предел равен 1,2 и  $Y=0,91$ .

При расчете оптических потерь необходимо также учитывать затенение поверхности концентратора приемником. Это можно оценить коэффициентом затенения, определяемый по следующей формуле:

$$K_{3AT} = (B - d_H)/B, \quad (3)$$

где:  $d_H$  - наружный диаметр приемника.

Таким образом, для постоянных оптических коэффициентов (оптические коэффициенты  $R_s \cdot \tau_c \cdot A_s \cdot \gamma$  приняты постоянными условно,

так как они изменяются в течение срока службы коллектора) коллектора можно записать следующее выражение:

$$C_{OPT} = R_s \cdot \tau_c \cdot A_s \cdot Y \cdot K_{SAT}. \quad (4)$$

Оптические потери происходят также в результате падения прямых солнечных лучей не по нормали к поверхности коллектора и связанные с этим концевых эффектах. Косинус угла падения  $\cos\Theta$  (угол между нормалью коллектора и лучами солнца) зависит от способа ориентации коллектора и определяет эффективность системы при одноосевом слежении. В случае двухосевого слежения коллектор всегда направлен прямо на солнце и  $\cos\Theta = 1$ .

Для параболоцилиндрических коллекторов, вращающихся вокруг фиксированной оси, параллельной оси Земли (т.е. полярной оси), показанной угол падения равен угловому положению Солнца в солнечный полдень относительно плоскости экватора (т.е. склонению -  $\delta$ ):  $\cos\Theta = \cos\delta$ .

Среднегодовое значение  $\cos\delta$  можно принять за 0,96 или склонение  $\delta$  можно рассчитать по приближенной формуле Купера [4]:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[ 360 \frac{(284 + n)}{365} \right], \quad (5)$$

где:  $n$  - порядковый номер дня года.

Для параболоцилиндрических коллекторов, вращающихся вокруг фиксированной горизонтальной оси восток-запад косинус угла падения определяется выражением [3]:

$$\cos\Theta = \left( 1 - \cos^2 \delta \cdot \sin^2 \omega \right)^{1/2}, \quad (6)$$

где:  $\omega$  - часовой угол, равный нулю в солнечный полдень; каждый час соответствует  $15^\circ$  долготы.

Для параболоцилиндрических коллекторов, вращающихся вокруг фиксированной горизонтальной оси север-юг с непрерывной корректировкой, косинус угла определяется выражением [13]:

$$\cos\Theta = \left[ (\sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega)^2 + \cos^2\delta \cdot \sin^2\omega \right]^{1/2}, \quad (7)$$

где:  $\varphi$  - широта местности.

Влияние угла падения на оптическую эффективность параболоцилиндрического коллектора может быть записано в общем виде следующей функцией [4]:

$$F(\Theta) = (1 - Atg\Theta) \cdot \cos\Theta, \quad (8)$$

где:  $Atg\Theta$  - выражает уменьшение эффективной площади зеркальной поверхности, обусловленной концевыми эффектами, т.е. затенением торцевых конструкций концентратора;

$A$  - геометрический коэффициент, определяемый исходя из конструктивных особенностей коллектора.

Величину геометрического коэффициента  $A$  можно вычислить с помощью следующего соотношения [4]:

$$A = \frac{B(f + C) + F_\phi - F_c}{F_3}, \quad (9)$$

Таким образом, если известны оптические коэффициенты коллектора, то для оценки оптических потерь коллектора можно записать следующее выражение:

$$Q_{OPT} = Q_{ПАД} [1 - C_{OPT} \cdot F(\Theta) \cdot F(\phi)], \quad (10)$$

С другой стороны, общее произведение измеренных и эмпирических оптических коэффициентов равно оптической эффективности системы.

$$\eta_{OPT} = C_{OPT} \cdot F(\Theta) \cdot F(\phi), \quad (11)$$

Оптическую эффективность параболоцилиндрического коллектора можно рассчитать, используя падающую на концентратор и поглощенную в приемнике солнечную энергию.

$$\eta_{OPT} = Q_{пог}^{\Pi} / Q_{ПАД}, \quad (12)$$

Поглощенная энергия, приемником используя оптические коэффициенты, определяется по формуле [4]:

$$Q_{пог}^{\Pi} = E_0 \cdot F_3 \cdot C_{OPT} \cdot F(\Theta) \cdot F(\phi), \quad (13)$$

В целом, по формулам (10) и (11) могут быть рассчитаны оптические потери и эффективность параболоцилиндрического коллектора. В настоящее время практически достигнутая оптическая эффективность  $\eta_{OPT}$  солнечных параболоцилиндрических коллекторов лежит в диапазоне от 0,6 до 0,8.

Основными характеристиками, которые определяют эффективность приемника, являются геометрическая форма, размеры, спектральные характеристики прозрачной изоляции и поглащающей поверхности, а также параметры теплового режима (рабочая температура, коэффициенты тепловых потерь, полученное полезное тепло и др.)

**Геометрическая форма и размеры приемника.** Как отмечалось выше, приемники параболоцилиндрических установок могут иметь различную геометрическую форму и размеры. Кроме того, установлено, что относительная концентрация отражателя зависит от формы и размеров приемника. Приведенный выше аналитический расчет параболоцилиндрических концентраторов с приемником разной формы показывает, что геометрическая концентрация  $K_G$  параболоцилиндрического концентратора с приемником в форме цилиндрической трубы равна 34,2  $n$ , а с плоским приемником — 107,3  $n$ , где  $n$  — отношение апертуры к фокальному расстоянию параболы.

Несмотря на разнообразие форм и существование оптимума в виде эллиптического цилиндра наибольшее применение нашли параболоцилиндрические концентраторы с приемниками, изготовленными из обычной цилиндрической трубы. Они удобны в эксплуатации, выпускаются промышленностью и путем несложных преобразований легко преобразуются в приемники солнечного излучения.

Важной характеристикой приемника являются также геометрические размеры: ширина или диаметр, толщина стенки и длина. Применение малой ширины или диаметра приемника требует повышения точности изготовления отражателя, что приводит к существенному увеличению КПД системы, однако в этом случае увеличивается и стоимость отражателя. Снижение точности концентратора приводит к повышению оптических потерь, т. е. значительная часть отраженной радиации проходит мимо трубы меньшего диаметра, и потери вследствие фактора формы (улавливание энергии приемником) могут достигать 30% и более [19]. При использовании большого диаметра приемника почти вся зеркально отраженная радиация улавливается трубой, и потери, вызванные наличием фактора формы, играют сравнительно малую роль (что составляет  $\approx 10\%$ ). Однако при этом увеличиваются тепловые потери (конвективные и лучистые) с поверхности приемника, особенно при более высоких рабочих температурах. Применение прозрачной изоляции и селективных покрытий существенно уменьшает конвективные и лучистые потери тепла, что одновременно приводит к увеличению оптических потерь.

Таким образом, при невысоких рабочих температурах приемника ( $80 \div 150^\circ\text{C}$ ) КПД параболоцилиндрической установки будет выше, чем КПД установки с малым приемником лишь в том случае, если рабочая

температура будет  $150\div180^{\circ}\text{C}$  и тепловые потери для трубы меньшего диаметра начнут компенсировать влияние худшего фактора формы. Отсюда вытекает вопрос об оптимальном диаметре приемника для данного отражателя. В общем случае оптимальный размер приемника, обеспечивающий максимум полезной энергии, подбирается путем минимизации суммы оптических и тепловых потерь. Для идеального зеркала геометрические размеры приемника  $b_{\text{ид}}$  или  $d_{\text{ид}}$  (ширина или диаметр) могут быть определены по формуле

$$b_{\text{ид}} = d_{\text{ид}} = \frac{2Rtg16'}{\cos\alpha} \quad (14)$$

где  $R$  — радиус зеркала. Он определяется следующим образом:

$$R = \frac{2f}{1 + \cos\alpha} \quad (15)$$

Величина  $R$  меняется от  $R = f$  до  $R = R_{\max}$  при изменении угла охвата  $\alpha$  от  $0$  до  $\alpha_{\max}$ , и размер изображения увеличивается от  $b_{R=f} = 2ftg16'$  до  $b_R = R_{\max} = 2R_{\max} \times tg16'/\cos\alpha_{\max}$ . Поэтому размер приемника определяется по  $b_R = b_{\max}$ , т. е. по конечным размерам фокального изображения.

Для реального зеркала геометрические размеры приемника могут быть определены по действительному значению  $\varphi$  ( $\varphi_S + \varphi_C + \varphi_I = 45'\div2^{\circ}$ ) [2] или по наглядному примеру, приведенному на рис. 1.

Толщина стенки стальной трубы приемника обычно определяется по его рабочей температуре, т. е. по внутреннему давлению, и может быть рассчитана по формуле, взятой непосредственно из инструкции для котлов под давлением [3]:

$$\delta_T = 1,1 \left[ \frac{d_T}{2} \frac{P/986}{P(986+1)} + 0,013d_T \right], \quad (16)$$

где  $P$  — давление, кг/см<sup>2</sup>.

При использовании вакуумированной прозрачной оболочки в качестве тепловой изоляции приемника геометрические размеры стеклянной трубы можно определить по формулам [3].

$$d_c = 2d_T, \quad (17)$$

$$\delta_T = 0,016d_c, \quad (18)$$

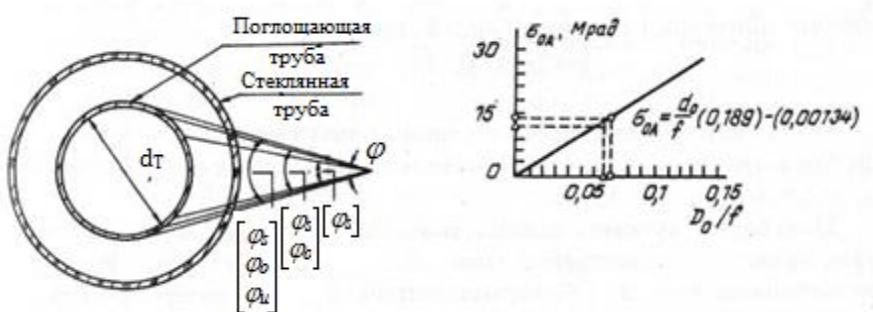


Рис. 1 Размерный анализ теплоприемника: ( $\phi_s$  — угловой радиус Солнца;  $\phi_c$  — ошибка слежения;  $\phi_i$  — ошибка изготовления,  $\sigma_{CA} = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_c^2 + \sigma_n^2 + \sigma_R^2}$  — среднеквадратичная точность установки

Уравнение (17) показывает, что диаметр стеклянной трубы  $d_c$  равен двойному диаметру стальной трубы  $d_T$ . Уравнение (18) было получено исходя из разрушающего давления стеклянных труб в соответствии с формулой А. Е. Н. Loye [3].

На практике для трубчатых приемников параболоцилиндрических установок в качестве прозрачно-тепловой изоляции чаще всего используют трубы из стекла марки "Пирекс" или цилиндры из молибденового, боросиликатного стекла марки С49+С54 [4]. Эти стекла обладают хорошими оптическими качествами. Интегральное пропускание их в области длин волн солнечного излучения достаточно

высоко — около  $0,9 \div 0,92$ , а поглощение и отражение минимальны — около  $A_S=R_S=0,025 \div 0,07$ . В то же время стекла, являясь непрозрачными для длинноволнового излучения, выдерживают температурные перепады вплоть до  $250^\circ\text{C}$  [4].

Спектральные характеристики прозрачной изоляции могут быть изменены путем специальных обработок стекла — просветлением. При этом должны быть соблюдены следующие условия нанесения просветляющей пленки [4]:

$$\delta = (2m+1)\lambda / 4n, \quad (19)$$

$$n = \sqrt{n_{CT}}$$

где  $\delta$  — толщина пленки;  $\lambda$  — длина волны света;  $n_{CT}$  — показатель преломления стекла;  $n$  — показатель преломления пленки;  $m=0, 1, 2, 3$ ; и т.д.

Нанесение просветляющих покрытий на стекло можно вести осаждением из раствора, испарением в вакууме, катодным распылением и т. д. Образующаяся на стекле пленка может состоять из фтористого магния, двуокиси кремния, двуокиси титана и т. д. В последнее время разработаны способы многослойного покрытия, который обеспечивает особо эффективное просветление. Применение таких покрытий дает не только высокое пропускание света в широкой области спектра, но и резко уменьшает долю рассеянного. Однако обработка поверхности стекла путем химического травления является наиболее простой и технологичной. При этом пропускательная способность стекла  $\tau_c$  высокого качества может быть увеличена до  $0,94 \div 0,95$  при снижении отражательной способности  $R_c$  до 0,02.

Проделанные расчёты позволяют систематизировать большое количество вариантов конструкции, выявить конструктивные и

технологические достоинства и недостатки каждой из основных элементов параболоцилиндрической системы, а также сравнительно оценить их энергетические и технико-экономические характеристики.

На основе анализа научных исследований установлено что, успехи в области разработок стационарных параболоцилиндрических установок различного назначения еще очень скромные, однако, они уже применяются индивидуальными потребителями, так как конструкционно просты и экономически эффективны.

### **Литература**

1. Тепляков Д.И. Энергетические характеристики зеркальных гелиоустановок в эксплуатационных условиях // Преобразователи солнечной энергии на полупроводниках. – М.: Наука, 1998. – С. 160-165
2. Даффи Д. А., Бекман У. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Под ред. Малевского Ю. Н. – М.: Мир, 1977. – 409 с.
3. Эргашев С.Ф. Разработка и исследование солнечной параболоцилиндрической установки с тепловой трубой в качестве теплоприемника.: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Ашхабад: НПО-Солнце, 1994. – 20 с.
4. Sharver W. W., Duffi W.S. Solar thermal electric power systems composition of lin-focus collectors // Solar Energy. – 2009. – Vol. 22, 2. – P. 49-61.
5. Conceptual design and analysis of a 100 MWe distributed line focus solar central power plant: Topical Report / US Department of Energy. – 1998, 1979 – 203 p