

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ПАРАБОЛОЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КОНЦЕНТРАТОРА*

О. С. Ароян, С. П. Геруни

НИИ радиофизики
пр-т Комитаса, 49/4, г. Ереван, 375051, Армения
Тел.: (374.10) 234631; e-mail: iri@sci.am



Ароян
Ованес Самвелович

Ароян О. С.

Сведения об авторе: аспирант, инженер НИИ радиофизики.

Образование: факультет физики Ереванского государственного университета (2003 г.).

Область научных интересов: моделирование и разработка солнечных концентраторов.

Публикации: 8 работ.



Геруни
Сурен Парисович

Геруни С. П.

Сведения об авторе: доктор техн. наук, нач. отдела НИИ радиофизики.

Образование: факультет кибернетики Ереванского политехнического института (1976 г.).

Область научных интересов: солнечная концентраторная энергетика, измерения параметров СВЧ-антенн, беспроводные СВЧ-сети; член ISES, IEEE.

Публикации: 90 работ.

The program for computer simulation of thermal processes taking place in a linear focus of a cylindrical parabolic concentrator (CPC) of solar energy is developed. As a result of calculations the basic energy characteristics of the system are determined: a concentration factor, diameter of a focal spot, optical efficiency of CPC, output thermal power, conversion efficiency of heat exchangers and efficiency of the system as a whole.

The simulation can be carried out for heat exchangers of cylindrical, rectangular and special shapes.

Введение

Следящие и неподвижно установленные параболоцилиндрические концентраторы (ПЦК) наиболее часто используются в установках для преобразования солнечной энергии в тепловую и электрическую. В отличие от концентраторов с точечным фокусом они более просты в изготовлении и удобны для модульного наращивания мощности.

В данной работе представляется программа компьютерного моделирования работы ПЦК и тепловых процессов, происходящих в линейном фокусе ПЦК. Моделирование позволяет быстро рассчитывать наиболее важные выходные параметры при заданных параметрах ПЦК. Позволяет также, варьируя некоторыми входными параметрами, например, размерами теплоприемника, его расположением относительно фокальной линии концентратора, теплоемкостью теплоносителя и его начальной температурой, скоро-

стью движения теплоносителя в теплоприемнике и т. д., получать наиболее оптимальные режимы работы ПЦК.

Эффективная работа системы в целом складывается из эффективности всех ее функциональных узлов. Параметры собственно ПЦК, такие как геометрические размеры, угол раскрытия, размер фокального пятна, отражательная способность поверхности и точность ее изготовления должны обеспечивать необходимую степень концентрации солнечной энергии в линейном фокусе рефлектора.

Расчет основных оптических и энергетических параметров ПЦК

Геометрические размеры ПЦК задаются размером раскрытия зеркала концентратора D и углом раскрытия θ_m , или фокусным расстоянием F и углом раскрытия θ_m (или F и D). Между этими величинами для зеркал параболического

* Статья была представлена в виде доклада на Второй конференции по возобновляемой энергетике «Энергия будущего» REC-II (Ереван, июнь 2005 г.).

The report on the Second Renewable Energy Conference "Energy for Future" REC-II (Yerevan, 2005).

Статья поступила в редакцию 18.10.2005. The article has entered in publishing office 18.10.2005.

профиля существует следующая связь (рис. 1, таблица):

$$F = D \frac{1 + \cos \theta_m}{4 \sin \theta_m} \quad (1)$$

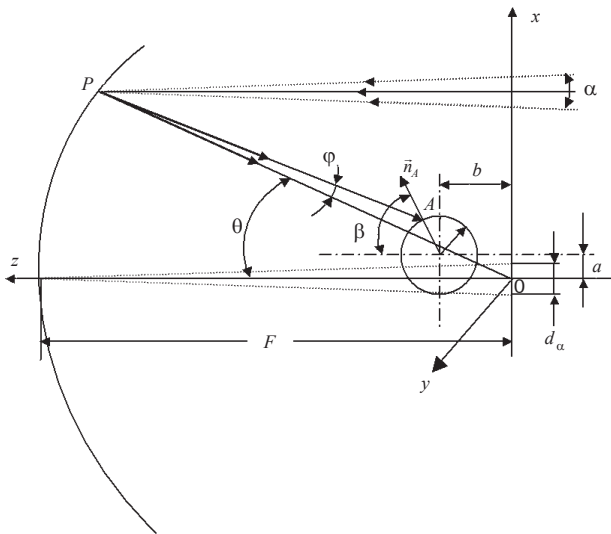


Рис. 1. Схема отражения лучей от параболического концентратора

Обозначения на рисунках и в тексте

D	Размер раскрыва концентратора, мм
θ_m	Угол полуоткрытия параболического зеркала, угл. град
S_a	Площадь незазатененной апертуры ПЦК, мм ²
S_r	Площадь поверхности теплоприемника, мм ²
β	Угол между вектором нормали \vec{n}_A поверхности теплоприемника в рассматриваемой точке и оптической осью концентратора.
φ	Угол между осью отраженного пучка и вектором \vec{PA} (см. рис. 1.), угл. град
a	Смещение центра цилиндрического теплоприемника по оси OX от фокальной точки, мм
b	Смещение центра цилиндрического теплоприемника по оси OZ от фокальной точки, мм
r	Радиус цилиндрического теплоприемника, мм
d_1	Внешний размер теплоприемника, мм
d_2	Диаметр стеклянной оболочки-трубки, мм
δ	Толщина стенок теплоприемника, мм
ρ	Коэффициент отражения материала зеркала, б/р
λ	Коэффициент теплопроводности материала теплоприемника, Вт/(м·°C)
γ	Коэффициент улавливания теплоприемника, б/р
α	Поглощательная способность теплоприемника, б/р
ε	Степень черноты поверхности теплоприемника, б/р
τ	Пропускная способность стекла, б/р
C_p	Средняя теплоемкость теплоносителя, кДж/(кг·°C)
m	Массовая скорость потока жидкости в теплоприемнике, кг/ч
G_0	Плотность потока прямой солнечной радиации, Вт/м ²
U_0	Коэффициент теплопередачи от теплоприемника к жидкости, Вт/(м ² ·°C)
U_L	Коэфф. теплоотдачи от поверхности теплоприемника в окружающую среду, Вт/(м ² ·град)
T_a	Температура окружающей среды, °C
$T_{f,0}$	Входная температура жидкости, °C

Размер сечения фокальной области, где концентрируется основная часть солнечной энергии, определяется как $d_a = 2F \cdot \tan \alpha / 2$, где $\alpha = 32'$ — видимый угловой диаметр Солнца.

Распределение плотности концентрированного потока E_A на теплоприемнике произвольной формы можно вычислить из уравнения [1]:

$$E_A = \vec{q}_A \cdot \vec{n}_A, \quad (2)$$

где \vec{q}_A — распределение лучистого вектора по поверхности теплоприемника:

$$\vec{q}_A = \int_{\omega} f d\vec{\omega}, \quad (3)$$

где f — распределение яркости в отраженном от зеркала пучке; $d\vec{\omega}$ — элементарный вектор телесного угла. Для идеального концентратора оно совпадает с распределением яркости по Жозе [2]:

$$f = 1,23 \frac{G_0}{\pi \alpha^2} \cdot \frac{1 + 1,5641 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \varphi}{\sin^2(\alpha/2)}}}{2,5641}, \quad (4)$$

где G_0 — плотность солнечного потока.

В уравнении (2) \vec{n}_A — единичный вектор нормали к поверхности приемника в рассматриваемой точке. Для плоского приемника

$$\vec{n}_A \{0, 1, 1\}, \quad (5)$$

для цилиндрического приемника

$$\vec{n}_A \{\sin \beta, 0, \cos \beta\}, \quad (6)$$

$$x = r \sin \beta + a, \quad y, \quad z = r \cos \beta + b, \quad (7)$$

где x, y, z — координаты точки A поверхности цилиндрического теплоприемника.

В зависимости от формы приемника и его расположения относительно фокальной линии можно получить искомые выражения для распределения плотности сконцентрированного потока по поверхности приемника.

Степень концентрации, в свою очередь, должна обеспечивать заданную температуру теплоприемника и теплоносителя. На степень концентрации влияют: затенение, вносимое габаритами теплоприемника, погрешность сопровождения солнечного диска (для поворотного варианта ПЦК) и запыленность отражающей поверхности.

Эффективность ПЦК выражается через коэффициент полезного действия (КПД), который определяется как отношение производимой полезной энергии к полной солнечной энергии, принятой концентратором:

$$\eta = \frac{Q_U}{G_0 S_a}, \quad (8)$$

где Q_U — полезная энергия, S_a — площадь незазатененной апертуры ПЦК.

Если ПЦК предназначен для нагрева жидкого или летучего теплоносителя, то полезной считается энергия, полученная теплоносителем в течение его протекания по теплоприемнику. Полезная энергия теплоносителя, определенная в [3], для частного случая может быть приведена к виду [4]:

$$Q_U = \frac{mC_p k S_a}{3,6 S_r U_L} \left[1 - e^{-S_r U_0 / m C_p} \right] \times \left[G_0 \rho \gamma \alpha - U_L \frac{S_r}{S_a} (T_{f,0} - T_a) \right]. \quad (9)$$

Значения коэффициентов U_L и U_0 в свою очередь зависят от внешнего размера теплоприемника d_1 , диаметра стеклянной оболочки-трубки d_2 , применяемой для снижения тепловых потерь, толщины стенок теплоприемника δ , коэффициента теплопроводности материала теплоприемника λ , массовой скорости потока жидкости m в теплоприемнике, температуры окружающей среды T_a и т. д. (см. табл.).

В уравнении (9) коэффициент k учитывает тот факт, что не вся поверхность приемника является лучевоспринимающей.

Из уравнения (9) для полезной энергии можно получить следующее выражение:

$$Q_U = \frac{kmC_p}{3,6 U_L} \left(1 - e^{-S_r U_0 / m C_p} \right) \times \left[\bar{E} \gamma \alpha - U_L (T_{f,0} - T_a) \right], \quad (10)$$

где \bar{E} — плотность сконцентрированного потока, усредненного по всей поверхности теплоприемника.

Зная значение полезной энергии, можно рассчитать температуру жидкости на выходе теплоприемника:

$$T_{f,L} = T_{f,0} + \frac{Q_U}{m \cdot C_p / 3,6}. \quad (11)$$

Значение коэффициента k для цилиндрического теплоприемника можно вычислить из простого соотношения:

$$k = \frac{(\theta_m + \Delta\theta)}{180}, \quad (12)$$

где $\Delta\theta$ вычисляется из следующего тригонометрического соотношения (рис. 2):

$$\sin(\Delta\theta + \alpha/2) = \frac{2F}{1 + \cos\theta_m} \cdot \frac{\sin\alpha/2}{r}, \quad (13)$$

где r — радиус цилиндрического теплоприемника.

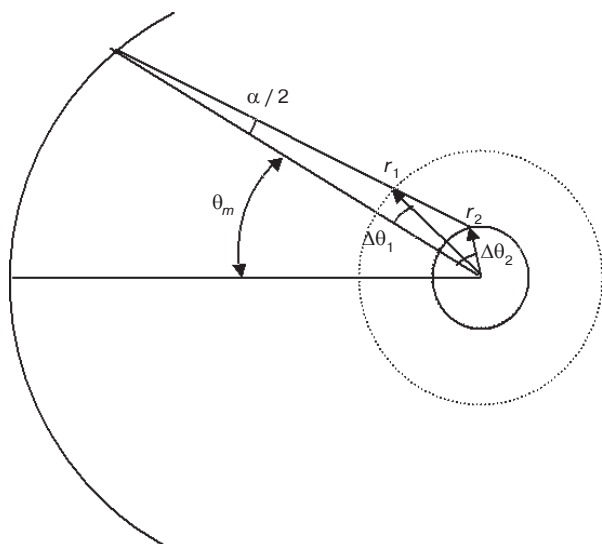


Рис. 2. К соотношениям (12), (13)

Как видно из рис. 2, величина $\Delta\theta$ зависит как от угла раскрытия зеркала, так и от радиуса теплоприемника.

Алгоритм программы моделирования ПЦК

Программа написана на основе уравнений (1)–(13) в среде математических вычислений Mathematica 4.1. Программа включает в себя два основных блока (рис. 3).

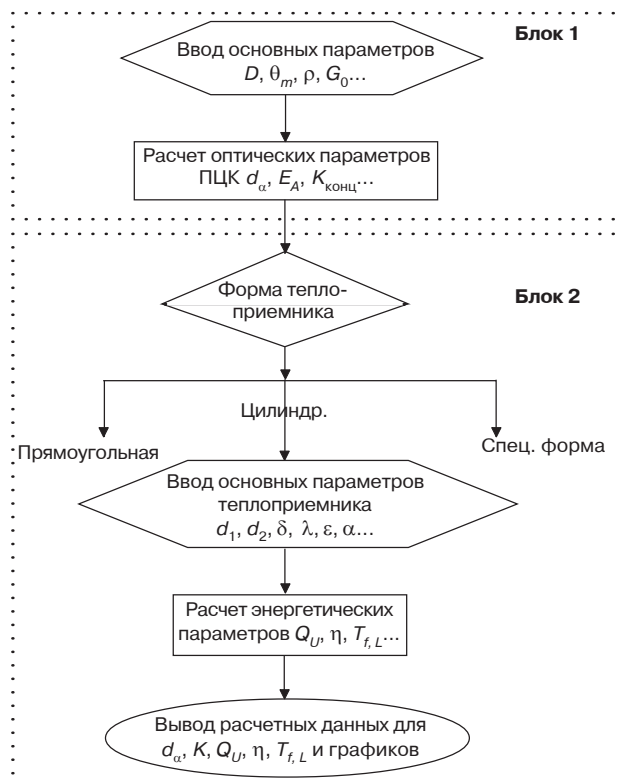


Рис. 3. Блок-схема программы расчета параметров ПЦК

В первом блоке, считающем оптические параметры ПЦК, задаются: размеры раскрытия ПЦК, угол раскрытия, оптический коэффициент рефлектора, геометрические размеры теплоприемника и плотность потока солнечной радиации, падающего нормально к плоскости раскрытия.

Второй блок программы рассчитывает энергетические характеристики теплоприемника, расположенного вдоль линии фокуса ПЦК. В расчете используются такие данные, как коэффициент концентрации, диаметр фокального пятна, плотность потока солнечной радиации в фокусе и в целом оптический КПД ПЦК, полученные в первом блоке.

Моделирование можно проводить для теплоприемников цилиндрической, прямоугольной и специальных форм, к примеру, для термоэлектрических генераторов, предназначенных для работы с ПЦК [5]. Предусмотрена также возможность смещения оси теплоприемника относительно фокусной линии ПЦК.

Во втором блоке задаются размеры теплоприемника, теплопроводность материала, тол-

щина его стенок, степень черноты его внешней поверхности, теплоемкость теплоносителя и его начальная температура, наружная температура воздуха, скорость движения для случая жидкого или летучего теплоносителя и др.

Заключение

Результатом расчетов программы являются такие основные энергетические характеристики, как выходная тепловая мощность, КПД преобразования теплоприемника и КПД системы в целом. Использование данной программы позволяет производить моделирование и оптимизацию энергетических параметров солнечных зеркальных установок на основе следящих ПЦК.

Список литературы

1. Умаров Г. Я., Захидов Р. А., Ходжаев А. Ш. Распределение лучистого вектора в поле излучения параболоцилиндрического концентратора // Гелиотехника. 1976. № 1. С. 27–32.
2. Солнечные высокотемпературные печи: Сб. статей/Пер. под ред. В. А. Баума. М: ИЛ, 1960.
3. Duffie J., Beckman W. Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd ed. New York, 1991.
4. Ароян О. С. Моделирование параболоцилиндрического солнечного концентратора // Вестник МАНЭБ. 2005. Т. 10, № 5. С. 55–57.
5. Geruni S. Solar concentrator electric station // Proc. of the 14 Int. Conf. "Eurosun-2004", 20–23 June, 2004, Freiburg, Germany. Vol. 1. P. 849–852.