

Кенжаев И.Г., Арапов Б.А., Обозов А.Ж., Юлболдиев Т.С.

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ  
«КОНЦЕНТРАТОР-ТЕПЛОПРИЕМНИК» ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ  
НА БАЗЕ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА

I.G. Kenzhaev, B.A. Arapov, A.Zh. Obozov, T.S. Yulboldiev

EXERGETIC EFFECTIVE NESS OF «CONCENTRATOR - HEAT RECIEVE» SYSTEM  
OF ENERGETIC DEVEIECE ON THE BASE OF STERLING ENGINE

УДК: 662.997.620.9

В работе проведен расчет эксергетической эффективности системы "концентратор-теплоприемник" солнечно-топливных энергетических установок на базе двигателя Стирлинга с учетом влияния на ее величину оптических параметров концентратора, теплотехнических и оптических параметров теплоприемника, а также температуры рабочего тела и окружающей среды.

Максимальное значение эксергетической эффективности солнечно-топливных энергетических установок обеспечивается лишь при определенных узких диапазонах изменения температуры нагреваемого с их помощью теплоносителя [1]. Следовательно, повышение эффективности солнечно-топливных энергоустановок зависит, прежде всего, от степени эксергетической оптимизированности теплоты подведенного к рабочему телу двигателя Стирлинга (ДС) [2].

В связи с этим представляет практический интерес определение эксергетически оптимальной теплоты подведенный к рабочему телу ДС солнечно-топливных энергоустановок, посредством параболических концентраторов излучения. В свою очередь, эксергетически оптимальное количество теплоты подведенный к рабочему телу ДС как правило устанавливается путем дифференцирования и приравнивания к нулю целевой функции, которая должна содержать в себе информацию о степени зависимости эффективности солнечной части солнечно-топливных энергоустановок от оптических характеристик приемника концентрированного излучения, в котором происходит преобразование солнечной энергии в тепловую, от уровня прихода прямой солнечной радиации на плоскость миделя концентратора излучения, среднemasсовой температуры рабочего тела и температуры окружающей среды [1].

В качестве целевой функции по определению эксергетически оптимальной температуры рабочего тела в солнечных энергоустановках, содержащей в себе указанную выше информацию, нами выбрано выражение для эксергетической эффективности системы концентратор-теплоприемник, представляющее собой отношение мощности эксергии теплоты, полученной рабочим телом  $E_q$ , к мощности падающей

на зеркальную поверхность параболического концентратора излучения эксергии прямой солнечной радиации  $E_{i\delta}^{i\delta}$ , т.е.

(1)

В свою очередь  $\eta_e \frac{E_q}{E_{i\delta}^{i\delta}}$  (2)

$$E_q = Q_{i\delta} \cdot \eta_k, \quad (3)$$

где - тепловая мощность рабочего тело;

$$\eta_e = \frac{T_f - T_0}{T_f}, \quad (4)$$

- термическая эффективность обратимого цикла Карно, осуществляемого в интервале температуры окружающей среды ( $T_0$ ) и среднemasсовой температуры рабочего тело ( $T_f$ );  $Q_{i\delta}^{i\delta}$  - мощность прямой солнечной радиации, падающей на зеркальную поверхность концентратора излучения;

$$\psi = 1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{T_0}{T} \left[ 4 - \left( \frac{T_0}{T} \right)^3 \right], \quad (5)$$

- коэффициент зависимости эксергии солнечного излучения от температуры окружающей среды [3];  $T$  - эффективная температура поверхности фотосферы Солнца (5762 К).

Значение  $Q_{i\delta}$  в (2) определяется из уравнения теплового баланса теплоприемника двигателя:

$$Q_{i\delta} = Q_{i\delta}^{i\delta} - Q_{mn}, \quad (6)$$

где

$$Q_{i\delta}^{i\delta} = \alpha \cdot \tau_{n,k} \cdot R_3 \cdot \gamma \cdot \tau_c \cdot \tau_{n,n} \cdot Q_{i\delta}^{i\delta}, \quad (7)$$

- мощность поглощенной лучепоглощающей поверхностью приемника прямой солнечной радиации;

$\alpha_i$  - коэффициент интегрального лучепоглощения поверхности приемника;  $\tau_{i,k}$  - коэффициент пропускания слоя пыли и грязи на зеркально отражающей поверхности концентратора;  $R_3$  - коэффициент отражения зеркальной поверхности концентратора

излучения;  $\gamma$  - коэффициент улавливания приемника, численно равный для концентрированного излучения, улавливаемого поверхностью приемника;  $\tau_c$  - коэффициент пропускания прямой солнечной радиации светопрозрачной оболочки приемника;  $\tau_{n,n}$  - коэффициент пропускания прямой солнечной радиации слоя пыли на поверхности светопрозрачной оболочки приемника.

Значение в (3) и (7) определяется из общеизвестного выражения

$$Q_{i\dot{a}\dot{a}}^{i\dot{o}} = F_k \cdot q_{\perp} \cdot \cos i_i, \quad (8)$$

где  $F_k$  - площадь поверхности миделя рассматриваемого концентратора излучения;  $q_{\perp}$  - поверхностная плотность потока прямой солнечной радиации на нормальную к солнечным лучам плоскость;  $q_{\perp}$  - косинус угла падения прямого солнечного излучения относительно осевой линии миделя концентратора.

Значение  $Q_{mn}$  в (6) определяется из выражения

$$Q_{mn} = K_{i\dot{o}} \cdot F_n (T_{w_{i\dot{o}}} - T_0), \quad (9)$$

где  $K_{i\dot{o}}$  - приведенный к единице лучепоглощающей поверхности эффективный коэффициент тепловых потерь приемника концентрированного излучения;

$F_n$  - площадь лучепоглощающей поверхности приемника цилиндрической формы;  $T_{w_{i\dot{o}}}$  - температура наружной лучепоглощающей поверхности приемника.

Подставляя (7) и (9) в (6) с учетом (8), получим

$$Q_{i\dot{i}\dot{e}} = F_k \cdot \alpha_n \cdot \tau_{n,k} \cdot R_y \cdot \gamma \cdot \tau_c \cdot \tau_{n,n} \cdot q_{\perp} \cdot \cos i_m - F_n \cdot K_{i\dot{o}} \cdot (T_{w_{i\dot{o}}} - T_0), \quad (10)$$

С другой стороны, значение  $Q_{i\dot{i}\dot{e}}$  может определиться по мощности теплового потока, переданного через стенку приемника, т.е.

$$Q_{i\dot{i}\dot{e}} = \frac{\lambda_w}{\delta_w} \cdot L_n \cdot \rho_{w_{i\dot{o}}} (T_{w_{i\dot{o}}} - T_0), \quad (11)$$

где  $\lambda_w$  и  $\delta_w$  - соответственно, коэффициент теплопроводности материала изготовления и толщина стенки приемника,  $L_n$  - глубина теплоприемника;

$$\rho_{w_{i\dot{o}}} = \pi \cdot D_{i\dot{o}}, \quad (12)$$

- периметр среднего поперечного сечения стенки приемника;  $T_{w_{i\dot{o}}}$  - температура внутренней теплообменной поверхности стенки приемника;  $D_{i\dot{o}}$  - диаметр среднего поперечного сечения стенки приемника.

Наряду с (10) и (11), значение  $Q_{i\dot{i}\dot{e}}$  может определиться по мощности теплового потока, переданной от внутренней теплообменной поверхности стенки приемника к теплоносителю, имеющему среднюю температуру  $T_f$ , т.е.

$$Q_{i\dot{i}\dot{e}} = \alpha_{k_{i\dot{a}}} \cdot L_n \cdot \rho_{w_{i\dot{a}}} (T_{w_{i\dot{a}}} - T_f), \quad (13)$$

где  $\alpha_{k_{i\dot{a}}}$  - коэффициент теплообмена внутренней поверхности стенки приемника;

$$\rho_{w_{i\dot{a}}} = \pi \cdot D_{i\dot{a}}, \quad (14)$$

- периметр внутреннего поперечного сечения стенки приемника;  $D_{i\dot{a}}$  - внутренний диаметр стенки приемника.

Выражения (10), (11) и (13) перепишем соответственно в виде

$$T_0 - T_{w_{i\dot{o}}} = \frac{Q_{i\dot{i}\dot{e}}}{F_n \cdot K_{i\dot{o}}} - \frac{\alpha_n \cdot R_y \cdot \gamma \cdot \tau_c \cdot \tau_{n,n} \cdot K_e \cdot q_{\perp} \cdot \cos i_i}{K_{i\dot{o}}}, \quad (15)$$

$$T_{w_n} - T_{w_{i\dot{o}}} = \frac{Q_{i\dot{i}\dot{e}}}{\frac{\lambda_w}{\delta_w} \cdot L_n \cdot \rho_{w_{i\dot{o}}}}, \quad (16)$$

$$T_{w_n} - T_f = \frac{Q_{i\dot{i}\dot{e}}}{\alpha_{k_{i\dot{a}}} \cdot L_n \cdot \rho_{w_{i\dot{a}}}}, \quad (17)$$

Суммируя левые и правые части (15), (16), (17) получим

$$Q_{i\dot{i}\dot{e}} = D_k \cdot L_k \cdot \frac{\alpha_n \cdot \tau_{n,k} \cdot R_y \cdot \gamma \cdot \tau_c \cdot \tau_{n,n} \cdot q_{\perp} \cdot \cos i_i - \frac{K_{i\dot{o}}}{K_{i\dot{a}}} \cdot (T_f - T_0)}{1 + \pi \cdot K_{i\dot{o}} \cdot D_n \cdot \left( \frac{1}{\frac{\lambda_w}{\delta_w} \cdot L_n \cdot \rho_{w_{i\dot{o}}}} - \frac{1}{\alpha_{k_{i\dot{a}}} \cdot \rho_{w_{i\dot{a}}}} \right)}, \quad (18)$$

где  $K_{i\dot{a}} = \frac{F_k}{F_n}$  (19)

- степень геометрической концентрации излучения параболического концентратора с приемником цилиндрической формы [4].

Преобразуя формулу (1) с учетом (18), (8), а также используя коэффициенты: тепловой эффективности теплоприемника, тепловой КПД энергоустановки, оптический КПД системы "концентратор-теплоприемник", получим:

$$\eta_e = \frac{\left(1 - \frac{T_0}{T_f}\right) \cdot \eta_m}{1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{T_0}{T_f} \cdot \left[1 - \left(\frac{T_0}{T}\right)^3\right]}, \quad (20)$$

где

$$\eta_m = \eta_{mn} \cdot \left[ \eta_{onn.} - \frac{K_{i\delta.}}{K_{\delta.}} \cdot \frac{T_1 - T_0}{K_{\delta.} \cdot q_{\perp} \cdot \cos i_i} \right] \quad (21)$$

- тепловой коэффициент полезного действия, т.е. тепловая эффективность энергоустановки с параболическим концентратором излучения;

$$\eta_{mn} = \left[ 1 + \pi \cdot K_{i\delta.} \cdot D_n \cdot \left( \frac{1}{\frac{\lambda_w}{\delta_w} \cdot \rho_{w_{\delta.}}} \cdot \frac{1}{\alpha_{k_{\delta.}} \cdot \rho_{w_{\delta.}}} \right) \right]^{-1} \quad (22)$$

- коэффициент тепловой эффективности приемника концентрированного солнечного излучения;

$$\eta_{onn.} = \alpha_i \cdot \tau_{n,k} \cdot R_c \cdot \gamma \cdot \tau_c \cdot \tau_{n,n} \quad (23)$$

- оптический коэффициент полезного действия системы "концентратор-теплоприемник".

Если обозначить через

$$a = \frac{\rho_{w_{cp.}}}{\rho_{w_{\delta.}}}, \quad b = \frac{\rho_{w_{\delta.}}}{\rho_{w_{\delta.}}} \quad (24)$$

и учесть, что  $\rho_{w_{\delta.}} = \pi \cdot D_n$  (25)

то выражение для тепловой эффективности приемника (22) может быть представлено в виде

$$\eta_{mn} = \left[ 1 + K_{i\delta.} \cdot \left( \frac{1}{a \cdot \frac{\lambda_w}{\delta_w}} + \frac{1}{b \cdot \alpha_{k_{\delta.}}} \right) \right]^{-1} \quad (26)$$

Как показывают исследования [2], значение коэффициента зависимости эксергии солнечного излучения от температуры окружающей среды, определяемой по формуле (6) при  $T = 5762$  К, и при изменении  $T_0$  от 273,15 К до 313,15 К может быть определено по аппроксимационной формуле [3]

$$\psi = 1 - 2,314 \cdot 10^{-4} \cdot T_0 \quad (27)$$

(коэффициент перед  $T_0$  в (27) имеет размерность  $K^{-1}$ ).

Подставляя (21) и (27) в решение (20), в итоге получим

$$\eta_e = \frac{\eta_{mn} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_f}\right)}{1 - 2,314 \cdot 10^{-4} \cdot T_0} \cdot \left[ \eta_{onn.} - \frac{K_{i\delta.}}{K_{\delta.}} \cdot \frac{T_f - T_0}{K_{\delta.} \cdot q_{\perp} \cdot \cos i_i} \right] \quad (28)$$

Значение  $T_f$  в (28) в расчетах определяется как среднетермодинамическое, по формуле [3]

$$T_f = \frac{T_{f_{\delta\delta.}} - T_{f_{\delta\delta.}}}{T} \cdot L_n \frac{f_{\delta\delta.}}{T_{f_{\delta\delta.}}} \quad (29)$$

где  $T_{f_{\delta.}}$  и  $T_{f_{\delta.}}$  - соответственно, температуры рабочего тела на входе в теплоприемник и на выходе из него.

По исходным данным, при  $\eta_{onn.} = 0,772$  ( $\alpha_{\delta.} = 0,96$ );  $R_c = 0,94$ ;  $\gamma = 0,97$ ;  $\tau_c = 0,945$ ;  $K_i = 1$  [в момент истинного полудня];  $\tau_{n,k} \approx \tau_{n,n} = 0,966$ ) и  $\eta_m = 0,68$ ; ( $K_{i\delta.} = 8,015 \hat{A}m / (i^2 \cdot \tilde{N})$ ;

$D_k = 5,76 i$ ;

$D_{\delta.} = 0,05 i$ ;  $q_{\perp} \cos i_i = 800 Bm / i^2$ ;

$T_f = 953 K$ ;  $T = 303 K$ ;  $T_{w_{\delta.}} = 959 K$  и

$\eta_{mn} = 0,99$ ) значение эксергетической эффективности системы концентратор-теплоприемник, определенное по (28), составляет 0,572, что существенно (от 1,5 до 1,7 раза) выше, чем у аналогичного показателя параболических концентраторов [3].

Предложенная методика расчета учитывает степень влияния оптических параметров концентратора, тепло-технических и оптических параметров теплоприемника, а также температуры рабочего тела и окружающей среды на величину эксергетической эффективности солнечно-топливных энергетических установок на базе двигателя Стирлинга и может быть применена при термодинамическом анализе энергетических установок с использованием эксергетических методов исследования.

#### Литература:

1. Аvezов Р.Р. // Гелиотехника. 1999. № 1. С. 17-24.
2. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия. М.: Энергия. 1968. 280 с.
3. Аvezов Р.Р. // Гелиотехника. 1999. № 6. С. 31-39.
4. Мухитдинов М.М., Эргашев С.Ф. Солнечные параболические установки. Ташкент: Фан, 1994. 207 с.