

ФИЗИЧЕСКИЕ (ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ) ПРОЦЕССЫ ПРИ КОНЦЕНТРИРОВАНИИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Янчилин П.Ф.

Учреждение образования «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Республика Беларусь, tgv_bstu@tut.by

The article gives a summary of the properties of the elements involved in the transport and distribution of radiant energy, ie the sun as the primary radiator, reflecting elements concentrating system and radiation detector surface. A qualitative assessment of energy processes in solar power plants, allowing to estimate the important parameters — temperature, coolant flow rate, the amount of the heat surface.

Введение

Концентрирование солнечного излучения представляет собой частный случай лучистого переноса в системе тел, разделенных диатермичной средой. Специфика данного процесса определяется свойствами первичного источника излучения – Солнца – и особенностями гелиотехнических концентрирующих систем. Эти системы относятся к классу оптико-энергетических систем и предназначены исключительно для перераспределения потока солнечного излучения в пространстве с целью повышения его плотности.

Для описания процессов лучистого переноса в системах, концентрирующих солнечное излучение (КСИ), требуется использование специальных физических коэффициентов, или функций, характеризующих микропроцессы взаимодействия излучения с телами на макроскопическом уровне. Для рассматриваемого нами процесса концентрирования основной величиной является коэффициент отражения солнечного излучения поверхностью зеркала RC , учитывающий потери энергии, связанные с поглощением излучения зеркалом.

Описание системы КСИ

Приведём обобщенное описание свойств всех тел (элементов), участвующих в процессе переноса и распределения лучистой энергии, т. е. Солнца как первичного излучателя, отражающих элементов концентрирующей системы и поверхности приемника излучения.

1) Принимаем, что Солнце, как бесконечно удаленный дисковый излучатель, посылает в каждую точку отражающей поверхности концентратора круговой конический пучок лучей с вершиной в этой точке. Оси всех пучков параллельны между собой. На основе фотометрического подхода заменяем круговой конический пучок параллельным пучком бесконечно малой ширины, т.е. фактически лучом, полагая, что такой луч тоже переносит всю энергию физического пучка. Основной фотометрической характеристикой излучателя является индикатриса силы излучения в пучке $f_C(\varphi)$. Распределение плотности потока лучистой энергии, испускаемой Солнцем по поверхности является достаточно равномерным, но объемный характер излучения приводит к спаду яркости солнечного диска от центра к краю [1]. В наших расчётах мы пренебрежём неравномерностью излучения солнечного диска и получим $f_C(\varphi) = 1$. Для нахождения абсолютных значений локальной плотности сконцентрированного излучения необходимо знать интегральные и спектральные значения плотности солнечного излучения на входе в систему. Эти показатели зависят от расстояния до Солнца, атмосферной массы и метеофакторов. Заатмосферное распределение энергии в спектре солнечного излучения близко к спектру абсолютно черного тела при температуре $T_C \approx 5770^\circ\text{K}$ (значительная часть энергии приходится на видимую и инфракрасную часть спектра – $\lambda = 0,4\sim 800$ мкм), а нор-

мальная поверхностная плотность мощности (облученность) или солнечная постоянная в околоземном пространстве характеризуется средним за год значением $E_C \approx 1360$ Вт/м².

2) Система концентрирования обеспечивает повышение плотности солнечного излучения, главным образом за счет изменения его направления и локализации в определенной области пространства. Вследствие этого форма отражающей поверхности и ее различные отклонения от геометрически идеальной конфигурации оказывают определяющее влияние на распределение плотности сконцентрированного излучения. Любая реальная отражающая поверхность не может быть гладкой математической поверхностью и имеет различного рода отклонения – глобальные искажения формы, локальные геометрические неточности, шероховатости (микронеровности). Потери энергии при отражении учитываются коэффициентом отражения RC , который зависит от спектральной отражательной способности зеркального покрытия в диапазоне длин волн солнечного излучения и угла его падения на отражающую поверхность. Показатели всех наиболее важных свойств отражающих поверхностей системы КСИ в общем случае являются переменными. Однако, по рекомендации [1], при практических расчетах гелиотехнических концентрирующих систем влияние некоторых из вышеперечисленных показателей часто можно не учитывать. Значения RC определяют обычно экспериментальным путем. Для нашей системы концентрации мы оставим коэффициент отражения, который учитывает все три отклонения, и зададимся его величиной $RC = 0,8$.

3) Приемник в отличие от концентратора рассматривается в данном случае не как физический объект, а как абстрактная геометрическая поверхность СП, определенным образом ориентированная в поле отраженного излучения. Наш приёмник КСИ расположен в фокусе концентратора, состоящего из совокупности концентрических конусов. Он принадлежит к приёмникам открытого типа – у него отсутствует взаимное затенение элементов поверхности, освещается со всех сторон и, желательно, должен иметь форму сферы.

Математическое описание процесса лучистого переноса в системе «Солнце – концентратор – приемник» осуществляется в два этапа: вначале мы проанализировали взаимодействие солнечного излучения с отражающей поверхностью, а затем, определив характеристики концентратора как вторичного излучателя (RC), должны получить соотношения для расчета облученности поверхности приёмника.

На основе приведённых данных сформулируем задачу концентрирования солнечного излучения в общем виде – увеличение плотности потока солнечного излучения, попадающего на концентратор, для преобразования в энергию другого вида (тепловую, электрическую) на приемнике излучения.

Расчёт системы КСИ

В научно-исследовательской лаборатории «ПУЛЬСАР» БрГТУ под руководством д.т.н., профессора Северянина Виталия Степановича ведётся разработка гелиоустановки «ЛУЧ», основными особенностями которой являются гелиоконцентратор и ориентирование на Солнце механизмом слежения. Исходя из предыдущего пункта в нашей системе тел (гелиоустановка «ЛУЧ»), концентратор характеризуется только коэффициентом отражения, которым мы задаёмся ($RC = 0,8$). Для теплоприемника важны следующие факторы: качество и оптические свойства поверхности; форма и размер поверхности, габариты; компоновка с другими элементами; подвод и отвод теплоносителя.

Внешняя поверхность теплоприемника должна обладать следующими оптическими свойствами – максимально поглотить попавшее на неё солнечное излучение и минимально отразить его обратно в атмосферу. Для этого применяют специальное селективное покрытие для лучепоглощающей поверхности

теплоприемника. Оно обладает высоким коэффициентом поглощения α коротковолнового солнечного излучения (короче 2 мкм), низкой излучательной способностью ϵ в инфракрасной области (длиннее 2 мкм), стабильной величиной степени селективности α/ϵ , способностью выдерживать кратковременный перегрев и хорошей коррозионной стойкостью. Для идеальной селективно-поглощающей поверхности $\alpha = 1$ и $\epsilon = 0$ [2].

Поверхность «Н» (СП – геометрическая поверхность) теплоприемника по тепловой работе обусловлена степенью концентрации солнечного потока K_C (отношение поперечного сечения солнечного потока «F» ($S_{c.p.}$ – площадь кругового кольца гелиоконцентратора) к величине поверхности теплоприемника, воспринимающего концентрированное излучение СПК) [3].

При заданном солнечном потоке «F» для определенной тепловой мощности Q справедливы соотношения:

$$K_C = \frac{F}{H} = \frac{S_{c.n.}}{S_{ПК}}, \quad Q = q \cdot H = q \cdot S_{ПК} \Rightarrow q = \frac{Q \cdot K_C}{S_{c.n.}} \cdot R_C \quad (1)$$

где q – удельный тепловой поток, падающий от гелиоконцентратора на теплоприемник, (пропорционален степени концентрации K_C), Вт/м², с учётом коэффициента отражения R_C .

В нашей системе «Солнце – концентратор – приемник» перенос тепла происходит посредством лучистого теплообмена между телами Солнце и теплоприемник. Для его исследования будем использовать метод сальдо, как наиболее нам подходящий, использующий величины, которые характеризуют конечные эффекты теплообмена между телами данной излучающей системы. Плотность потока собственного излучения каждого из тел (Солнца и приёмника) представим по закону Стефана-Больцмана через заданные температуры и коэффициенты теплового излучения [4]:

$$E_C = c_0 \cdot \epsilon_C \cdot \left(\frac{T_C}{100} \right)^4, \quad E_{II} = c_0 \cdot \epsilon_{II} \cdot \left(\frac{T_{II}}{100} \right)^4 \quad (2)$$

Тогда получим плотность потока результирующего излучения q_0 , падающий от Солнца на поверхность гелиоконцентратора, Вт/м²:

$$q_0 = c_0 \cdot \epsilon_n \cdot \left[\left(\frac{T_C}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{II}}{100} \right)^4 \right] \quad (3)$$

$$q = q_0 \cdot K_C, \quad (4)$$

где T_C , T_{II} – температуры Солнца и приемника, соответственно, °К; c_0 – коэффициент лучеиспускания (излучательная способность) абсолютно черного тела, $c_0 = 5,6703$ Вт/(м²·К⁴); ϵ_n – приведенная степень черноты системы (приведённый коэффициент излучения), для рассматриваемой системы тел равна

$$\epsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_C} + \frac{1}{\epsilon_{II}} - 1} \quad (5)$$

ϵ_C , ϵ_{II} – коэффициенты излучения Солнца и приемника, соответственно ($\epsilon_C=1$, а ϵ_{II} зависит от оптических свойств поверхности теплоприемника).

Так же получить плотность потока результирующего излучения q_0 можно другим способом. Условия прохождения солнечного луча через атмосферу определяются ее прозрачностью, которая описывается коэффициентом интегральной прозрачности атмосферы P [5]:

$$P_m = m \sqrt{\frac{q_0}{q_c}}, \quad (6)$$

где q_0 – прямая радиация на нормальную к лучу поверхность при оптической массе атмосферы τ ; q_c – радиация вне атмосферы (солнечная постоянная), $q_c = EC \approx 1360 \text{ Вт/м}^2$.

Так как P зависит от оптической массы, то указывают, к какой массе τ он относится – P_τ . Обычно используют P_2 – коэффициент интегральной прозрачности атмосферы при массе 2 (высота солнца практически 30°).

Изменения энергетической освещенности в безоблачную погоду при определенной высоте солнца определяются прозрачностью атмосферы. Среднемесячные значения коэффициента интегральной прозрачности P_2 в Минске приведены в таблице 1 [5].

Таблица 1 – Среднемесячные значения коэффициента интегральной прозрачности P_2 в Минске

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0,77	0,76	0,74	0,72	0,70	0,71	0,70	0,70	0,71	0,75	0,77	0,78

Плотность потока результирующего излучения q_0 , Вт/м^2 , падающий от Солнца на поверхность гелиоконцентратора, находим из формулы (2.6):

$$q_0 = P_m^2 \cdot q_c \quad (7)$$

Воспринятая тепловая мощность Q_Π , Вт утилизируется в теплоприемнике (нагрев теплоносителя, конструкции и т. п. — Q_H), и частично теряется в окружающую среду через обратное излучение Q_{II} (уже в инфракрасной части спектра) и конвекцию Q_K . Для стационарного режима верно условие:

$$Q_\Pi = Q_H + Q_{II} + Q_K \quad (8)$$

$$Q_H = \Delta I \cdot G \quad (9)$$

где ΔI – приращение энтальпии теплоносителя, кДж/кг ; G – расход теплоносителя, кг/с .

$$Q_{II} = \varepsilon_\Pi \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T_\Pi}{100}\right)^4 \cdot S_{\Pi K} \quad (10)$$

$$Q_K = \alpha_K \cdot (T_\Pi - T_B) \cdot S_{\Pi K} \quad (11)$$

где α_K – коэффициент конвективной теплоотдачи, $\text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$; T_B – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$.

Исходя из равенства теплового потока, поступающего на теплоприёмник, и теплового потока, принятого поверхностью теплоприёмника $Q = Q_\Pi$, составим систему уравнений из формул (1 - 11):

$$\begin{cases} Q = Q_H + Q_{II} + Q_K \\ Q = S_{\Pi K} \cdot q_0 \cdot K_C \cdot R_C \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Q = \Delta I \cdot G + \varepsilon_\Pi \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T_\Pi}{100}\right)^4 \cdot S_{\Pi K} + \alpha_K \cdot (T_\Pi - T_B) \cdot S_{\Pi K} \\ Q = S_{\Pi K} \cdot K_C \cdot R_C \cdot \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_C} + \frac{1}{\varepsilon_\Pi} - 1} \cdot c_0 \cdot \left[\left(\frac{T_C}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_\Pi}{100}\right)^4 \right] \end{cases} \quad (12)$$

или

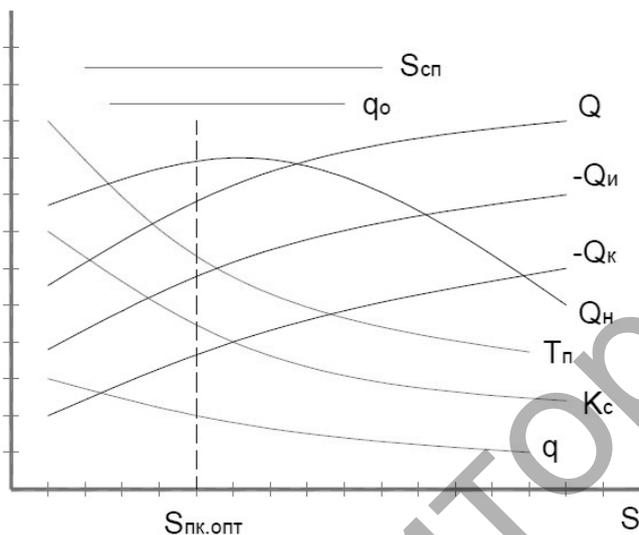
$$\begin{cases} Q = Q_H + Q_{II} + Q_K \\ Q = S_{ПК} \cdot q_0 \cdot K_C \cdot R_C \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Q = \Delta I \cdot G + \varepsilon_{II} \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T_{II}}{100}\right)^4 \cdot S_{ПК} + \alpha_K \cdot (T_{II} - T_B) \cdot S_{ПК} \\ Q = S_{ПК} \cdot K_C \cdot R_C \cdot P_m^2 \cdot q_C \end{cases} \quad (13)$$

С помощью данных систем можно найти важные параметры для проектирования гелиоустановки «ЛУЧ», такие как – температура поверхности теплоприёмника ТП, т.е. температура в фокусе концентратора, и оптимальный размер теплоприёмника по найденной его поверхности СПК.

При работе гелиоустановки следует всегда достигать максимального отбора теплоты от приёмника и передаче его циркулирующему теплоносителю, при этом должно соблюдаться условие

$$Q_H = Q - Q_{II} - Q_K \rightarrow \max \quad (14)$$

Это означает, что можно найти оптимальное значение поверхности теплоприёмника, воспринимающего концентрированное излучение СПК при известных площади кругового кольца гелиоконцентратора $S_{сп}$ и плотности потока результирующего излучения q_0 , падающего от Солнца на поверхность гелиоконцентратора ($ТП = f(S_{ПК})$). Эти зависимости показаны на рисунке 1.



приемника, воспринимающего концентрированное излучение СПК при известных площади кругового кольца гелиоконцентратора $S_{сп}$ и плотности потока результирующего излучения q_0 , падающего от Солнца на поверхность гелиоконцентратора ($ТП = f(S_{ПК})$). Эти зависимости показаны на рисунке 1.

Рисунок 1 – Тепловые зависимости в теплоприемнике

Заключение

Анализируя приведённую в статье информацию, можно сделать следующие выводы:

- для увеличения температуры теплоносителя нужно снижать площадь поверхности приёмника СПК;
- для увеличения расхода теплоносителя при незначительной температуре нужно увеличивать площадь СПК;
- для определённого расхода теплоносителя и заданной температуры нужно определить оптимальное значение СПК. ОПТ.

Список литературы

1. Андреев, В. М., Грилпхес, В. А., Румянцев, В. Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. – Л. : Наука, 1989. – 310 с.
2. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. М. : Энергоатомиздат, 1991 г. – 208 с.
3. Северянин, В.С. Янчилин, П.Ф. Некоторые пути развития гелиотехники. // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2012. – № 2: Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – С. 43–50.
4. Теплопередача: Учебник для ВУЗов / В.П.Исаченко и др. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с.
5. Климат Беларуси / Под ред. В.Ф. Логинова – Мн. : Институт геологических наук АН Беларуси, 1996.