

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛОСКИХ РЕФЛЕКТОРОВ В ГЕЛИОУСТАНОВКАХ

Ермуратский Василий, Ермуратский Владимир (Институт энергетики АН Молдовы), Ермуратский П. (Московская государственная академия тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова г. Москва)

Аннотация. Методом геометрической оптики получены выражения для расчёта эффективности применения плоских рефлекторов для повышения интенсивности солнечного излучения, падающего на прозрачное ограждение гелиоустановок.

Ключевые слова: солнечное излучение, плоские рефлекторы, гелиоустановки.

EFICIENTA UTILIZĂRII REFLECTOARELOR PLATE ÎN INSTALAȚII HELIOTERMICE

Ermuratski Vasili, Ermuratschii Vladimir (Institutul de Energetică al Academiei de Științe), Ermuratski P. (Academia de stat a tehnologiilor chimice fine M.V. Lomonosov din Moscova)

Rezumat. Conform metodei optice geometrice au fost obținute expresii pentru calculul eficienței utilizării reflectoarelor plate pentru majorarea intensității radiației solare, care cade pe membrana transparentă a instalațiilor heliotermice.

Cuvinte cheie: radiația solară, reflectoare plane, instalații heliotermice.

EFFICIENCY OF APPLIANCE OF FLAT REFLECTORS IN SOLAR DEVICES

Ermuratski Vasili, Ermuratski Vladimir (Institute of Power Engineering, Academy of Sciences of Moldova, Kishinev), Ermuratski P. (M.V. Lomonosov Moscow state academy of fine chemical technology, Moscow)

Abstract: There were obtained expressions for the calculus of the efficiency of the use of flat reflectors using the methods of geometric optics. These expressions are used for calculations of the use of flat reflectors for increasing intensity of solar radiation which is directed to the transparent barrier of solar devices.

Key words: Solar radiation, flat reflectors, solar devices.

Объект исследования. В качестве объекта рассматривается система преобразования солнечного излучения в тепловую энергию, состоящая из плоских рефлекторов и поглотителя, находящихся в непосредственной близости друг от друга. Такие системы являются одним из вариантов реализации гелио установок (ГУ) [1]. Плоские рефлекторы увеличивают плотность потока солнечного излучения, падающего на абсорбер ГУ, что повышает их эффективность. Обычно рефлектор имеет те же размеры, что и прозрачное ограждение ГУ, однако возможны случаи, когда это не соблюдается. В работе [1] имеются методика расчёта вклада плоских рефлекторов, базирующаяся на применении алгебры потоков радиационного теплообмена [2]. Однако по нашему мнению здесь более подходящими являются методы геометрической оптики, поскольку основной вклад от рефлекторов обусловлен прямым, а не рассеянным излучением. Кроме того, для

правильной оценки энергетических показателей ГУ важно знать не только общее поступление солнечной энергии, но также учитывать, в какое время она поступает.

Методические основы расчёта эффективности применения плоских рефлекторов

Решение задачи для самого общего случая, когда произвольно заданы: азимуты ориентации поверхностей, углы наклона к горизонтальной плоскости прозрачного ограждения ГУ и рефлекторов, а также их размеров заключается в нахождении уравнений границ «солнечного зайчика» в плоскости прозрачного ограждения ГУ. Так как плоские рефлекторы обычно имеют прямоугольную форму, то вместо уравнений границ можно использовать координаты габаритных точек «солнечного зайчика». Несмотря на кажущуюся простоту поставленной задачи, её решение в общем случае приводит к довольно громоздким выражениям. Поэтому ниже покажем решение задачи для частных, но наиболее широко применяемых на практике вариантах, когда прозрачное ограждение ГУ и рефлектор имеют одинаковые размеры и располагаются под углом 90° . При этом рефлектор может быть вертикальным, а прозрачное ограждение - горизонтальным и наоборот. На рис.1 показана расчётная схема для случая вертикально расположенного плоского зеркально отражающего рефлектора и горизонтального прозрачного ограждения. Аналогичная схема легко строится для горизонтального расположения рефлектора.

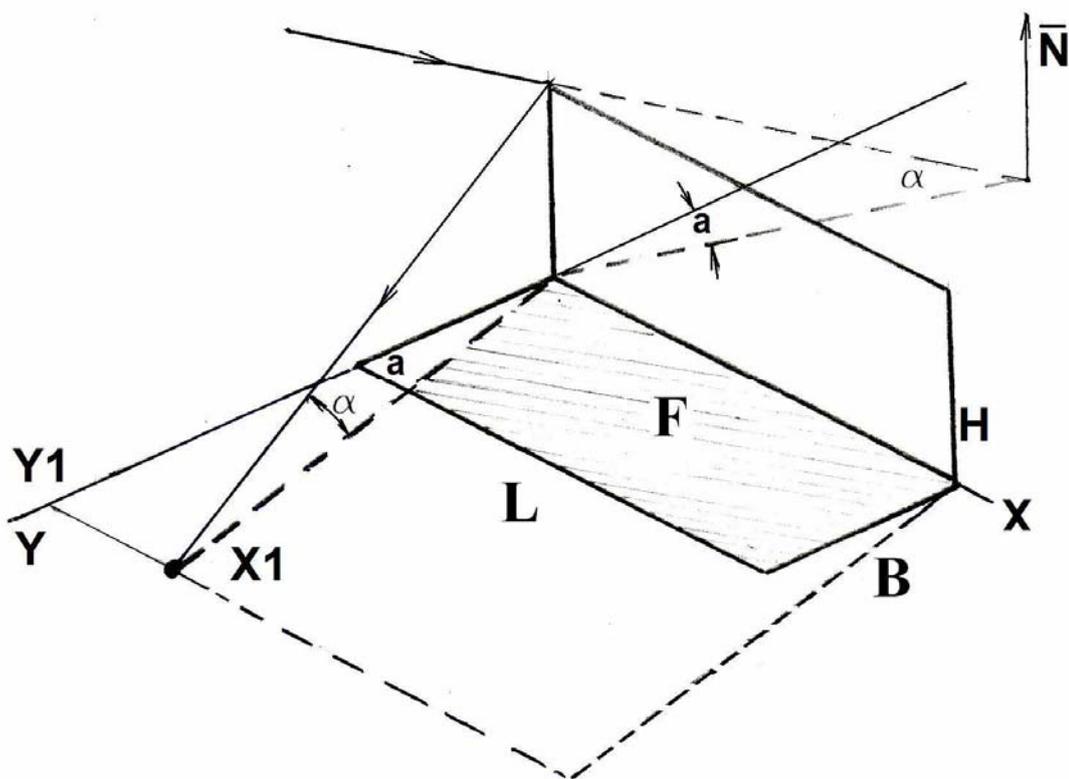


Рис.1 Схематическое изображение ортогональной системы рефлектор – прозрачное ограждение

Поскольку при кажущемся перемещении Солнца по небосводу изменяется его азимут и угол высоты, то при неподвижном положении ГУ и рефлектора будут перемещаться границы «солнечного зайчика». Для случая ориентации сторон ГУ и рефлектора строго по направлению стран света (ось Y направлена на юг, а X - на восток), используя схему рис.1, можно получить следующие выражения для координат точки встречи луча, отражённого от верхнего левого края рефлектора, с плоскостью прозрачного ограждения:

$$X_1 = H \sin a / \operatorname{tg} \alpha \quad (1)$$

$$Y_1 = H \cos a / \operatorname{tg} \alpha \quad (2)$$

где H – высота рефлектора; a, α – азимут и угол высоты Солнца. Последние величины рассчитываются по формулам, приведенным в работах [1,3]. В частности, азимут Солнца рассчитывается по формуле:

$$a(\omega) = \arcsin(\cos(\delta) \sin(\omega) / \cos(\alpha(\omega))), \quad (3)$$

где ω – часовой угол, который принят отрицательным для дополуденного солнечного времени и положительным в другой половине дня; δ – угол склонения Солнца, зависящий от порядкового номера дня года [1,3].

Так как при прямоугольной форме рефлектора «солнечный зайчик» имеет форму параллелограмма, то координата точки встречи луча, отражённого от верхнего правого угла рефлектора X_2 , определяется по формуле:

$$X_2 = X_1 + L, \quad (4)$$

где L – длина рефлектора.

Эти координаты определяют положение и размеры «солнечного зайчика». Полезной компонентой, естественно, считаем ту часть площади «солнечного зайчика», которая является общей с прозрачным ограждением. На рис.1 эта часть (площадь перекрытия F) заштрихована.

Анализ показал, что при изменении азимута и угла высоты Солнца, а также соотношения сторон прозрачного ограждения ($L, B = H$) возможны три области, для которых площадь перекрытия должна рассчитываться по разным формулам. Условно эти области соответствуют малым, большим углам высоты Солнца, а также утренним и вечерним часам, когда азимут близок к $\pi / 2$.

Площадь «солнечного зайчика», которая находится в пределах границ прозрачного ограждения ГУ, определяется по следующим формулам:

$$F = LB - 0.5B^2 \operatorname{tg} a \quad Y_1 \geq B \quad \operatorname{tg} a \leq L/B \quad (5)$$

$$F = LY_1 - 0.5 Y_1^2 \operatorname{tg} a \quad Y_1 \leq B \quad X_1 \leq L \quad (6)$$

$$F = 0.5L^2 \operatorname{tg}(\pi/2 - a) \quad \operatorname{tga} \geq L/B \quad X_1 \geq L \quad (7)$$

Для варианта системы с горизонтально расположенным рефлектором и вертикальным прозрачным ограждением ГУ формулы для расчётов площади перекрытия имеют следующий вид:

$$F = LB - 0.5B^2 \operatorname{tg}\psi \quad \operatorname{tg}\psi \leq L/B \quad Z_1 \geq B \quad (8)$$

$$F = LZ_1 - 0.5Z_1^2 \operatorname{tg}\psi \quad Z_1 \leq B \quad X_1 \leq L \quad (9)$$

$$F = 0.5L^2 \operatorname{tg}(\pi/2 - \psi) \quad \operatorname{tg}\psi \geq L/B \quad X_1 \geq L \quad (10)$$

Координаты точки встречи луча, отражённого от угла периферии рефлектора, с вертикальной плоскостью, в которой расположено прозрачное ограждение, определяются по следующим формулам:

$$Z_1 = H \operatorname{tg}\alpha / \cos a \quad (11)$$

$$X_1 = H \operatorname{tga} \quad (12)$$

Угол ψ рассчитывается по формуле:

$$\psi = \operatorname{arctg}(\sin a \operatorname{tg}\alpha) \quad (13)$$

Так как в зависимости от времени суток азимут Солнца может быть как положительным, так и отрицательным, а площадь перекрытия не зависит от знака азимута, то в формулах (4) – (13) используются его абсолютные значения. Особенностью определения азимута Солнца является также отбор подходящих корней уравнения (3).

Угол падения отражённых от рефлекторов лучей на прозрачное ограждение такой же, как и для непосредственно падающих солнечных прямых лучей, что является следствием ортогональности двух плоскостей, однако их интенсивность более низкая из-за того, что коэффициент отражения рефлекторов меньше единицы.

Поэтому мощность, падающего на прозрачное ограждение солнечного излучения, определяется по формуле:

$$Q = I(\tau, N_d)(LB + \rho_r F), \quad (14)$$

где $I(\tau, N_d)$ – интенсивность прямых солнечных лучей, падающих на прозрачное ограждение, зависящая от времени суток τ , порядкового номера дня года N_d ; ρ_r – коэффициент отражения рефлектора.

Эффективность применения рефлекторов оценивается отношением энергетических показателей (мощностей, энергий, КПД, потерь тепла) или экономических показателей гелиоустановки, рассчитываемых при наличии и отсутствии рефлекторов.

Результаты расчётов. Предложенная методика реализована в виде программы – в среде Delphi. Были выполнены расчёты для системы, состоящей из ортогонально расположенных плоского рефлектора и прозрачного ограждения.

В таблицах 1 и 2 приведены результаты расчётов суточного значения удельной энергии, падающей на прозрачное ограждение ГУ при отсутствии рефлекторов ($\rho_r = 0$) и при их наличии ($\rho_r = 0.78$). В последнем случае варьировалось отношение сторон рефлектора. Расчёты выполнены для дней, находящихся в середине месячного интервала.

Таблица 1

Удельная энергия (МДж/м²) при горизонтальном прозрачном ограждении

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\rho_r = 0$	3	5.9	10.7	16.3	20.1	21.9	21.7	18.7	13	7.4	3.74	2.44
$L/B = 1$	4.9	9.3	16	22	24.9	26	26.1	24.1	18.4	11.2	6	3.9
$L/B = 2$	5.2	10.	17.4	23.5	25.9	26.8	27	25.4	20.6	12.3	6.3	4.1
$L/B = 3$	5.3	10.2	17.9	24.1	26.2	27.1	27.3	25.8	21.4	12.6	6.4	4.2

Таблица 2

Удельная энергия (МДж/м²) при вертикальном прозрачном ограждении

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\rho_r = 0$	8.4	11.2	12.7	11.3	8.6	7.1	7.7	10.2	12.5	12	9.3	7.5
$L/B = 1$	10.8	15.6	19.6	17.2	11.6	8.4	9.7	14.4	18.6	17.4	12.1	9.3
$L/B = 2$	10.8	15.8	20.4	18.3	12.7	9.8	11.1	15.6	19.8	17.6	12.2	9.4
$L/B = 3$	10.8	15.8	20.6	18.9	13.6	10.8	12	16.7	21.2	17.6	12.2	9.4

В таблицах 3 и 4 приведены значения эффективности применения рефлекторов для случаев горизонтального и вертикального расположения прозрачного ограждения гелиоустановки при использовании в качестве критерия увеличение суточного значения энергии солнечного излучения.

Таблица 3

Эффективность применения рефлекторов для случаев горизонтального расположения прозрачного ограждения

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$L/B=1$	1.58	1.57	1.5	1.34	1.23	1.17	1.19	1.29	1.42	1.51	1.62	1.67
$L/B=3$	1.77	1.73	1.67	1.47	1.27	1.19	1.22	1.37	1.64	1.7	1.73	1.75

Таблица 4

Эффективность применения рефлекторов для случаев вертикального расположения прозрачного ограждения

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$L/B=1$	1.24	1.3	1.43	1.52	1.57	1.59	1.59	1.55	1.5	1.35	1.24	1.2

L/B=3	1.27	1.37	1.57	1.68	1.7	1.7	1.71	1.69	1.67	1.43	1.29	1.24
-------	------	------	------	------	-----	-----	------	------	------	------	------	------

Из данных этих таблиц видно, что ориентация прозрачного ограждения и соответственно рефлекторов заметно и по-разному в течение года влияет на эффективность их применения в гелиоустановках. Естественно, что оценку эффективности применения рефлекторов следует производить по суммарному поступлению солнечной энергии на прозрачные ограждения в течение заданного интервала времени.

Можно также отметить, что отношение сторон вышеуказанных элементов сравнительно слабо отражается на эффективности применения рефлекторов, если в основе лежит оценка дневной энергии. Это обусловлено тем, что доля дневной энергии, падающей на прозрачные ограждения при больших углах азимута Солнца ($a > \pi/3$), существенно меньше, чем для интервала малых значений этой величины.

Заключение

Предложены методические основы расчёта эффективности применения плоских зеркально отражающих рефлекторов путём определения результирующей плотности потока энергии, поступающей на прозрачное ограждение гелиоустановок в виде прямого солнечного излучения. Разработанная программа позволяет рассчитывать эффективность применения плоских рефлекторов для различных азимутальных углов ориентации системы. Дальнейшая наша работа направлена на решение задачи оценки эффективности применения рефлекторов при произвольной ориентацией по углам наклонов элементов системы, а также исследовании их влияния на КПД гелиоустановок, в том числе – эффекта экранирования рефлекторами рассеянной радиации солнечного излучения.

Литература

1. Duffie J.F., Beckman W.A. Solar engineering of Thermal Processes. Second Edition. N-W., 1991. John Willy & Sons.
2. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Изд.4. М. Энергоиздат. 1981. 417с.
3. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. М.: Энергоатомиздат, 1991.

Ермуратский Владимир Васильевич - доктор-хабилитат технических наук, заведующий лабораторией нетрадиционных источников энергии Института энергетики АНМ.

Научные интересы связаны с исследованиями в области возобновляемых источников энергии и энергосбережения. Занимается разработкой и исследованиями низкотемпературных солнечных тепловых установок и устройств на их основе. ermuratskie@gmail.com

Ермуратский Василий Владимирович - инженер лаборатории управляемого электропривода Института энергетики АН РМ. Научные интересы связаны с разработкой методов и программ моделирования процессов в технических устройствах и системах.

Ермуратский Пётр Васильевич - доктор-хабилитат технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники, электроники, микропроцессорной техники им. А.В.Нетушила, Московская государственная академия тонкой химической технологии им. М. В. Ломоносова. Научные интересы связаны с

исследованиями в области планирования экспериментов и моделирования процессов в нелинейных электрических цепях.