

КОНЦЕНТРИРУЮЩИЕ УСТАНОВКИ С ДВУМЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ОТРАЖАТЕЛЯМИ

Светлана Воскресенская

Национальная академия природоохранного и курортного строительства
Адрес: 95493, Украина, г. Симферополь, ул. Киевская 181, корпус 3, к. 204
e-mail: voskres.s@mail.ru

Аннотация. Исследована зависимость коэффициента концентрации от формы вторичного цилиндрического отражателя и его положения относительно первичного. Дана рекомендация по размещению для обеспечения максимальных выходных параметров. Рассмотрено распределение солнечной энергии по поверхности приемника, так как оно имеет большое значение для применения совместно с солнечной батареей при выработке электрической энергии.

Ключевые слова: концентрирующая установка, первичный отражатель, вторичный отражатель, приемник.

ВВЕДЕНИЕ

Причиной медленного развития солнечной энергетики является малое значение падающего потока энергии – на 3–4 порядка меньше, чем при сжигании химического топлива, а кроме того, непостоянство в зависимости от времени суток, сезона и погоды. Чтобы скомпенсировать эти недостатки, надо собирать солнечный поток с большой площади, применяя различные концентрирующие установки, и запасать энергию на нерабочее время с помощью аккумуляторов. Целесообразность использования солнечного излучения в том или ином районе определяется суммарной энергией, которая поступает на поверхность Земли за определенное время [14]. Среднегодовой поток солнечной радиации на поверхности Земли на широте 45° составляет порядка $0,4 \text{ кВт/м}^2$ – почти в четыре раза меньше того, что падает на границу атмосферы. Пока что применяют концентрирующие установки удаётся «малой энергетике», предназначенной для питания электроэнергией и теплом отдельных домов, небольших предприятий и поселков. Преобразование солнечного излучения в теплоту невысокого температурного потенциала, достаточного для горячего водоснабжения, отопления, охлаждения воздуха в жилых, общественных и производственных зданиях и сооружениях, является направлением наиболее подготовленным для практического применения среди аспектов солнечной энергетики [6]. Примеры использования концентрирующих установок для индивидуальных потребителей приведены, например, в источниках [1, 12]. В статье [17] приведены солнечные энергетические установки, изготавливаемые промышленно.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Основное функциональное назначение солнечных концентрирующих установок – повышение плотности потока солнечного излучения до уровня, обеспечивающего его эффективное

преобразование в энергию требуемого вида. При этом не только повышается плотность солнечного излучения, но и изменяется его распределение в пространстве [4]. То есть, необходимо четко знать, в какую область поместить приемник, и его размеры, соответственно, которые обеспечат более эффективное преобразование. Концентрация может быть произведена с помощью одного отражателя с однократным или многократным отражением или же с помощью двух. Зеркала конструктивно выполняются в виде непрерывно-гладкой (цельной) поверхности и ступенчато-разрывной (составной). Известно, что цельные зеркала обладают наивысшей энергетической эффективностью. Однако их изготовление, особенно при больших размерах, связано с большими трудностями технического и технологического характера, поэтому цельные зеркала применяются лишь в установках небольшой мощности (диаметром до 3 м) [13]. Применение цельных отражателей разобрано в источниках, например [4, 15]. При этом солнечные лучи один раз или несколько отражаются от одной и той же поверхности и попадают на приемник солнечного излучения. Многократное отражение наблюдается для фоконов и фоклинов, цилиндрических концентраторов с поперечным сечением, выполненным двумя радиусами, когда окружность меньшего радиуса сопрягается с окружностью большего радиуса в плоскости, на которой расположены центры обоих радиусов, перпендикулярной плоскости, воспринимающей солнечное излучение. В данной работе будем рассматривать двукратное отражение (от двух поверхностей одинаковой формы) с применением цельных поверхностей.

В источнике [3] рассмотрено моделирование вторичного отражателя для первичного отражателя известной формы, когда все сконцентрированные лучи должны попасть в одну точку R (рис. 1). На практике решить подобного рода задачу достаточно тяжело, так как необходимо найти последовательный ряд точек Q_1, Q_2, \dots, Q_n , удовлетворяющих требованиям, причем каждая последующая не может быть определена

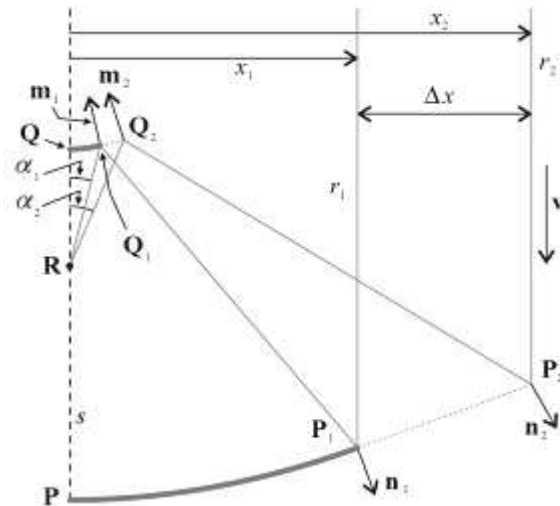


Рис. 1. Построение вторичного отражателя при заданной форме первичного и точке фокусировки R
 Fig. 1. Construction of the second reflector at the set form of primary and focusing point R

без значения предыдущей. Еще одним недостатком такого метода является то, что не возможно заранее проанализировать, какая часть первичного отражателя будет затенена вторичным. Аналогичный метод моделирования, но приемника, рассмотрен в работе [5]. Преимущество при этом заключается в равномерности распределения солнечных лучей, а недостаток в том, что в качестве второго этапа при моделировании автором предлагается операция сплайн – аппроксимации, необходимая для повышения точности построений и увеличения степени равномерности. Существенным недостатком моделей [3, 5] является то, что последовательное построение ординат точек образующей отражателя создает заметную ошибку в ориентации элементов отражателя. Причем эта ошибка накапливается по мере увеличения числа частей. Эти факторы приводят к невыгодности реализации.

Поэтому в качестве отражателей лучше выбирать известные поверхности, как, например, в работе [2]. Тогда можно проследить направление солнечных лучей и их распределение по приемнику.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью работы является моделирование и исследование солнечной концентрирующей установки с двумя отражателями и двукратным отражением лучей. Для случая выработки электрической энергии с помощью фотоэлементов рассматривается распределение солнечной энергии по поверхности приемника.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Рассмотрим случай, когда концентрирующая установка состоит из двух цилиндрических отражателей с разными радиусами кривизны. Солнечное излучение нормально падает на ее

поверхность. Лучи, отразившись от цилиндрической поверхности с большим радиусом кривизны R, попадают на тыльную часть цилиндрической поверхности меньшего радиуса r, а далее на приемник. Общий вид солнечной концентрирующей установки показан на рис. 2. Моделирование осуществлено в программе Maple.

Разность радиусов кривизны:

$$h = R - r \quad (1)$$

будет совпадать с высотой расположения одного отражателя относительно другого в случае, если центры кривизны совпадают.

Известно, что для цилиндрической поверхности направление отраженных лучей сильно меняется. То есть, излучение, падающее на части концентрирующей установки, удаленные от оптической оси, перенаправляются вниз и попадают на ту часть концентрирующей установки, которая ближе к оптической оси. Это означает, что оно не будет попадать на вторичный отражатель. Поэтому необходимо использовать только часть поверхности, выбираемую из следующих предпосылок. Если солнечный луч падает в точку $A(x_1; y_1)$, а угол наклона нормали к оси, перпендикулярной оптической, обозначить β , то угол наклона отраженного луча к той же оси $2 \cdot \beta - 90^\circ$, причем он должен быть меньше или равен нулю, чтобы не поменялся знак угла и отраженный луч был направлен вверх, а не вниз (отражение от поверхности с большим радиусом было однократным). Запишем условие в виде неравенства:

$$2 \cdot \beta - 90^\circ = 2 \cdot \arctg \left(\frac{\sqrt{R^2 - x_1^2}}{x_1} \right) - 90^\circ \leq 0. \quad (2)$$

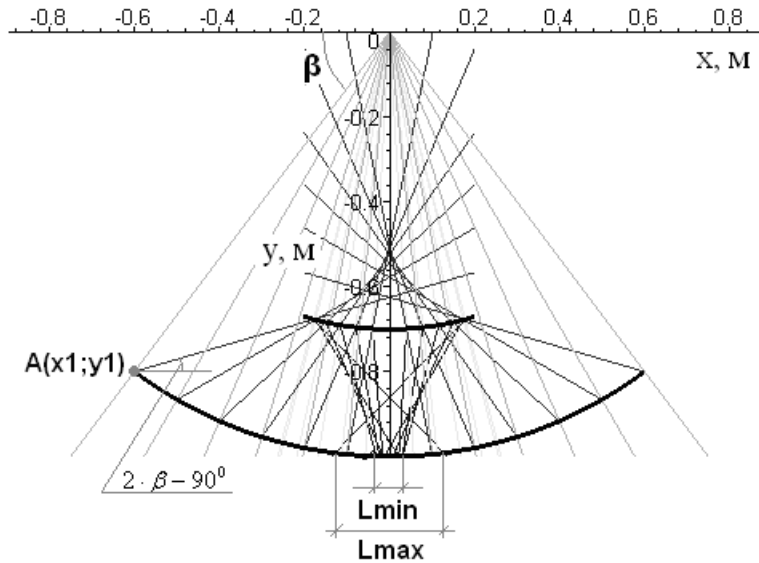


Рис. 2. Солнечная концентрирующая установка с двумя цилиндрическими отражателями
 Fig. 2. Sun concentrating setting with two cylindrical reflectors

Результатом решения (2) будет:

$$x_1 \leq \frac{R}{\sqrt{2}}. \quad (3)$$

На основании вышесказанного и выражения (3) можно заключить следующее.

Утверждение: вторичный цилиндрический отражатель солнечной концентрирующей установки должен располагаться таким образом, чтобы его нижняя точка совпала с точкой с координатами $(0; \frac{R}{\sqrt{2}})$, а радиус кривизны окружности был равен $\frac{R}{\sqrt{2}}$ для случая, когда центры кривизны первичного и вторичного отражателей совпадают.

Основным параметром, характеризующим эффективность работы концентрирующей установки, является коэффициент концентрации K . Концентратор обладает большой входной площадью апертуры A_a и малой выходной A_m . Геометрическое соотношение сбора определяется выражением [16]:

$$K = \frac{A_a}{A_m}. \quad (4)$$

Если длина приемника и отражателей цилиндрической формы совпадает, то формула (4) может быть записана через ширину входной апертуры и приемника.

В качестве доказательства вышеприведенного утверждения найдем коэффициент концентрации K при $h = 0,3 \text{ м}$ ($R = 1 \text{ м}, r = 0,7 \text{ м}$) и нескольких других значениях меньше или больше данного,

равного $h = R - \frac{R}{\sqrt{2}}$ (согласно формуле (1)).

Ширину приемника обозначим L . Будем рассматривать два случая: когда используется первичный отражатель, задаваемый дугой с координатами x крайних точек $-0,6 \text{ м}$ и $0,6 \text{ м}$, и когда координаты x крайних точек $-0,5 \text{ м}$ и $0,5 \text{ м}$. Из рис. 2 видно, что в первом случае ширина приемника больше (обозначим L_{\max}), а во втором – меньше (L_{\min}). На рис. 3 показан результат сравнения. При меньшей апертуре первичного отражателя можно получить большее значение коэффициента концентрации. Это обусловлено рассеиванием лучей после двухкратного отражения. Максимальное значение при $h=0,3 \text{ м}$ будет составлять порядка 9,7. При $h=0,28 \text{ м}$ для L_{\max} рассеивание настолько значительное, что K на графике не указано.

Возможно проследить еще одну зависимость, когда точка пересечения вторичного приемника с осью симметрии остается неизменной, а его радиус кривизны принимает различные значения вследствие изменения положения центра кривизны. На рис. 4 показан результат такого моделирования. При использовании части апертуры первичного отражателя, ограниченной координатами x от $-0,5 \text{ м}$ до $0,5 \text{ м}$, коэффициент концентрации увеличивается по мере уменьшения радиуса кривизны вторичного отражателя. Для максимально возможной апертуры – наоборот.

Технология получения сферы и цилиндрической поверхности проще технологии получения, например, параболоида и параболоцилиндрической поверхности, поэтому достаточно часто применяется первый вариант, хотя с точки зрения фокусировки он дает более размытое

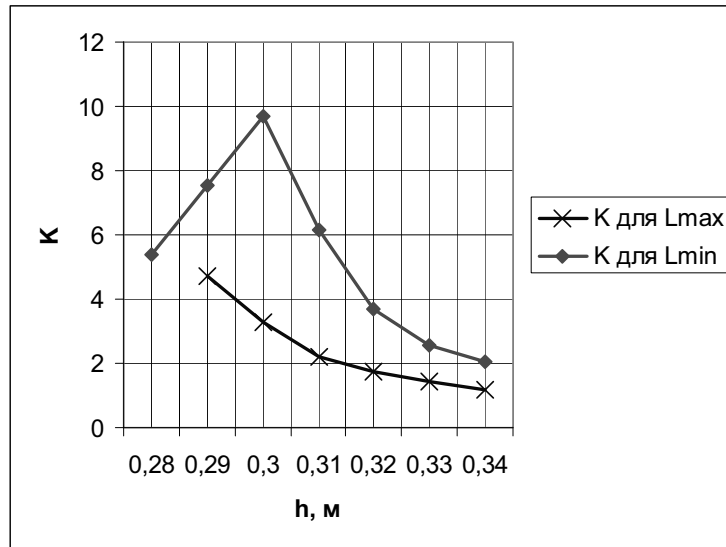


Рис. 3. Изменение коэффициента концентрации при перемещении вторичного отражателя
 Fig. 3. Change of coefficient a concentration K at moving of the second reflector

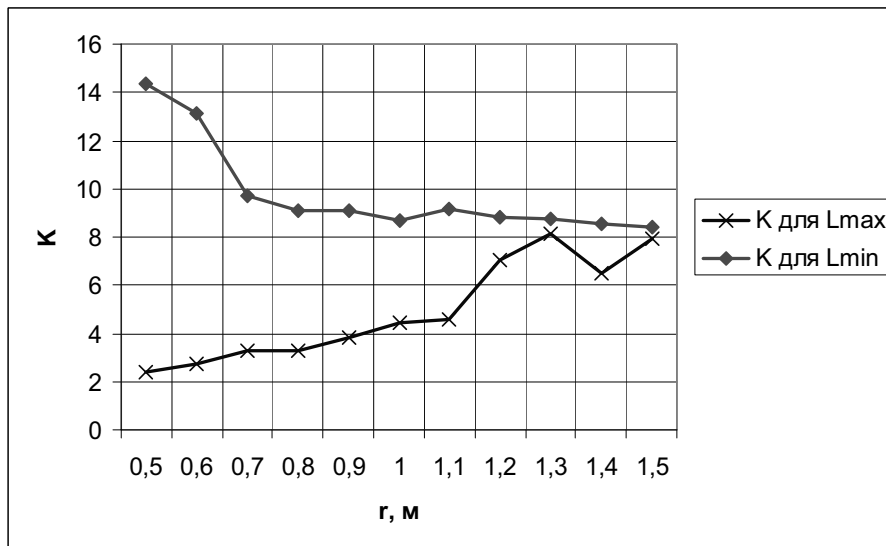


Рис. 4. Зависимость коэффициента концентрации K от изменения радиуса кривизны вторичного отражателя
 Fig. 4. Dependence of coefficient of the concentration K from the change of radius of curvature of the second reflector

фокальное изображение вследствие аберраций, что снижает достижимую максимальную температуру. Однако на практике этим недостатком в большинстве случаев можно пренебречь [11].

Поэтому рассмотрим также солнечную концентрирующую установку с цилиндрическими отражателями с сечениями в виде части эллипса (рис. 5). При построениях первичного отражателя задаются следующие параметры: a – расстояние от вершины эллипса до центра координат вдоль оси абсцисс; b – расстояние от вершины эллипса до центра координат вдоль оси ординат.

Величины a и b приняты соответственно 1,3 м и 1 м (рис. 5, а) и наоборот (рис. 5, б).

Вторичный отражатель аналогично построениям для цилиндрических поверхностей

ограничен точками с координатами x -0,2 м и 0,2 м, для него расстояние от вершины эллипса до центра координат вдоль оси абсцисс и вдоль оси ординат примем:

$$a' = a - h', \quad (5)$$

$$b' = b - h', \quad (6)$$

где h' – некоторое положительное число, определяемое исходя из заданной ширины вторичного отражателя (0,4 м).

Из рис. 5 можно увидеть, что для второго рассматриваемого случая (рис. 5, б) рассеивание солнечных лучей после вторичного отражения будет более значительным. Причем такое же свойство наблюдается и при других значениях a и b , когда

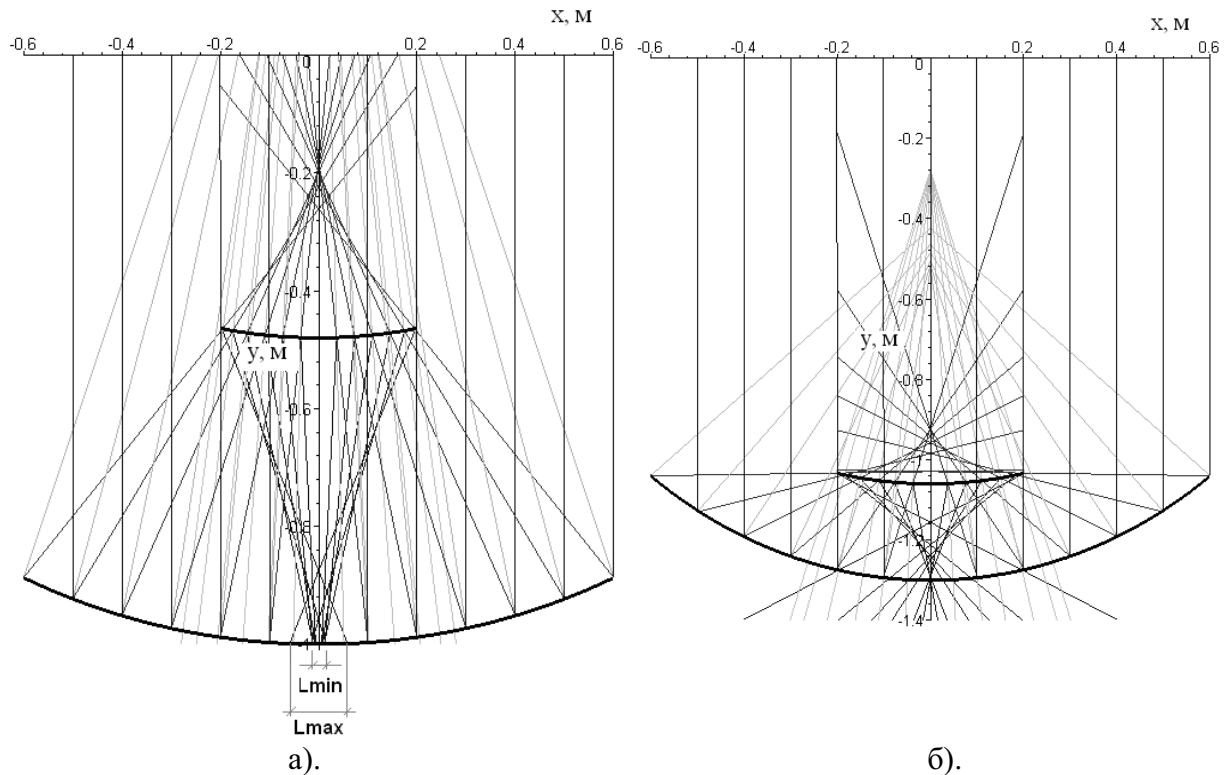


Рис. 5. Солнечная концентрирующая установка с двумя цилиндрическими отражателями с сечениями в виде части эллипса: а). при $a > b$; б). при $a < b$

Fig. 5. Sun concentrating setting with two cylindrical reflectors with sections as part of ellipse: a). at $a > b$; б). at $a < b$

$a < b$. Поэтому далее будем исследовать первый случай (рис. 5, а).

На рис. 6 показан график зависимости коэффициента концентрации K от радиуса кривизны первичного отражателя, когда b остается неизменным, a меняется от 1 м до 1,4 м, а параметры a' и b' определяются по выражениям (5) и (6). Можно заметить, что для каждого конкретного случая коэффициент концентрации необходимо вычислять индивидуально, так как для максимально возможной ширины приемника L_{\max} значения неоднозначно колеблются от 3,74 до 8,24, а для минимально возможной L_{\min} наблюдаются более значительные колебания от 5,88 до 19,2.

На рис. 7 показана зависимость коэффициента концентрации K от параметров вторичного отражателя, когда h' увеличивается на одну и ту же величину (0,1 м). При этом центр кривизны вторичного отражателя перемещается вдоль оси ординат, а координата y нижней точки остается неизменной (-0,48 м). При $a' = 0,78$ м и $b' = 0,48$ м центры кривизны первичного и вторичного отражателей совпадают. Данный случай соответствует максимально достижимым значениям коэффициента концентрации. При смещении центра кривизны в отрицательном направлении (a' и b' уменьшаются) коэффициент концентрации K

незначительно понижается. При смещении в положительном направлении (a' и b' увеличиваются) происходит более значительное уменьшение K .

Если сравнивать параметры концентрирующих установок с цилиндрическими отражателями и отражателями с сечением в виде части эллипса, то второй вариант будет более эффективным.

Рассмотренные выше конструкции могут быть использованы как для получения тепловой энергии, так и электрической. При выработке электрической энергии в качестве приемника используется солнечная батарея, состоящая из некоторого количества последовательно и/или параллельно соединенных фотоэлементов.

Фотоэлементы представляют собой полупроводниковые устройства, преобразующие солнечный свет непосредственно в электричество [16]. Технология их производства чаще всего основана на кремнии. Но может использоваться также арсенид галлия, сульфид кадмия и др. Изготавливаются они обычно с небольшой добавкой других веществ. Фотоэлементы состоят из нескольких слоев полупроводниковых материалов, имеющих различные электронные свойства. Одним из факторов, который необходимо учесть при проектировании установок с фотоэлементами является разная интенсивность падающего солнечного излучения в течение суток. Оптимизация работы системы электроснабжения и нагрузки в этом случае описана в работе [7].

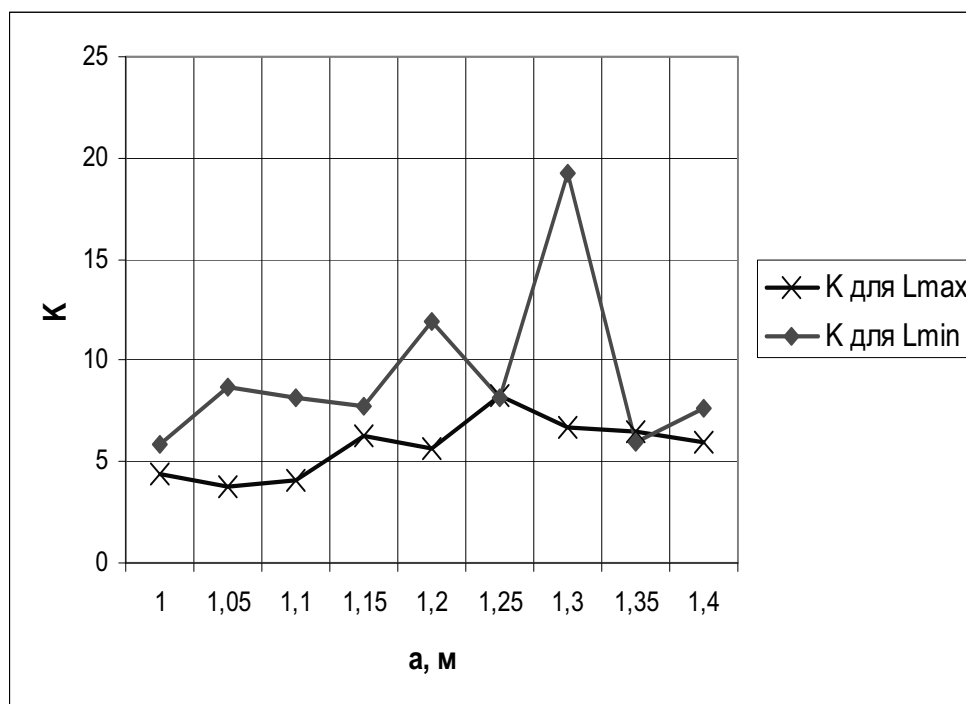


Рис. 6. Зависимость коэффициента концентрации K от радиуса кривизны первичного отражателя
 Fig. 6. Dependence of coefficient of the concentration K from the radius of curvature of primary reflectors

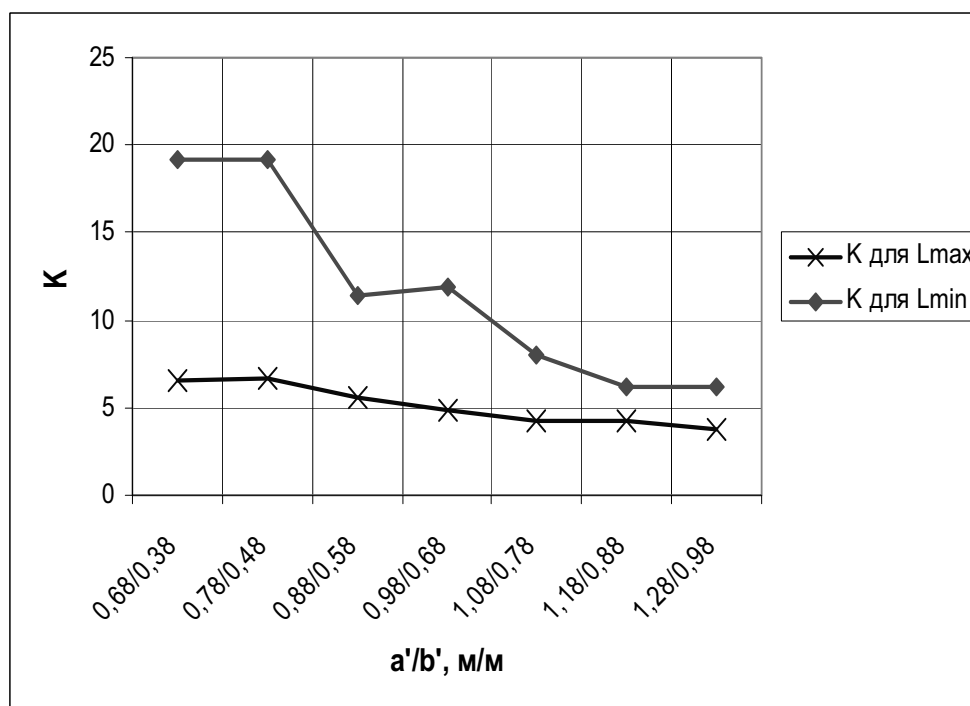


Рис. 7. Зависимость коэффициента концентрации K от параметров вторичного отражателя
 Fig. 7. Dependence of coefficient of the concentration K from the parameters of the second reflector

Известно, что для эффективной работы фотоэлементов необходимо поддерживать температуру менее 100°C [4]. В работе [2] показано, что применение двух отражателей может способствовать поддержанию температурного режима.

В случае применения концентрирующих установок еще одним фактором, требующим внимание, является значительная неравномерность освещения фотоэлементов солнечной батареи. Если фотоэлементы соединены между собой последовательно,

то происходит снижение выходной мощности и увеличение внутренних потерь энергии для слабо освещенного фотоэлемента, так как он не может пропустить ток больший, чем вырабатывает сам. Следовательно, при применении солнечной батареи в качестве приемника необходимо знать распределение плотности сконцентрированного потока или обеспечить его равномерность, как предложено в работах [8, 9, 10]. Это позволит подобрать размеры, расположение и соединение отдельных фотоэлементов таким образом, чтобы обеспечить большую эффективность и надежность использования. На рис. 8 показаны графики

зависимости коэффициента концентрации K от координаты x для сконцентрированного потока солнечного излучения. Они показывают, что при изготовлении вторичных отражателей с сечением в виде части эллипса наблюдается большая неравномерность распределения энергии.

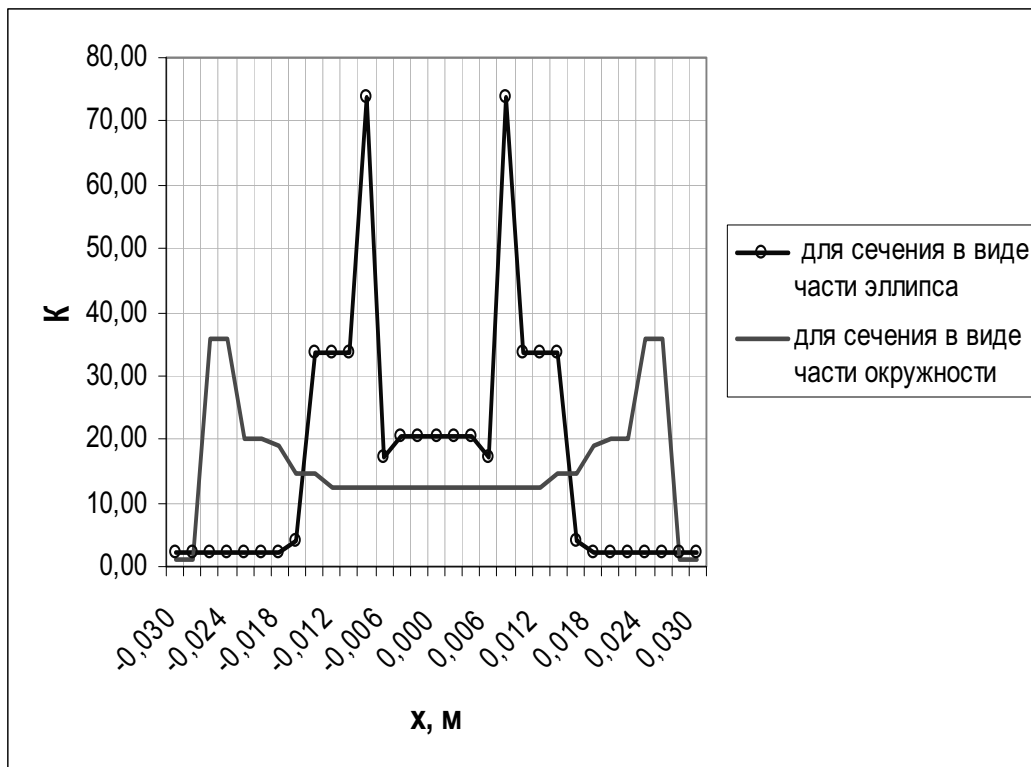


Рис. 8. Распределение сконцентрированного потока солнечного излучения по приемнику
 Fig. 8. Distributing of the concentrated stream of sun radiation on a receiver

ВЫВОДЫ

Проведено исследование солнечных концентрирующих установок с двумя отражателями. Показаны условия выбора расположения и формы вторичных отражателей для обеспечения максимальных значений коэффициента концентрации. При этом применение отражающих поверхностей с сечениями в виде части эллипса обеспечит больший коэффициент концентрации по сравнению с цилиндрическими поверхностями с сечением в виде части окружности, но неравномерность распределения энергии также увеличится. Поэтому необходимо подобрать размеры, расположение и соединение отдельных фотоэлементов для обеспечения их эффективной работы, если в качестве приемников используются солнечные батареи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dvoretzky A., 2008. Increasing energy effectiveness of individual house with use of solar energy. MOTROL, Lublin. – Vol. 10A. – 25-30.
2. Horne S., Conley G., Gordon Dr. J., Fork Dr. D., Meada P., Schrader E., Zimmermann T., 2006. A solid 500 sun compound concentrator pv design. IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Volse 1 and 2. – 694-697.
3. Koshel R. J., 2013. Illumination engineering: design with nonimaging optics. Institute of Electrical and Electronics Engineers. – 302.
4. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д., 1989. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. – Л.: Наука. – 310.
5. Аннабердыев Э., 1988. Геометрические модели САПР оптических систем солнечных энергетических установок: дис. на соискание науч. степени доктора. тех. наук: спец. 05.14.08 «Преобразование возобновляемых и нетрадиционных видов энергии», 05.01.01. «Начертательная геометрия и инженерная графика». – Ашхабад. – 283.
6. Баланчевадзе В.И., Барановский А.М., Блинкин В.Л. и др., 1990. Энергия сегодня и завтра. – М.: Энергоатомиздат. – 344.
7. Бекиров Э., Стрижаков К., 2012. Оптимизация режимов распределения нагрузки в совмещенной системе с возобновляемыми источниками энергии. MOTROL. – Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. – Vol. 14, №1. – 149-153.
8. Воскресенская С.Н., 2006. Моделирование приемника концентратора с фотоэлементами при равномерном распределении энергии солнца. Відновлювальна енергетика XXI століття. – АР Крим, Миколаївка. – 96-99.
9. Воскресенская С.Н., 2007. Геометрическое моделирование дискретного концентратора с равномерным распределением энергии на плоском

приемнике. Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Випуск 4. Прикладна геометрія та інженерна графіка. Том 35. – Мелітополь. – 136-143.

10. Воскресенская С.Н., 2011. Моделирование дискретного приемника – фотобатареи в потоке преломленных линзой лучей. Технічна естетика і дизайн: Міжвідомчий науково-технічний збірник. Випуск 8. Відп. редактор М.І. Яковлев. – К.: Віпол. – 69-74.
11. Грищенко Ю.И., 1987. Активные оптико-механические и структурно-фазовые поверхности гелиоустройств. – Киев: Наук. думка. – 168.
12. Дворецкий А., Казьмина А., 2009. Пассивные и активные солнечные установки в индивидуальном доме. – MOTROL, Simferopol – Lublin. – Vol. 11A. – 146-151.
13. Захидов Р.А., 1986. Зеркальные системы концентрации лучистой энергии. – Ташкент.: Издательство «Фан» УзССР. – 196.
14. Кильчицька С.С., 1990. Відновлювальні джерела енергії. – К.: Т-во «Знання» УРСР. – 48.
15. Пат. 2191329 Российская Федерация, МПК F24J2/14. Солнечный модуль с концентратором/ Безруких П.П., Беленов А.Т., Кивалов С.Н., Поляков В.И., Стребков Д.С., Тверьянович Э.В.; заявитель и патентообладатель Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства; опубл. 20.02.2001 г.
16. Раушенбах Г., 1983. Справочник по проектированию солнечных батарей: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат. – 360.
17. Шадрин В.И., 2009. Автономные солнечные энергетические установки с концентраторами солнечного излучения. Лазерно-оптические системы и технологии, ФГУП "НПО АСТРОФИЗИКА", М. – 89-94.

CONCENTRATING OPTIONS WITH TWO CYLINDRICAL REFLECTORS

Annotation. Dependence of coefficient of concentration from the form of the second cylindrical reflector and his position is investigational in relation to primary. Recommendation is given on placing for providing maximal out parameter. Distributing of sun energy is considered on the surface of receiver, because it matters very much for application jointly with a sun battery at making of electric energy.

Key words: concentrating setting, primary reflector, second reflector