

УДК 621.314.1-621.314.26

Э.А.Бекиров, докт.техн.наук, С.Н.Воскресенская (Национальная Академия природоохранного и курортного строительства, Симферополь)

Разработка графо-аналитических моделей концентрирующих солнечных установок с генерацией энергии двухсторонними фотоэлементами

Представлена графо-аналитическая модель концентрирующей солнечной установки, направляющей излучение на двухсторонние фотоэлементы, используемые в качестве приемников. Также приведены формулы для расчета моделей и проведен их анализ.

Наведено графо-аналітичну модель концентруючої сонячної установки, яка направляє випромінювання на двосторонні фотоперетворювачі, що використовуються у якості приймачів. Також наведені формули для розрахунку моделей та проведено їх аналіз.

Постановка проблемы. Солнечная энергия достигает атмосферы в виде направленного потока солнечного космического излучения. На поверхности Земли регистрируется как прямой поток, так и рассеянное атмосферой излучение. На практике прямые лучи от диффузной составляющей отличаются тем, что направленный поток может быть сфокусирован. Даже в ясный день имеется некоторое количество рассеянного излучения. Отношение интенсивности направленного потока к полной интенсивности излучения меняется от 0,9 в ясный день до нуля в очень пасмурный день.

Концентрирующая солнечная установка состоит из приемника, поглощающего излучение и преобразующего его в какой-либо другой вид энергии, и концентратора, который представляет собой оптическую систему, направляющую поток излучения на приемник. В качестве концентраторов могут использоваться как отражающие, так и преломляющие устройства (линзы). Обычно концентратор требуется непрерывно поворачивать, чтобы он во время работы был обращен к Солнцу. Если слежение осуществляется в одном направлении, то ось располагают с запада на восток.

Апертура системы A_a есть площадь поверхности концентратора, обращенной к потоку излучения. Определим коэффициент концентрации K как отношение апертуры к площади поверхности приемника [1]:

$$K = \frac{A_a}{A_r} \quad (1)$$

Данное значение не будет учитывать оптические свойства отражающего и/или преломляющего устройства, а также приемника. Такой коэффициент концентрации называют геометрическим, так как он не отображает реальных потерь при передаче энергии. Также величина K может быть найдена путем деления плотности потока излучения на приемнике на плотность потока на концентраторе. На практике плотность потока на приемниках для большинства видов установок сильно меняется. Неравномерность распределения энергии не имеет значения при получении тепла или электричества с использованием турбогенераторов. Но возможен и еще один вариант, когда в качестве приемника используются фотоэлементы. Их преимуществом будет являться отсутствие каких-либо движущихся частей, экологическая безопасность, малые габариты.

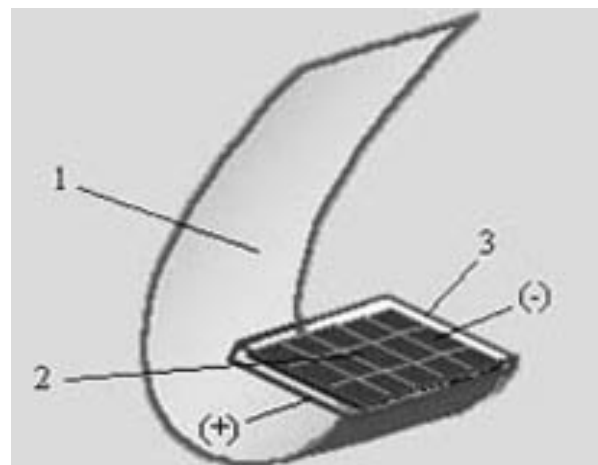
Фотоэлементами или солнечными элементами называются устройства на полупроводниковых переходах. Они сами являются источниками ЭДС и генерируют электрический ток в прямой зависимости от суточных, сезонных и случайных изменений облученности. Так как их габариты достаточно малы, то в качестве приемника применяются солнечные батареи, состоящие из последовательно и параллельно соединенных фотоэлементов. Эффективность использования солнечной энергии в концентрирующих установках

будет зависеть не только от КПД отдельно взятых фотоэлементов и согласованности динамической нагрузки во внешней цепи, но и от равномерности распределения солнечного излучения по поверхности батареи. Это обусловлено тем, что элемент, на который попадет меньшее количество солнечных лучей, будет работать в режиме диода с прямым или обратным смещением. Вследствие этого он может перегреваться и быстрее выйдет из строя. Кроме того, протекающий через него ток не может быть больше, чем вырабатывается им самим. Это будет ограничивать мощность солнечной батареи в целом.

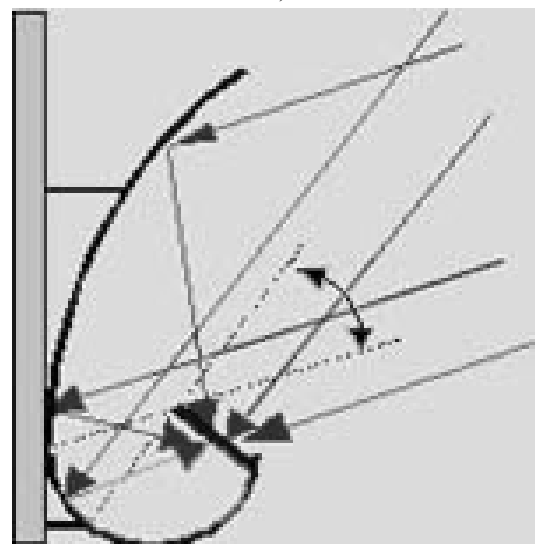
Технологически более просто изготавливать плоские фотоэлементы. Причем они могут быть односторонними, когда на лицевую сторону нанесена контактная сетка, а тыльный контакт является сплошным, и двухсторонними, когда с обеих сторон наносится сетка, занимающая малую часть всей площади. Двухсторонние соответственно позволят получить большие значения коэффициентов концентрации. На рис. 1А приведен пример подобной концентрирующей установки с асимметричным параболоцилиндрическим концентратором, разработанной в ГНУ ВИЭСХ, где 1 – отражатель; 2 – двухсторонние фотоэлементы; 3 – солнечный модуль из скоммутированных фотоэлементов в стеклопакете, заполненном специальной жидкостью. Солнечный модуль с асимметричным параболоцилиндрическим концентратором для размещения на фасадах с углом раскрытия отражателя ± 12 угл. град. и геометрическим коэффициентом концентрации $K_{geom} = 7,785$ вертикально крепится к ориентированной на юг стене здания. На рис. 1Б – схема прохождения солнечных лучей и апертурный угол. Недостатком подобной модели является неравномерность распределения отраженного потока.

Для обеспечения равномерности при отражении солнечных лучей лучше использовать плоские зеркала (рис. 2А). При преломлении лучей используются линзы Френеля, состоящие не из цельного шлифованного куска стекла со сферической или другой поверхностью, как обычные лин-

зы, а из отдельных примыкающих друг к другу концентрических колец небольшой толщины или пластин, которые в сечении имеют форму призм специального профиля. Сечения колец у линзы строятся таким образом, что сферическая aberrация линзы Френеля невелика, лучи от точечного источника, помещенного в фокусе линзы, после преломления в кольцах выходят практически параллельным пучком (в кольцевых линзах Френеля). Такую же форму имеют и зеркала Френеля (рис. 2Б). Схемы, представленные на рис. 2, обеспечивают двухстороннее облучение за счет падающих на одну сторону лучей и отраженных на другую. Они могут быть односекционными и многосекционными.



А)



Б)

Рис. 1. Концентрирующая установка с асимметричным параболоцилиндрическим концентратором и двухсторонними фотоэлементами.

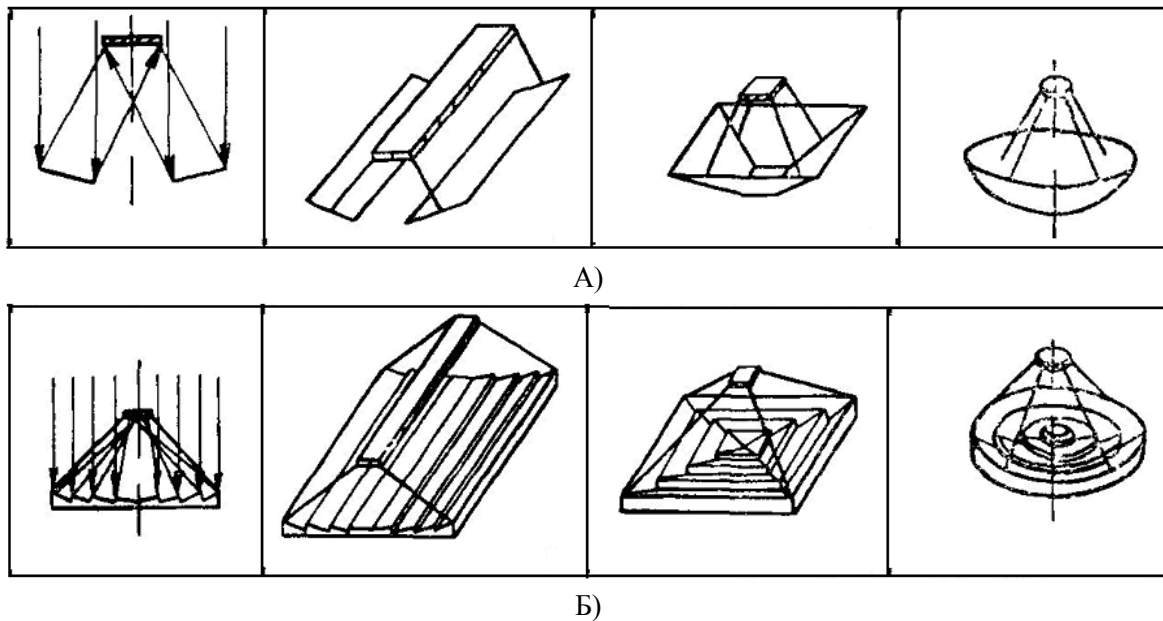


Рис. 2. Схемы существующих концентрирующих установок с плоским приемником и равномерным распределением энергии на двух его сторонах.

Для первой слева схемы на рис. 2А с двумя и четырьмя отражателями, согласно [2] являющейся слабоконцентрирующей, $K = 1,5-3$ при углах наклона отражателей $15-20^\circ$. Если facets располагаются вдоль одной линии (рис. 2Б), то коэффициент концентрации может достичь 8-10.

Цель работы. С целью усовершенствования существующих конструкций предложены графо-аналитические модели концентрирующих установок с концентрацией солнечного излучения на обе стороны двухсторонних фотоэлементов (с двумя поясами концентраторов). Соответственно возможны варианты:

1. Отличие по величине коэффициента концентрации нижнего и верхнего пояса:
 - с бóльшим по величине коэффициентом концентрации нижнего пояса;
 - с бóльшим по величине коэффициентом концентрации верхнего пояса.
2. Отличие по механизму собирания лучей на приемнике концентратором верхнего пояса:
 - с отражением лучей;
 - с преломлением лучей.
3. Отличие по расположению пояса концентрации по отношению к приемнику:
 - с нижним поясом концентрации ближе к приемнику, по сравнению с верхним;
 - с верхним поясом концентрации ближе к приемнику, по сравнению с нижним.

Первый случай пункта 1 осуществляется в основном при отражении (рис. 3А), а второй – при преломлении лучей (рис. 3Б).

Моделирование на рис. 3А проводится следующим образом. Выбирается ширина приемника и высота h от нижней точки концентратора до приемника. Далее определяются параметры для facets в виде прямоугольных зеркал нижнего пояса концентрации. Принимается, что их длина и длина приемника одинаковы. Угол наклона первой facets равен:

$$\alpha_1 = \frac{\arctg\left(\frac{b}{h}\right)}{2}. \tag{2}$$

Ее ширина и высота соответственно равны:

$$S_i = \frac{b \cdot \cos(2\alpha_i)}{\cos(\alpha_i)}; \tag{3}$$

$$h_i = S_i \cdot \sin(\alpha_i), \tag{4}$$

где i – порядковый номер facets нижнего пояса, считая от оптической оси.

Ширина участка апертуры для одной facets:

$$\delta_i = S_i \cdot \cos(\alpha_i). \tag{5}$$

Для второго, третьего плоского зеркала и т. д. формула (2) имеет вид:

$$\alpha_i = \frac{\arctg\left(\frac{b + \delta_{(i-1)}}{h - h_{(i-1)}}\right)}{2}. \tag{6}$$

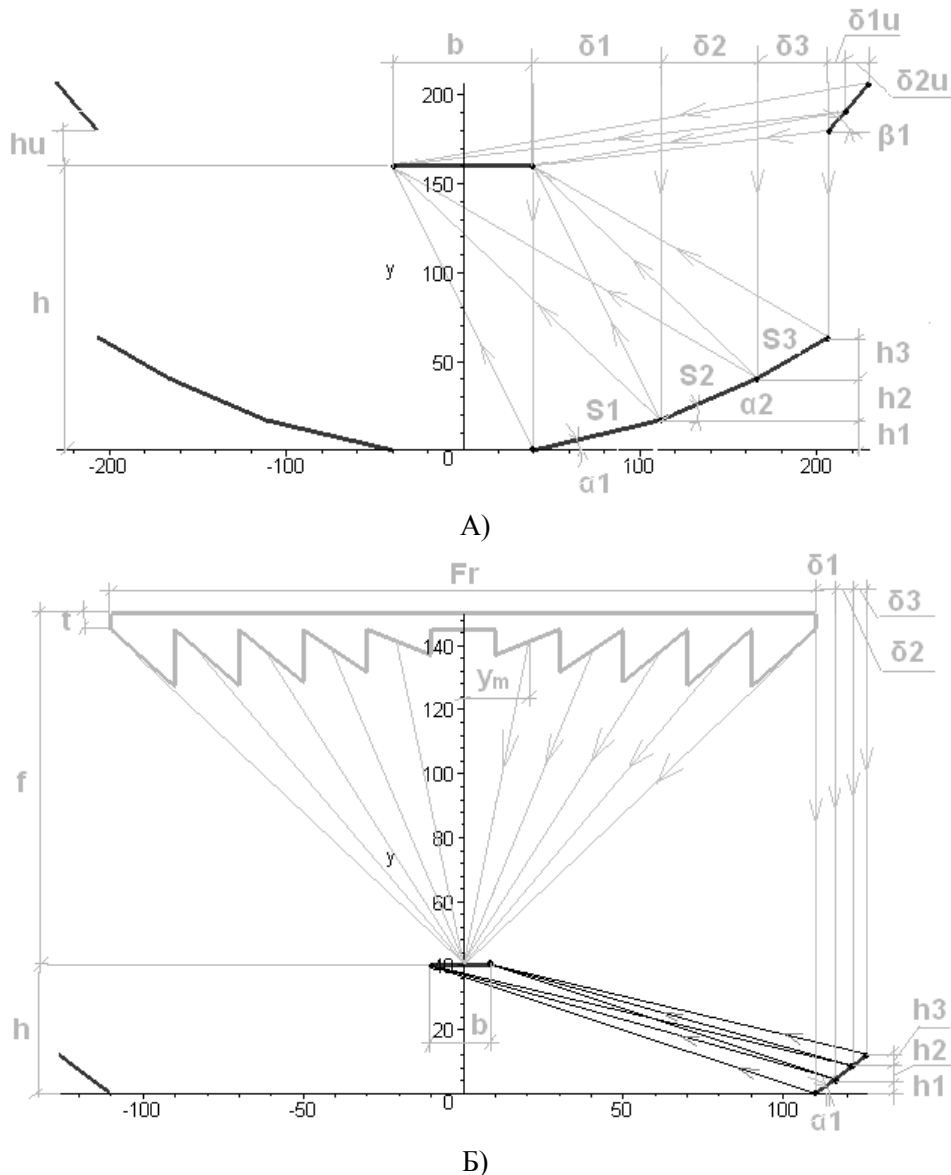


Рис. 3. Установки с концентрацией солнечного излучения на обе стороны двухсторонних фотоэлементов.

Для верхнего пояса концентрации выбирается высота h_u от приемника до его нижней точки. Угол наклона facets находится по формуле:

$$\beta_1 = \frac{\pi - \arctg\left(\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{h_u}\right)}{2}, \quad (7)$$

где n – число facets нижнего пояса.

Ширина первого зеркала определяется по формуле:

$$S_{1u} = 2b \cdot \sin(\beta_1) \cdot \left(\frac{h_u}{\sum_{i=1}^n \delta_i}\right). \quad (8)$$

Высота и ширина участка апертуры для facets соответственно, аналогично формулам (4) и (5), равна:

$$h_{iu} = S_{iu} \cdot \sin(\beta_{iu}); \quad (9)$$

$$\delta_{iu} = S_{iu} \cdot \cos(\beta_{iu}), \quad (10)$$

где iu – порядковый номер facets верхнего пояса, считая от оптической оси.

Для второго, третьего и т. д. плоского зеркала формулы (7) и (8) примут следующий вид:

$$\beta_{iu} = \frac{\pi - \arctg\left(\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i + \sum_{iu=1}^{nu} \delta_{(iu-1)}}{h_u + h_{(iu-1)}}\right)}{2}; \quad (11)$$

$$S_{iu} = 2b \cdot \sin(\beta_i) \cdot \left(\frac{h_u + h_{(iu-1)}}{\sum_{i=1}^n \delta_i + \sum_{iu=1}^{mu} \delta_{(iu-1)}} \right). \quad (12)$$

Коэффициент концентрации нижнего и верхнего пояса, а также общий с учетом симметрии определяется, согласно формуле (1), по соотношениям:

$$K_d = \frac{S_d}{b} = \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^n S_i}{b};$$

$$K_u = \frac{S_u}{b} = \frac{(2 \cdot \sum_{iu=1}^{mu} S_{iu} + b)}{b}; \quad (13)$$

$$K = K_d + K_u,$$

где $S_d = 2 \cdot \sum_{i=1}^n S_i$; $S_u = 2 \cdot \sum_{iu=1}^{mu} S_{iu}$ – ширина отражателей нижнего и верхнего пояса концентрации.

Решение для трех фацет нижнего и двух фацет верхнего пояса было проведено с помощью

програмной оболочки *Maple*. На рис. 3А $b = 80$, $h = 160$, $h_u = 20$ – заданные параметры. Рассчитанные параметры приведены в таблице 1.

Коэффициенты концентрации составили соответственно $K_d = 4,48$, $K_u = 1,89$ и $K = 6,37$. Первое значение превышает второе в 2,37 раз. Можно проследить зависимости коэффициентов концентрации (рис. 4) и углов α_1 и β_1 (рис. 5) от расстояния h от нижней точки установки до приемника.

Из рис. 4 видно, что с увеличением h значения K_d и K нелинейно растут, а K_u убывает. В диапазоне значений абсциссы от 70 до 180 общий коэффициент концентрации меняется от 5,57 до 6,53, то есть, в 1,17 раза. В то же время углы наклона фацет нижнего пояса будут уменьшаться более значительно, чем верхнего (рис. 5). Вследствие небольшого увеличения общего коэффициента концентрации предпочтительнее выбирать значения h немногим больше или меньше ширины приемника b , чтобы уменьшить общую высоту установки. При $h < b$ верхний пояс установки будет работать с большей эффективностью ($K_u > K_d$).

Таблица 1. Рассчитанные параметры концентрирующей установки

Параметр	Фацета нижнего пояса i, №			Фацета верхнего пояса iu, №	
	1	2	3	1	2
Угол наклона	13,29°	23,32°	29,98°	48,41°	49,85°
Ширина фацеты	73,5	59,8	46,2	14,5	21,4
Высота	16,9	23,7	23,1	10,8	16,3
Ширина участка апертуры	71,5	54,9	40,1	9,62	16,3

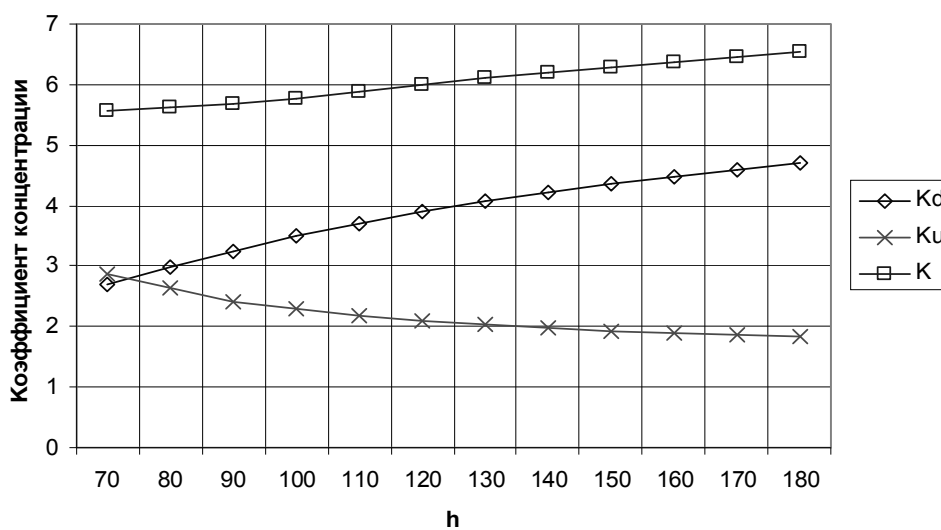


Рис. 4. Зависимость общего коэффициента концентрации K , а также нижнего пояса K_d и верхнего K_u , от высоты расположения плоского двухстороннего приемника.

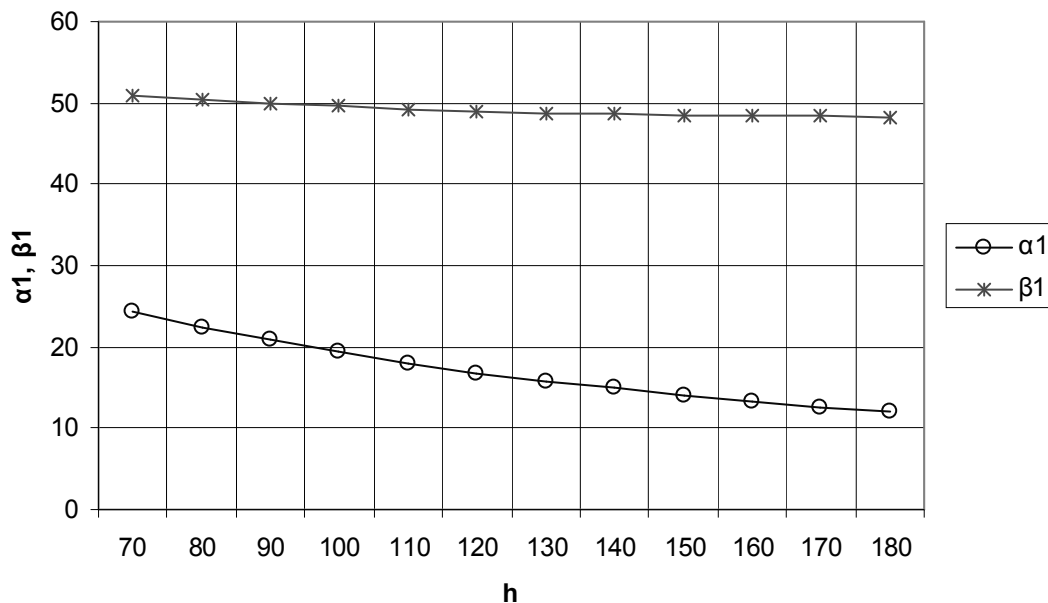


Рис. 5. Зависимость углов наклона первых фацет нижнего α_1 и верхнего β_1 поясов от высоты расположения плоского двухстороннего приемника h .

Можно также проследить зависимость коэффициента концентрации K_u верхнего пояса, ширины h_{sum} и высоты S_{sum} установки от расстояния h_u (рис. 6). При этом $b = 80, h = 160, K_d = 4,48$.

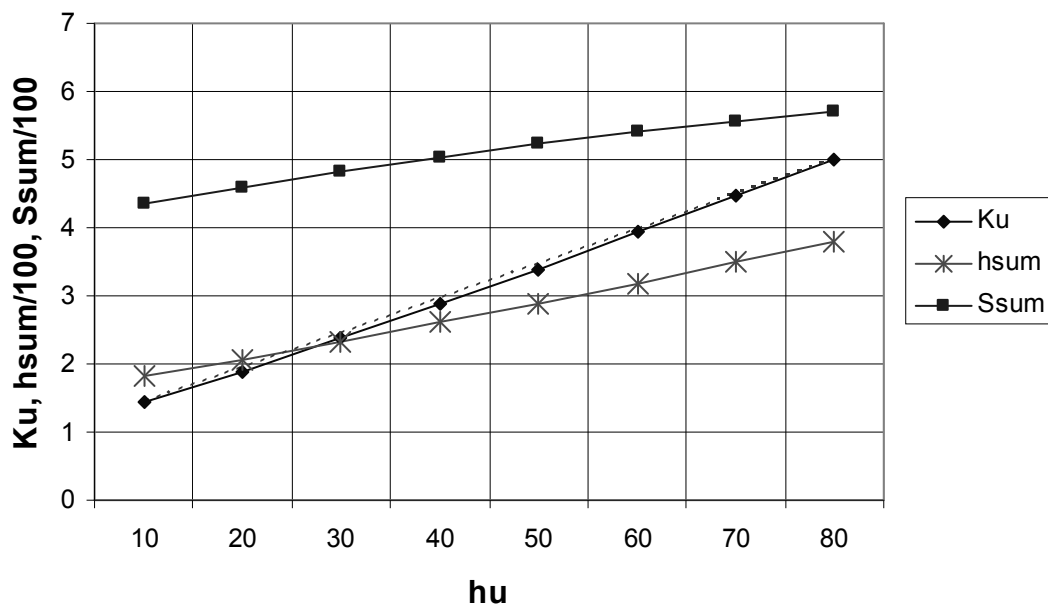


Рис. 6. Зависимость коэффициента концентрации верхнего пояса K_u, h_{sum} и S_{sum} от высоты его расположения h_u относительно плоского двухстороннего приемника.

Чем больше h_u , тем больше K_u , причем зависимость практически близкая к линейной (линия показана пунктиром) с тангенсом угла наклона 0,051. Но растут также и габариты концентрирующей установки: для выбранного диапазона значений h_u высота h_{sum} – в 2,07, а ширина S_{sum} – в 1,31 раза.

Рассмотрим более подробно также модель, предложенную на рис. 3Б. В качестве верхнего пояса концентрации используется линза Френеля, обеспечивающая равномерность распределения

преломленных лучей. Он будет являться основным и обеспечит больший коэффициент концентрации по сравнению с нижним отражающим поясом. Линза Френеля может быть рассчитана, например, по формуле, предложенной в [3] для углов наклона призм θ к плоской пластине:

$$\theta_m = \arctg \left[\frac{y_m}{n \cdot \sqrt{y_m^2 + (f-t)^2} - (f-t)} \right],$$

где y_m – расстояние от оптической оси до центра призмы; f – фокусное расстояние; n – показатель преломления; t – толщина плоской пластины основания линзы; m – номер призмы.

В нашем случае было выбрано, что ширина приемника $b = 20$, $f = 110$, $t = 5$, $y_{m \max} = 100$, ширина линзы $Fr = 220$. Соответственно геометрический коэффициент концентрации при таких параметрах составит 11.

Если для первого рассмотренного случая (рис. 3А) нижний пояс концентрации располагался ближе к приемнику, то в данном случае (рис. 3Б) наоборот. Поэтому формулы для расчета углов нижнего пояса концентрации примут вид, отличный от (2) и (6).

Угол наклона первой факеты равен:

$$\alpha_1 = \frac{\arctg\left(\frac{Fr + \frac{b}{2}}{h}\right)}{2}. \tag{14}$$

Для второй и последующих соответственно:

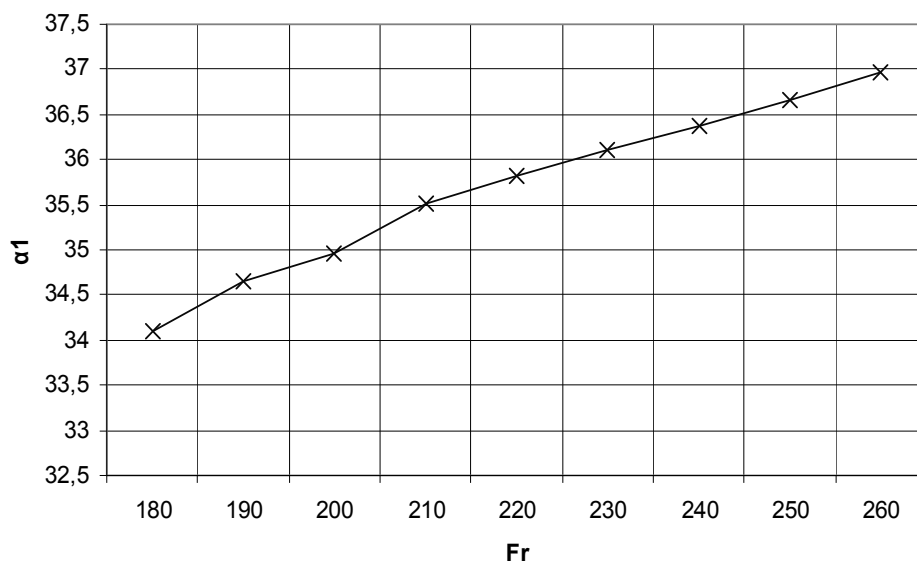
$$\alpha_1 = \frac{\arctg\left(\frac{Fr + \frac{b}{2} + \delta_{(i-1)}}{h - h_{(i-1)}}\right)}{2}. \tag{15}$$

При расчете по вышеназванным параметрам и при $h = 40$ получились значения, приведенные в таблице 2.

Коэффициент концентрации $K_d = 4$, $K = 13,04$. При увеличении параметра h , так же, как и для модели на рис. 3А, K_d будет нелинейно возрастать, а α_1 убывать, что способствует возрастанию ширины установки. Зависимости при изменении ширины верхнего пояса Fr показаны на рис. 7. Чем дальше он располагается от оптической оси, тем больше угол наклона первой факеты и ширина установки S_{sum} . В то же время, коэффициент концентрации нижнего пояса будет незначительно убывать, а верхнего с большей интенсивностью возрастать, так же, как и общий коэффициент K . То есть, в случае попадания преломленных линзой Френеля и отраженных плоскими зеркалами лучей на двухстороннюю солнечную батарею, роль нижнего пояса концентрации будет намного меньше, особенно при больших габаритах линз.

Таблица 2. Рассчитанные параметры нижнего пояса концентрации

Параметр	Факета нижнего пояса i ,		
	№		
	1	2	3
Угол наклона	35,81°	37,16°	38,30°
Ширина факеты	7,77	6,78	5,90
Высота	4,55	4,09	3,66
Ширина участка апертуры	6,31	5,40	4,63



А)

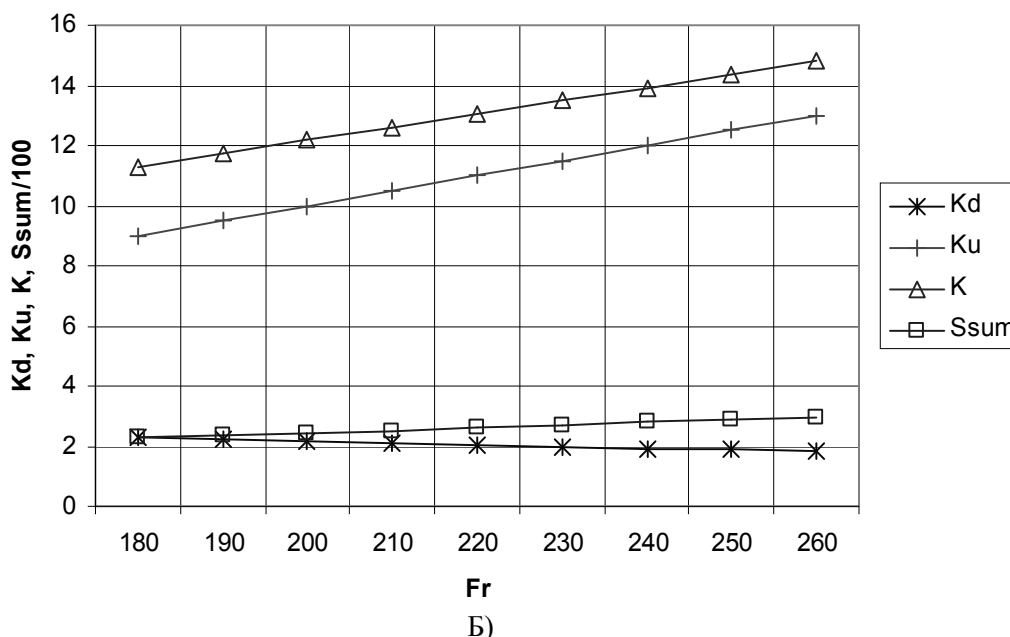


Рис. 7. Зависимость угла наклона первой facets (А), коэффициентов концентрации и ширины установки (Б) от ширины Fr верхнего пояса концентрации.

Аналогичные рассмотренным графо-аналитические модели могут быть созданы и для концентрирующих установок в виде поверхностей вращения. В этом случае приемник примет вид квадрата, а коэффициенты концентрации возрастут более, чем в 2 раза.

Так как известно, что с увеличением температуры КПД солнечной батареи ухудшается, то аналогично предложенным на рис. 1 моделям, необходимо помещать фотоэлементы в стеклопакеты, заполненные охлаждающей жидкостью. При этом плотность потока сконцентрированного излучения уменьшится за счет отражения и поглощения системой охлаждения.

Выводы. Разработаны графо-аналитические

модели концентраторов, направляющих излучение на двухсторонний приемник. Они состоят из двух поясов концентрации, причем могут использовать как эффект отражения, так и преломления. При использовании преломления коэффициент концентрации верхнего пояса будет больше, чем нижнего. Для отражения преимущественно наборот.

1. Твайделл Дж. Возобновляемые источники энергии: пер. с англ. / Твайделл Дж., Уэйр А. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
2. Андреев В.М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения / Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. – Л.: Наука, 1989. – 310 с.
3. Sirohi R.S. Design and analysis of plano-cylindrical Fresnel lens./ R.S. Sirohi // Solar energy. – 1979. – Vol. 45, A. – No. 4. – P. 322–332.