

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДУЛЬНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.**

**Ш. И. КЛЫЧЕВ**, доктор технических наук, профессор  
**С. А. БАХРАМОВ**, доктор технических наук, профессор

**З. И. КЛЫЧЕВ**, инженер

*Ташкентский государственный технический университет,  
г. Ташкент, Узбекистан*

**В. В. ХАРЧЕНКО**, доктор технических наук, профессор  
**ФНАЦ ВИМ, г. Москва, Россия**

*E-mail: kharval@mail.ru*

**Аннотация.** *Эффективность использования солнечного излучения является важным фактором снижения капитальных затрат на создание солнечных станций. Этот параметр существенно зависит от КПД солнечных элементов, совершенствованию которых путем оптимизации конструкции солнечного элемента или модернизации технологии их изготовления посвящено множество публикаций. Настоящая статья посвящена рассмотрению возможности повышения эффективности использования солнечного излучения оптическими методами в солнечных элементах различных конструкций, работающих совместно с концентраторами различного типа.*

**Ключевые слова:** *солнечная энергия, фотоэлектрическое преобразование, линза Френеля, вторичный концентратор, оптическая среда*

**Актуальность.** В последние годы возобновляемые источники энергии, в частности солнечная энергетика, играют все более заметную роль в мировом энергетическом балансе и в формировании новых направлений развития мировой энергетики [1]. Активно развивается автономная энергетика, базирующаяся на ВИЭ, заметно возросли темпы создания солнечных энергетических систем, работающих на сеть. Проводятся работы по изучению функционирования солнечных энергетических установок, работающих параллельно с сетью [2].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Вновь создаваемые солнечные станции СЭС базируются преимущественно на плоских солнечных фотоэлектрических панелях. Вместе с тем проводятся работы по созданию новых фотоэлектрических устройств, работающих с концентраторами, а также исследования по изысканию возможностей повышения эффективности модульных солнечных фотоэлектрических установок с применением модернизированных оптических систем [3].

Интенсивно ведутся работы по разработке солнечных фотоэлектрических модулей, состоящих из микроконцентратора (обычно

линза Френеля (ЛФ)) и каскадного фотоэлемента [4,5]. Ранее предполагалось, что такие модули уже при концентрации солнечного излучения от 200 до 500 могут оказаться экономически рентабельными, однако, сейчас считается, что для этого концентрации должны быть на уровне 800-1000. При этом принято считать, что оптический КПД микроконцентраторов составляет порядка 90 % [4], однако, предварительные оценки показывают, что КПД ЛФ не достигает и 50 %.

Вышеуказанное определяет необходимость более детального анализа энергетических характеристик линз Френеля (ЛФ) – оптический КПД, концентрация, а также распределение концентрированного потока по фотоэлементу и в целом необходимость поиска путей повышения эффективности концентраторов. В [3,6] было показано, что один из путей повышения КПД концентраторов это использование оптических сред.

Цель исследования – определение характеристик ЛФ с точки зрения указанных задач, а также возможностей повышения оптического КПД концентраторов за счет использования оптических сред является целью настоящей работы.

**Материалы и методы исследования.** Рассмотрим характеристики ЛФ. Методы расчета ЛФ рассматривались в [7, 8], в [9] была предложена методика оценки энергетических характеристик ЛФ. При этом в [7] не учитывались неточности оптических поверхностей, а в [9] влияние на КПД распределения концентрированного солнечного потока по поверхности приемника.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Расчетная схема ЛФ и её основные параметры приведены на рис.1, где  $f$  – фокусное расстояние линзы;  $k$  – число поясов или "зубьев" ЛФ;  $Rvk$ ,  $Rnk$  – верхний и нижний габаритные радиусы  $i$ -го зуба;  $U_0$  – угол раскрытия линзы;  $i$  – номер "зуба";  $r_p$  – "расчетный" радиус концентрированного пятна по которому определяются параметры зубьев;  $h_i$  – толщина  $i$ -го зуба;  $L_i$  – длина рабочей грани  $i$ -го зуба.

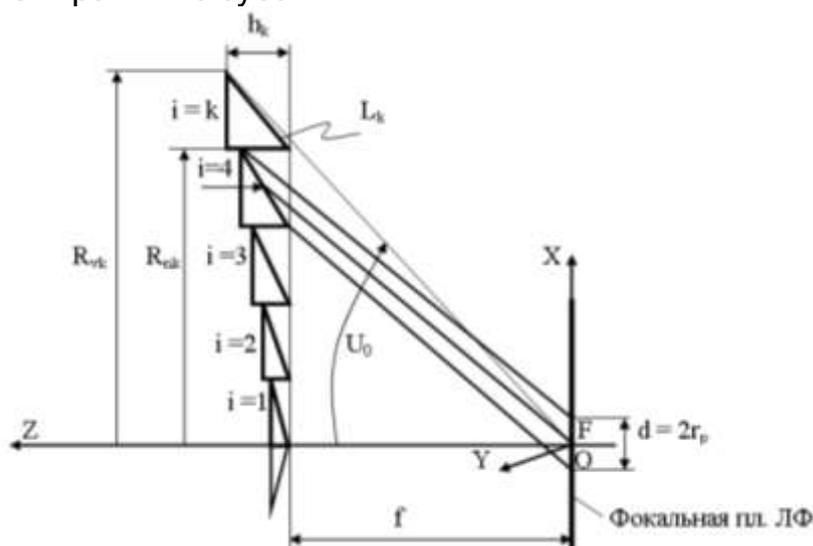
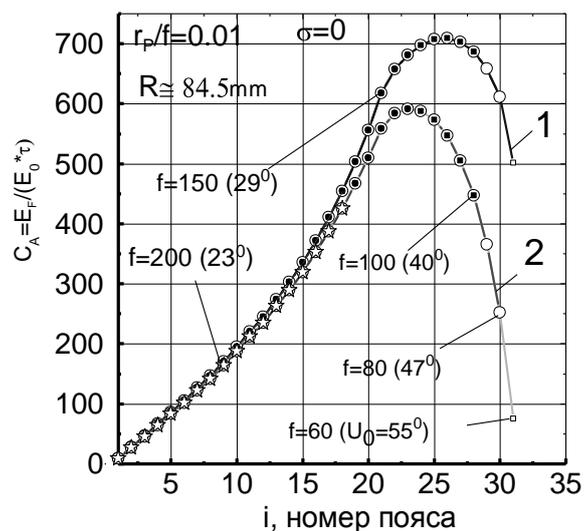


Рис.1. Расчетная схема ЛФ по схеме 1

В общем случае имеем две расчетные схемы ЛФ: первая – вершины зубьев лежат в одной плоскости; вторая – основания зубьев лежат в одной плоскости. Отметим, что по технологичности изготовления и сборки, первая схема имеет преимущества. Это связано с тем, что ЛФ в модуле должна иметь с двух сторон защитные плоские пластинки.

На первом этапе расчета ЛФ определяются предварительные значения  $f$  и габаритного радиуса  $R$  ( $R = Rvk$ ). Обобщенными геометрическими параметрами ЛФ являются угол раскрытия  $U_0$  ( $U_0 = \arctg(R/(f+h_k))$ ) и относительный радиус приемника  $r_p/f$ , а энергетическими характеристиками концентрация  $C_A = E_A/(E_0^* \tau)$  и относительный поток на некоторой площадке радиуса  $r$  или  $F_r/F_0$ , где  $E_A$  – плотность концентрированного потока в точке  $A$  приемника,  $E_C$  – плотность прямого солнечного излучения,  $\tau$  – пропускная способность материала ЛФ и  $F_0$  – поток солнечного излучения, падающий на ЛФ. Влияние  $f$  и  $R$  на концентрации поясов в фокусе точной ЛФ (среднеквадратическая ошибка неточности поверхностей и наклона рабочих граней  $\sigma=0$ ) при  $r_p/f = 0.01$ ,  $R = 84,5$  мм и  $n = 1,4584$  и различных  $f$  приведено на рис.2.

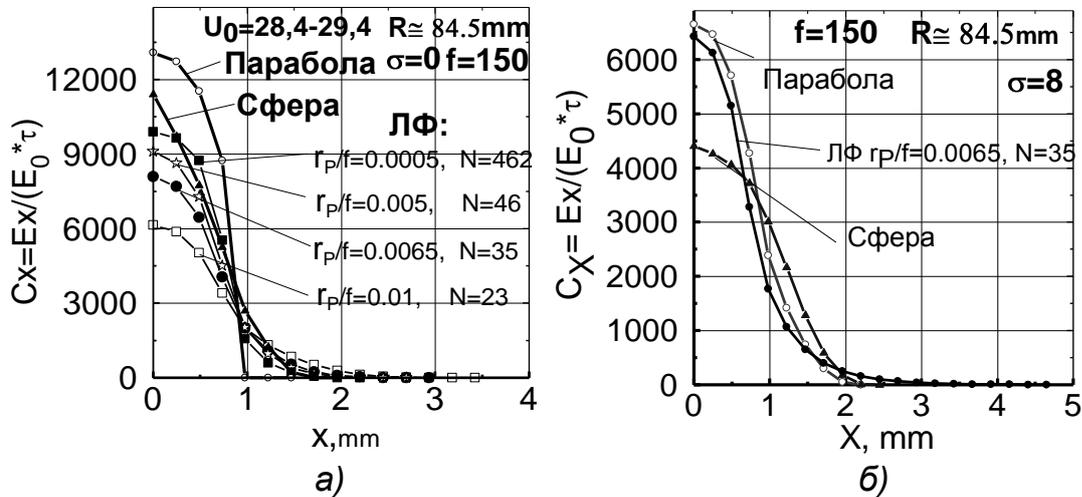


**Рис.2. Концентрации в фокусе ЛФ от отдельных поясов, при различных  $f$ , без учета (1) и с учетом (2) френелевских потерь на отражение**

Из рис. 2 видно, что в ЛФ угол раскрытия должен быть около  $30^\circ$  и для данной  $Rf$  около  $110 \div 150$  мм, а число поясов – порядка 30 (это существенно меньше числа поясов в ЛФ оптического назначения).

Цель второго этапа расчета – окончательный выбор  $f$ ,  $U_0$ , определение допусков на неточности изготовления ЛФ и потока по приемнику. Исходные данные на этом этапе – средняя концентрация на приемнике  $C$ . Основные варьируемые параметры  $r_p/f$  (могут быть разными для разных зубьев), угловые неточности изготовления поверхностей  $\sigma$  и смещение центра пятна пояса (зуба) от фокуса  $rr$  (на рис. 2  $rr = 0$ ).

Концентрации в фокальной плоскости точной (суммарная среднеквадратическая ошибка  $\sigma = 0$ ) и неточной ( $\sigma = 8$ ) при различных  $r_p/f$  приведено на рис. 3. Там же, для сравнения, приведены концентрации параболического и сферического зеркал.



**Рис.3. Концентрации в фокальной плоскости: ЛФ, параболы и сферы, точных (а) и неточных (б)**

Как видно, при  $\sigma = 0$  ЛФ дает меньшие концентрации, однако, для реальных случаев, когда  $\sigma$  порядка 8 угловых минут, концентрации ЛФ уже при  $k = 35$  достаточно близки к концентрациям параболоида и превышают концентрации сферического зеркала.

Влияние на концентрации и потоки в фокальной плоскости угловых неточностей ЛФ ( $\alpha$  – неточность угла наклона рабочей грани в целом,  $\sigma_s$  – местные неточности грани;  $\sigma_b$  – суммарная неточность плоских поверхностей ЛФ и защитных стекол) приведено в табл. 1.

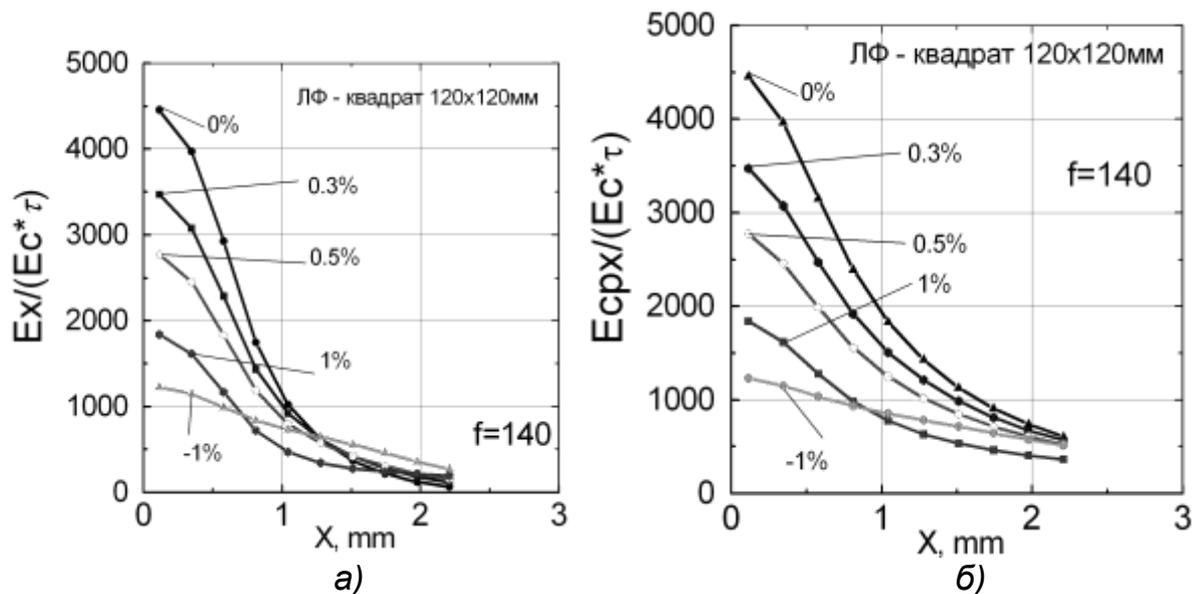
Расчеты потока и концентрации для квадратной в плане ЛФ размерами 120x120мм и  $f = 140$  мм и квадратного приемника проводились для вариантов:

- 1)  $\sigma_s = 0$ ,  $\sigma_b = 0$ ,  $\alpha_r = 0$ , при  $r_p/f = 0.065$ ,  $rr = 0$ ;
- 2)  $\sigma_s = 8'$ ,  $\sigma_b = 6'$ ,  $\alpha_r = -10'$ , при  $r_p/f = 0.065$ ,  $rr = 0$ ;
- 3)  $\sigma_s = 8'$ ,  $\sigma_b = 6'$ ,  $\alpha_r = -10'$ , и варьировании  $r_p/f$ , и  $rr$ .

**1. Средние концентрации  $C_s$  и потоки  $F_s/F_0$  в фокальной плоскости ЛФ с учетом и без учета френелевских потерь на рабочей грани зубьев.**

№ варианта	Приемник, мм	$C_s$ , без фп	$C_s$ , с фп	$F_s/F_0$ , без фп	$F_s/F_0$ , с фп
1	2.79x2.79	1805,9	1696,1	0,976	0,917
	4,65x4,65	666,7	625,8	1,001	0,940
2	2.79x2.79	1523,5	1434,9	0,824	0,776
	4,65x4,65	641,8	602,7	0,964	0,905
3	2.79x2.79	1514,1	1424,6	0,818	0,770
	4,65x4,65	645,2	605,7	0,969	0,909

Как видно, влияние неточностей на поток по приемнику существенно, можно также видеть, что имеется некоторая возможность увеличения потока и концентрации за счет варьирования параметрами зубьев. Для окончательного выбора параметров ЛФ и площади приемника необходимо учесть влияние дисперсии показателя преломления. Возможное влияние дисперсии на концентрацию приведено на рис.4. Как видно, влияние дисперсии существенно и должно учитываться при выборе параметров ЛФ. Дисперсия приводит к тому, что для разных длин волн имеем разные  $f$ , поэтому, в принципе, влияние дисперсии можно несколько уменьшить, за счет выбора оптимального положения приемника и установки перед приемником вторичного зеркального концентратора, например, в виде конуса.



**Рис. 4. Влияние дисперсии на локальные (а) и средние (б) концентрации ЛФ**

По результатам исследования ЛФ можно сделать следующие практические выводы:

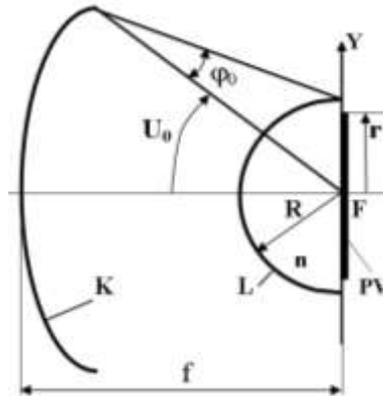
1. Параметр  $rp/f$  в линзе Френеля для большей части поясов можно принять равным 0.0065, для крайних поясов для уменьшения толщины зуба необходимы меньшие значения.

2. В данной ЛФ возможны  $C > 900$  на площади  $2.8 \times 2.8$  мм.

3. Френелевские потери на 5 плоских составят 18,5 %, потери из-за неточностей ЛФ – 14 % т.е. КПД ЛФ, даже без учета дисперсии, составит не более 64 %.

В [3, 10] было предложено решение задачи повышения концентрации – применение вторичных концентраторов, представляющих оптические среды, в которых, как известно, яркость излучения повышается пропорционально квадрату показателя преломления среды. Возможности использования свойств оптической среды для повышения плотности излучения рассматривались в [10]. Были определены условия, при которых этот эффект имеет место.

С целью оценки возможности использования этого эффекта для повышения концентрации в СФЭУ рассмотрим модельную систему, включающую первичный зеркальный параболический концентратор ( $K$ ) и вторичный концентратор, представляющий оптическую среду в виде полусферической линзы ( $L$ ) с центром кривизны, в фокусе  $F$  парабоида приведена на рис.5 ( $PV$  – фотоэлемент).



**Рис. 5. Схема системы «концентратор-линза»**

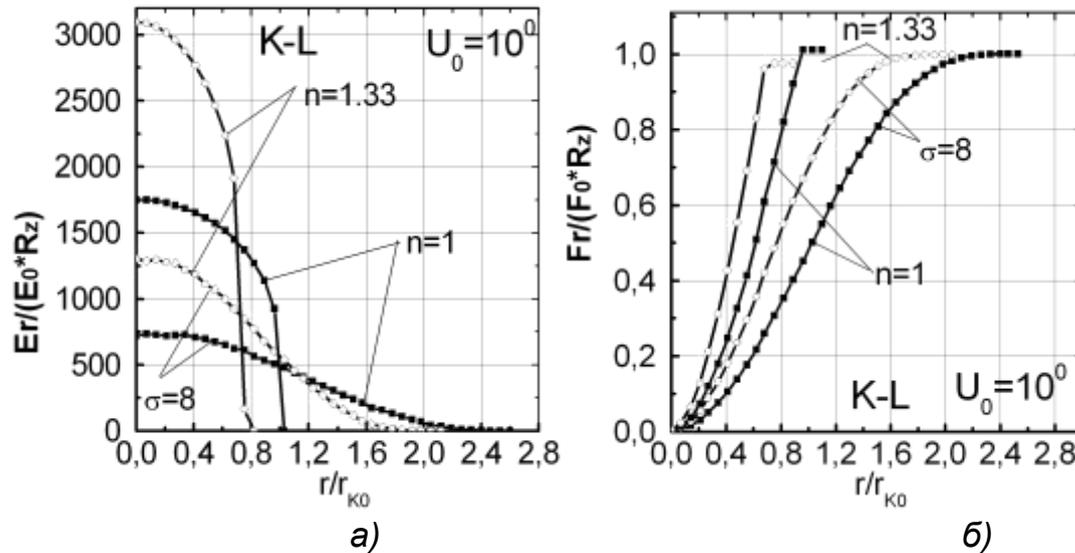
Основными параметрами этой системы  $K$ - $L$  являются:  $\varphi_0$  – угловой радиус диска Солнца,  $n$  – показатель преломления и  $R$  – радиус кривизны линзы (среды),  $U_0$  – угол раскрытия,  $f$  – фокусное расстояние и  $\sigma$  – среднеквадратическая неточность поверхности параболического концентратора.

На рис. 6 приведены концентрации (а) и потоки (б) в фокальной плоскости параболического концентратора на воздухе ( $n = 1$ ) и в системе «концентратор – линза» (среда - дистиллированная вода с  $n = 1,33$ ), без учета френелевских потерь (в данной системе они не превышают 2–3 %). Расчеты проводились в предположении постоянства  $n$ . Как видно из рис.6а, в системе  $K$ - $L$ , по сравнению с параболическим концентратором повышаются плотность потока и соответственно уменьшаются размеры пятна изображения Солнца.

Причем эти эффекты имеют место как для точного, так и неточного концентратора.

Анализ показывает, что указанные эффекты в среде обусловлены двумя факторами. Первый – это оптические свойства линзы, что приводит к уменьшению пятна изображения и второй – это увеличение яркости излучения в среде (пропорционально квадрату показателя преломления среды). Причем как видно (см. рис. 6 б), потоки в исходном пятне и уменьшенном – одинаковы. Доказательством влияния второго фактора является то, что на концентрацию в фокусе оптические свойства линзы не влияют (в фокусе собираются только осевые лучи и т.к. они идут по нормали к сфере, то не преломляются), т.е. увеличение плотности в фокусе связано только с одним фактором – увеличением яркости излучения в среде. Далее по пятну действуют оба фактора.

Полученные результаты имеют практическое значение, т.к. позволяют уменьшить размеры фотоэлемента.



**Рис. 6. Концентрации и потоки в фокальной плоскости концентратора на воздухе (а) и в системе K-L в среде(б) для точного ( $\sigma=0$ ) и неточного ( $\sigma=8$  угловых минут) концентратора**

Так, в рассмотренной системе, когда допустимый поток, перехватываемый фотоэлементом, составляет 95%, уменьшение площади фотоэлемента за счет применения оптической среды (жидкая линза или линза с промежуточным жидким слоем) составит для точного концентратора около 1.8 раза, а для неточного – 1,7 раза. При этом соответственно пропорционально возрастает и средняя по приемнику концентрация. С увеличением  $n$  эти эффекты могут увеличиваться.

**Выводы и перспективы.** Приведенные выше результаты показывают, что использование набора оптических приемов позволяет существенно улучшить характеристики солнечных энергетических систем и повысить их энергетическую эффективность. Их применение наряду с дальнейшим совершенствованием конструкций собственно элементов может оказаться полезным для решения проблемы расширения использования солнечных энергетических систем на практике.

#### Список использованных источников

1. Стребков, Д. С. Роль и место ВИЭ в развитии глобальной энергетики / Д. С. Стребков, В. В. Харченко // Малая энергетика. – 2011. – № 3-4. – С. 3-12.
2. Харченко, В. В. Солнечная электростанция для параллельной работы / В. В. Харченко, В. А. Гусаров, В. А. Майоров, В. А. Панченко // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 02 (119).– С.37-43.
3. Клычев, Ш. И. Оптические среды как способ повышения эффективности концентраторных солнечных фотоэлектрических установок / Ш. И. Клычев, С. А. Бахрамов, В. В. Харченко, З. Ш. Клычев // Гелиотехника. – 2012. – №2.– С.71-73.

4. Masafumi Yamaguchi, A., Tatsuya Takamoto, B., Kenji Araki, C, Nicholas, Ekins-Daukes. A Multi-junction III-V solar cells: current status and future potential // Solar Energy. – 2005. – V.79. – P. 78-85.

5. Андреев, В. М. Перспективы создания космических солнечных батарей с концентраторами излучения и многoperеходными гетероструктурными фотопреобразователями / В. М. Андреев, В. А. Грилихес и др. // Известия АН РФ. Энергетика. – 2003. – С. 60-69.

6. Клычев, Ш. И. Концентрация солнечного излучения в оптической среде / Ш. И. Клычев, С. А. Бахрамов, Ю. А. Дудко // Гелиотехника. – 2009. – №3. – С. 78-81.

7. Ахмедов, Х. Оптико-энергетические характеристики круговых линз Френеля с плоскими поясами / Х. Ахмедов, Р. А. Захидов, Ш. И. Клычев // Гелиотехника. – 1991. – №1. – С. 48-51.

8. Winston, R. Opt- Soc. Am. – 1970. – V.60. – P. 245-247.

9. Клычев, Ш. И. Концентрация солнечного излучения в оптической среде / Ш. И. Клычев, С. А. Бахрамов, Ю. А. Дудко // Гелиотехника. – 2009. – №3. – С. 78-81.

### References

1. Strebkov, D. S., Kharchenko, V. V. (2011). Rol' i mesto VIE v razvitii global'noy energetiki [The role and place of renewable energy in the development of global energy]. Malaya energetika, 3-4, 3-12.

2. Kharchenko, V. V., Gusarov, V. A., Mayorov, V. A., Panchenko, V. A. (2013). Solnechnaya elektrostantsiya dlya parallel'noy raboty [Alternative energy and ecology]. Al'ternativnaya energetika i ekologiya, 2 (119), 37-43.

3. Klychev, Sh. I., Bakhrarov, S. A., Kharchenko, V. V., Klychev, Z. Sh. (2012). Opticheskiye sredy kak sposob povysheniya effektivnosti kontsentratornykh solnechnykh fotoelektricheskikh ustanovok [Optical media as a way to improve the efficiency of concentrator solar photovoltaic systems]. Geliotekhnika, 2, 71-73.

4. Masafumi Yamaguchi, A., Tatsuya Takamoto, B., Kenji Araki, C, Ekins-Daukes, Nicholas (2005). A Multi-junction III-V solar cells: current status and future potential. Solar Energy, 79, 78-85.

5. Andreyev, V. M., ., Grilikhes, V.A. ed. (2003). Perspektivy sozdaniya kosmicheskikh solnechnykh batarey s kontsentratorami izlucheniya i mnogoperexodnymi geterostrukturnymi fotopreobrazovatelyami [Prospects for the creation of space solar batteries with radiation concentrators and multi-transition heterostructural photo-converters]. Izvestiya AN RF. Energetika, 60-69.

6. Klychev, Sh. I., Bakhrarov, S. A., Dudko, Y. A. (2009). Kontsentratsiya solnechnogo izlucheniya v opticheskoy srede [The concentration of solar radiation in an optical medium]. Geliotekhnika, 3, 78-81.

7. Akhmedov, Kh., Zakhidov, R. A., Klychev, Sh. I. (1991). Optiko-energeticheskiye kharakteristiki krugovykh linz Frenelya s ploskimi poyasami [Optical-energy characteristics of circular Fresnel lenses with flat belts] Geliotekhnika, 1, 48-51.

8. Winston, R. (1970). Opt- Soc. Am., 60, 245-247.

9. Klychev, Sh. I., Bakhrarov, S. A., Dudko, Y. A. (2009). Kontsentratsiya solnechnogo izlucheniya v opticheskoy srede [The concentration of solar radiation in an optical medium]. Geliotekhnika, 3, 78-81.

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДУЛЬНИХ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК

Ш. І. Кличов, С. А. Бахрамов, З. І. Кличов, В. В. Харченко

**Анотація.** Ефективність використання сонячного випромінювання є важливим фактором зниження капітальних витрат на створення сонячних станцій. Цей параметр істотно залежить від ККД сонячних елементів, вдосконаленню яких шляхом оптимізації конструкції сонячного елемента або модернізації технології їх виготовлення, присвячено безліч публікацій. Ця стаття присвячена розгляду можливості підвищення ефективності використання сонячного випромінювання оптичними методами в сонячних елементах різних конструкцій, які працюють спільно з концентраторами різного типу.

**Ключові слова:** сонячна енергія, фотоелектричне перетворення, лінза Френеля, вторинний концентратор, оптичне середовище

## INCREASE OF EFFICIENCY OF THE MODULAR SOLAR PHOTOVOLTAIC INSTALLATIONS.

Sh. I. Klychev, S. A. Bahramov, Z. I. Klychev, V. V. Kharchenko

**Annotation.** Efficiency of sunlight use is the important factor of decrease in capital expenses for creation of solar stations. This parameter essentially depends on efficiency of solar cells, to which improvements by optimization of a design of a solar cell or modernization of their manufacturing technology the set of publications is devoted. The present article is devoted consideration of possibility of increase of efficiency of use of solar radiation by optical methods for solar cells working together with concentrators of various type.

**Keywords:** solar energy, photo-electric transformation, a lens of Fresnell, secondary concentrator, optical environment