

## **МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В КОНЦЕНТРИРУЮЩИХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

**Р.Р. ВАРДАНЯН\*, А.Р. КАРАКЕШИШЯН**

Национальный политехнический университет Армении, Ереван, Армения

\*e-mail: ruben.vardanyan@polytechnic.am

(Поступила в редакцию 9 октября 2024 г.)

Технология солнечного концентраторного фотоэлектричества (КФЭ) является одним из перспективных способов повышения эффективности преобразования солнечной энергии. В системах КФЭ поглощаемый фотоприемником (фотоэлектрическим модулем или солнечным элементом) световой поток зависит от отражательной способности поверхности концентратора, которая является функцией от угла падения света. Поглощенный световой поток также зависит от относительного углового пропускания света в фотоэлектрический модуль. В данной работе предлагается уточненный метод определения поглощенного светового потока фотоприемником с помощью понятия эффективной концентрации света. В предлагаемом методе учитываются угловая зависимость коэффициента зеркального отражения света, а также относительного углового пропускания света в фотоэлектрический модуль. В качестве примера рассматриваются две зеркально отражающие КФЭ системы — планарная и V-образная.

### **1. Введение**

Солнечная энергия, краеугольный камень возобновляемой энергетики, сталкивается с проблемами максимальной эффективности. Концентрированные фотоэлектрические (КФЭ) системы, фокусирующие солнечный свет на фотоэлементы меньшего размера, предлагают перспективное решение. Выработанная электрическая энергия в КФЭ системах зависит от угла падения солнечного света [1–5]. Для уменьшения степени отраженного света обычно используются различные антиотражающие покрытия и текстурированные поверхности на стекле и солнечных элементах.

Влияние угла падения света на характеристики фотоэлектрических (ФЭ) модулей, связанное со свойствами относительного углового пропускания света в ФЭ модуль исследовано экспериментально [1–3] и с использованием симулятора PC1D [4]. В солнечных концентраторных системах учитывается угловая зависимость отражательной способности зеркал [6–10].

В настоящей работе предлагается более точный метод определения светового потока, поглощаемого фотоприемником в КФЭ системах путем использования понятия эффективной концентрации света. В предлагаемом методе принимаются во внимание зависимости как коэффициента отражения света концентрирующей поверхности, так и поглощающей способности фотоэлектрического

модуля от угла падения света. В качестве примера анализируются низко-концентрирующие планарные и V-образные зеркально-отражающие фотоэлектрические (ФЭ) системы.

## 2. Эффективная концентрация зеркально-отражающих КФЭ систем

Рассмотрим слабо-концентрирующую планарную зеркально-отражающую КФЭ систему (рис.1а). Прямое солнечное освещение и отраженный свет с числом отражений, равным 1, падают на ФЭ модуль. Диффузное излучение из-за рассеяния неба не рассматривается с учётом незначительной доли в общем потоке излучения. Система концентратора отслеживает солнце таким образом, чтобы луч, отраженный от верхней точки зеркала, попадал на краевые точки ФЭ модулей. Предполагается, что на поверхности приемника освещение распределено равномерно.

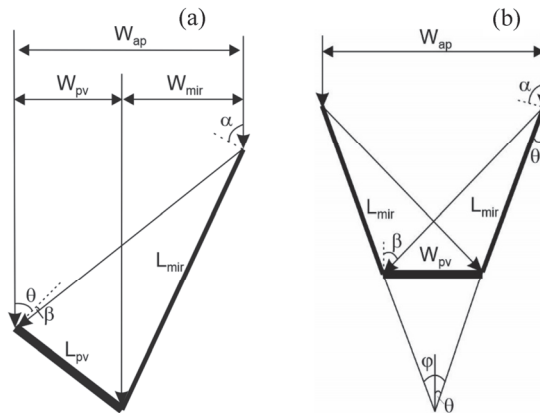


Рис.1. Планарная зеркально-отражающая (а) и V-образная (б) КФЭ системы.

Геометрическая концентрация планарной зеркально-отражающей ФЭ системы (рис.1а) определяется как отношение площади апертуры  $A_{ap}$  к площади ФЭ модуля  $A_{mod}$ :

$$C_{geo} = \frac{A_{ap}}{A_{mod}} = \frac{W_{ap}}{L_{pv}}. \quad (1)$$

С помощью геометрической или оптической (концентрация светового потока) концентрации характеризуется световой поток, на поверхности фотоприемника. Однако величина светового потока, поглощаемого фотоприемником в КФЭ системах, зависит от относительного углового пропускания света в фотоэлектрический модуль, а также от отражательной способности поверхности зеркала, которая, в свою очередь, тоже является функцией от угла падения света. Поэтому для более точного определения величины поглощенного светового потока рассмотрим эффективный коэффициент концентрации света, в котором учитываются вышеуказанные факторы.

Определим эффективный коэффициент концентрации системы путем разделения светового потока на две составляющие. Первая составляющая — это световой поток, падающий прямо на ФЭ модуль и освещающий ФЭ модуль под углом падения  $\theta$  (рис.1а). Вторая составляющая — это отраженный от зеркала свет, освещающий ФЭ модуль под углом падения  $\beta$ . Тогда, эффективный коэффициент концентрации  $C_{eff}$  можно представить как

$$C_{\text{eff}} = C_{\text{eff}}(W_{\text{pv}}) + C_{\text{eff}}(W_{\text{mir}}). \quad (2)$$

Первую составляющую эффективного коэффициента концентрации можно представить в виде

$$C_{\text{eff}}(W_{\text{pv}}) = \tau(\theta) \frac{W_{\text{pv}}}{L_{\text{pv}}} = \tau(\theta) \frac{L_{\text{pv}} \cos(\theta)}{L_{\text{pv}}} = \tau(\theta) \cos(\theta), \quad (3)$$

где  $\tau(\theta) = I_{\text{sc}}(\theta)/[I_{\text{sc}}(0) \cos(\theta)]$  и характеризует относительное угловое пропускание света в ФЭ модуль (или относительный угловой оптический отклик) [1],  $I_{\text{sc}}(\theta)$  — ток короткого замыкания ФЭ модуля или солнечного элемента, измеренный при угле падения света  $\theta$ , а  $I_{\text{sc}}(0)$  — ток короткого замыкания ФЭ модуля, измеренный при угле падения света  $\theta = 0^\circ$ .

Вторая составляющая эффективного коэффициента концентрации зависит от отражательной способности зеркала  $R(\alpha)$ , где  $\alpha$  — угол падения света, а также от относительного углового пропускания света в ФЭ модуль  $\tau(\beta)$ , здесь  $\beta$  — угол падения отраженного света на ФЭ модуль. Вторая составляющая эффективного коэффициента концентрации будет

$$C_{\text{eff}}(W_{\text{mir}}) = \tau(\beta) R(\alpha) \frac{W_{\text{mir}}}{L_{\text{pv}}} = \tau(\beta) R(\alpha) \frac{L_{\text{mir}} \cos(\alpha)}{L_{\text{pv}}}. \quad (4)$$

Таким образом, подставив (3) и (4) в (2), эффективный коэффициент концентрации системы можно записать в виде

$$C_{\text{eff}} = \tau(\theta) \cos(\theta) + \tau(\beta) R(\alpha) \frac{L_{\text{mir}}}{L_{\text{pv}}} \cos(\alpha). \quad (5)$$

Отметим, что относительное угловое пропускание света  $\tau(\theta)$  и  $\tau(\beta)$  для данного ФЭ модуля (солнечного элемента) можно определить экспериментально, измерив ток короткого замыкания  $I_{\text{sc}}(\theta)$  при различных углах падения света на поверхность ФЭ модуля и построив график зависимости  $\tau(\theta) = I_{\text{sc}}(\theta)/[I_{\text{sc}}(0) \cos(\theta)]$ . Отражательная способность данного зеркала  $R(\alpha)$  также может быть определена экспериментально путем измерения отражательной способности при различных углах падения солнечного света.

Используя тот же подход, мы можем определить эффективный коэффициент концентрации V-образной КФЭ системы (рис.1б). Геометрическая концентрация V-образной концентрирующей системы определяется как [9]:

$$C_{\text{geo}} = \frac{W_{\text{ap}}}{W_{\text{pv}}} = 1 + 2\cos(\Psi). \quad (6)$$

Первая составляющая эффективного коэффициента концентрации светового потока определяется потоком света, освещающего ФЭ модуль под углом падения  $\theta = 0^\circ$ . Она будет равна

$$C_{\text{eff}}(W_{\text{pv}}) = \tau(0) = 1. \quad (7)$$

Вторая составляющая эффективного коэффициента концентрации получается с учетом отражательной способности зеркала  $R(\alpha)$  и относительного углового пропускания света в ФЭ модуль  $\tau(\beta)$ :

$$C_{\text{eff}}(W_{\text{mir}}) = \tau(\beta) R(\alpha) \frac{W_{\text{ap}} - W_{\text{pv}}}{W_{\text{pv}}} = \tau(\beta) R(\alpha) (C_{\text{geo}} - 1). \quad (8)$$

Подставляя (7), (8) и (6) в (2), получим:

$$C_{\text{eff}} = 1 + \tau(\beta) R(\alpha) 2\cos(\Psi). \quad (9)$$

Таким образом, с использованием формулы (9) можно определить

эффективный коэффициент концентрации V-образной КФЭ системы. Отметим, что с использованием изложенного метода можно определить также эффективный коэффициент концентрации других типов КФЭ систем.

### 3. Измерение характеристик элементов КФЭ системы в зависимости от угла падения света

Для анализа эффективного коэффициента концентрации планарной зеркально-отражающей (рис.1а) и V-образной концентрирующей (рис.1б) КФЭ систем экспериментально измерялись относительное угловое пропускание света в ФЭ модуль  $\tau(\Theta)$  и отражательная способность зеркала  $R(\alpha)$ .

Относительное угловое пропускание света в ФЭ модуль измерялось с использованием монокристаллического кремниевое солнечного элемента с размерами  $50 \times 70 \text{ мм}^2$ , покрытого антиотражательной пленкой. Измерялся ток короткого замыкания при различных углах падения света. Образец солнечного элемента помещался на вращающийся стол и освещался имитатором солнечного света (рис.2). Солнечный элемент освещался локально в центральной области оптического световода диаметром 5 мм. При таком подходе исключается влияние эффекта косинуса, так как с изменением угла падения световой поток, освещающий поверхность солнечного элемента, остается неизменным.

Полученные результаты относительного углового пропускания света в солнечный элемент представлены на рис.3.



Рис.2. Схема экспериментальной установки для измерения относительного углового пропускания света в солнечный элемент: 1 — солнечный элемент; 2 — вращающийся стол; 3 — световод.

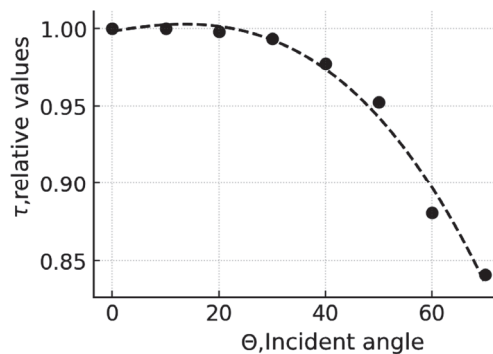


Рис.3. Относительное пропускание света в солнечный элемент в зависимости от угла падения света (точками показаны экспериментальные данные, пунктирной линией — аппроксимация полиномом).

Как и следовало ожидать, относительное угловое пропускание света в солнечный элемент  $\tau$  уменьшается при высоких значениях угла падения света (рис.3). Для расчетов  $\tau$  для данного солнечного элемента (фотоприемника) была разработана и использована следующая полиномиальная модель:

$$\tau = -3.81 \times 10^{-7} \times \theta^3 - 1.54 \times 10^{-5} \times \theta^2 + 6.24 \times 10^{-4} \times \theta + 0.9953. \quad (10)$$

Измерена также отражательная способность образца зеркально-отражающей пленки при различных углах падения света. Интенсивность зеркально-отраженного солнечного луча определялась путем измерения тока короткого замыкания кремниевое  $p$ - $n$ -перехода. Чтобы избежать влияния рассеянных и диффузных лучей,  $p$ - $n$ -переход помещался в специально разработанный корпус с узкой входной щелью. Полученные результаты представлены на рис.4.

Из рис.4 видно, что отражательная способность данного типа зеркальной пленки сравнительно низкая при малых углах падения солнечного света и увеличивается при больших значениях угла падения света.

Для расчета  $R(\alpha)$  для данного типа зеркально-отражающей пленки разработана и использована следующая полиномиальная модель:

$$R = -8.081 \times 10^{-7} \times \alpha^3 + 1.769 \times 10^{-4} \times \alpha^2 - 3.769 \times 10^{-3} \times \alpha + 0.5993. \quad (11)$$

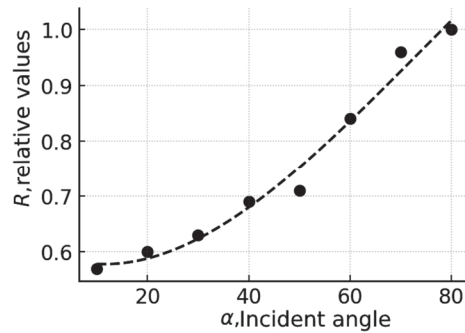


Рис.4. Отражательная способность зеркально-отражающей пленки в зависимости от угла падения солнечного света (точками показаны экспериментальные данные, пунктирной линией – аппроксимация полиномом).

#### 4. Анализ эффективной концентрации зеркально-отражающих КФЭ систем

Используя экспериментальные результаты, можно проанализировать геометрический и эффективный коэффициенты концентрации планарной зеркально-отражающей ФЭ концентрирующей системы. Для простоты, рассмотрим систему с параметрами  $L_{pv} = L_{mir}$ ,  $\alpha = \beta = \Theta = 45^\circ$  (рис.5a). Отметим, что такой тип концентрирующей системы используется на плоских крышах домов.

Геометрический и эффективный коэффициенты концентрации для планарной отражающей ФЭ системы, а также разница между  $C_{geo}$  и  $C_{eff}$  представлены в табл.1.

Сравнение геометрических и эффективных коэффициентов концентрации проведем для V-образной КФЭ системы с параметрами  $W_{pv} = L_{mir}$ ,  $\alpha = \beta = 60^\circ$ ,  $\Theta = 30^\circ$  и  $\Psi = 60^\circ$  (рис.5b). Геометрический и эффективный коэффициенты концентрации для V-образной концентрирующей системы представлены в табл.2.

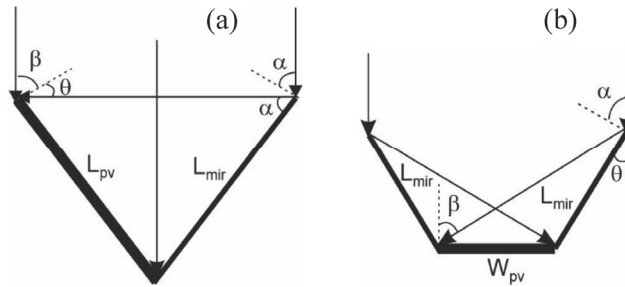


Рис.5. Упрощенные планарная (а) и V-образная (b) КФЭ системы.

Табл.1. Геометрический и эффективный коэффициенты концентрации планарной КФЭ системы (рис.5а)

| $C_{geo}$ ,<br>формула (1) | $\tau (45^\circ)$ ,<br>формула (10) | $R(45^\circ)$ ,<br>формула (11) | $C_{eff}$ ,<br>формула (5) | $\Delta = C_{geo} - C_{eff}$ | $\frac{C_{geo} - C_{eff}}{C_{geo}}, \%$ |
|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------------------|
| 1.41                       | 0.9575                              | 0.7143                          | 1.1639                     | 0.2461                       | 17.54                                   |

Табл.2. Геометрический и эффективный коэффициенты концентрации V-образной КФЭ системы (рис.5b)

| $C_{geo}$<br>формула (6) | $\tau(60^\circ)$ ,<br>формула (10) | $R(60^\circ)$ ,<br>формула (11) | $C_{eff}$ ,<br>формула (9) | $\Delta = C_{geo} - C_{eff}$ | $\frac{C_{geo} - C_{eff}}{C_{geo}}, \%$ |
|--------------------------|------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------------------|
| 2                        | 0.8950                             | 0.8356                          | 1.75                       | 0.2507                       | 12.53                                   |

Из полученных данных следует, что для обоих типов солнечных КФЭ систем геометрический коэффициент концентрации больше эффективного коэффициента концентрации. Объясняется это тем, что при определении эффективного коэффициента концентрации учитываются угловая зависимость отражательной способности концентрирующих зеркал, а также относительное угловое пропускание света в ФЭ модуль. Таким образом, с учетом угловой зависимости отражательной способности зеркал и относительного углового пропускания света в ФВ модуль, предложенный метод позволяет более точно определить значение поглощенного светового потока, поглощаемого фотоприемником – ФЭ модулем или солнечным элементом концентрирующей системы. Более высокая относительная разница между геометрическим и эффективным коэффициентами концентрации в 17.54% по сравнению с 12.53% может быть объяснена более низким относительным угловым пропусканием света в солнечный элемент в планарной зеркально-отражающей системе (рис.5а), чем в V-образной структуре (рис.5b).

## 5. Заключение

В работе предлагается уточненный метод определения поглощенного светового потока фотоприемником, с помощью использования понятия эффективной концентрации света в КФЭ системах. Предложенный метод учитывает как коэффициент зеркального отражения, так и относительное пропускание света в

фотоэлектрические модули, а также зависимость этих двух параметров от угла падения света. Проанализированы два типа зеркально-отражающих концентрирующих фотоэлектрических систем: планарная и V-образная. Показано, что геометрический коэффициент концентрации больше, чем эффективный коэффициент концентрации. Эффективный коэффициент концентрации позволяет оценить световой поток, поглощаемый фотоприемником. С помощью эффективного коэффициента концентрации можно будет определить полезную электрическую мощность КФЭ системы.

Предложенный метод может быть использован для анализа солнечных концентрирующих фотоэлектрических систем разных типов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **B. Knisley, S.V. Janakeerman, J. Kuitche, G. TamizhMani.** Arizona State University Photovoltaic Reliability Laboratory, **6**, 23 (2013).
2. **L.A.A. Bunthof, J. Bos-Coenraad, W.H.M. Corbeek, E. Vlieg, J.J. Schermer.** Solar Energy, **144**, 166 (2017).
3. **M.A. Mamun, M.M. Islam, M. Hasanuzzaman, J. Selvaraj.** Energy and Built Environment., **3**, 278 (2022).
4. **R. Sharma.** Heliyon, **5**, 1 (2019).
5. **R.R. Vardanyan.** Proceedings of Engineering Academy of Armenia, **14**, 398 (2017).
6. **M. Alnajideen, M. Gao.** Solar Energy Materials and Solar Cells, **245**, 1 (2022).
7. **W.T. Welferd, R. Winston.** Light and Solar Energy, **33**, 56 (1980).
8. **M.A. Abella, F. Chenlo, P. Valera, J. Enrile, R. Osuna.** Operation of Standard PV Modules in V-Trough Concentrators, Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005, Lake Buena Vista, FL, USA, 1690–1693, 2005.
9. **J.A. Duffie, W.A. Beckman.** Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons: Hoboken, New Jersey, 928, USA, 2013.
10. **A. Pradhan, B. Panda, L. Nanda, C. Jena, S. Sahoo.** Analysis of various types of reflectors on the performance of PV panel, 2022 International Conference for Advancement in Technology (ICONAT), Goa, India, Jan. 21–22, 2022.

#### METHOD FOR DETERMINING THE EFFECTIVE CONCENTRATION OF SOLAR ENERGY IN CONCENTRATING PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

R.R. VARDANYAN, A.R. GHARAKESHISHYAN

Solar concentrator photovoltaics (SCP) technology is one of the promising methods for increasing the efficiency of solar energy conversion. In SCP systems, the luminous flux absorbed by the photodetector (photovoltaic module or solar cell) depends on the reflectivity of the concentrator surface, which is a function of the angle of incidence of light. The absorbed luminous flux also depends on the relative angular transmission of light into the photovoltaic module. In this paper, we propose a refined method for determining the absorbed luminous flux by the photodetector using the introduced concept of effective light concentration. The proposed method takes into account the angular dependence of the specular reflection coefficient of light, as well as the relative angular transmission of light into the photovoltaic module. As an example, two reflecting SCP systems are considered - planar and V-shaped.