

УДК:621.472.383.56

Исследование параметров комбинированной фото-термоэлектрической установки в натуральных условиях

С.К. Шогучкаров^{1,2}, И.А. Юлдошев^{2*}, А.Р. Кудратов², Т.Р. Жамолов²

¹Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз.,
Узбекистан, 100084, Ташкент, ул. Чингиза Айтматова, д. 2Б

²Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова,
Узбекистан, 100095, Ташкент, ул. Университетская, д. 2
тел.: +99(871)246-03-04; *e-mail: *isroil.yuldoshev@tdtu.uz*

Дата поступления: 18.07.2019 После доработки: 11.09.2019 Принята в печать: 15.11.2019

Аннотация. Экспериментально исследованы параметры комбинированной фото-термоэлектрической установки с использованием современных солнечных элементов (СЭ) из поликристаллического кремния и термоэлектрической батареи (ТБ) на основе теллурида висмута с улучшенными тепловыми контактами. Изучены процессы нагрева и охлаждения фотоэлектрической части установки. Анализ результатов фотоснимков ИК излучения в процессе нагрева свидетельствует о том, что вся поверхности по температуре неоднородна. Белые пятна, частично наблюдаемые в центральных частях ФЭБ позволяют сделать вывод о высокой температуре, т.е. о процессе перегрева. После охлаждения водой ниже комнатной температуры холодного спая ТБ наблюдалось существенное изменение градиента температуры ФЭБ и частичное восстановление основных параметров ФЭБ. Неоднородность градиента температуры по поверхности ФЭБ, по-видимому, связана с неравномерным отводом тепла с фронтальной поверхности на тыльную сторону батареи. На основе полученных экспериментальных данных построены сравнительные графики параметров комбинированной фото-термоэлектрической установки с рефлектором и без него.

Ключевые слова: Комбинированная фото-термоэлектрическая установка, солнечный элемент, термоэлектрическая батарея, рефлектор, тепловизор, температура фотоэлектрического модуля, охлаждение, фотоэлектрическая батарея, термо-ЭДС, перегрев.

UDC: 621.472.383.56

Study of the parameters of a combined photo-thermoelectric installation in natural conditions

S.K. Shoguchkarov^{1,2}, I.A. Yuldoshev^{2*}, A.R. Khudratov², T.R. Jamolov²

¹Physical Technical Institute of SPA "Physics-Sun" of Uz AS,
house 2B, Chingiz Aitmatov str., 100084, Tashkent, Uzbekistan

²Tashkent State Technical University named after Islam Karimov,
house 2, Universitet str., 100095, Tashkent, Uzbekistan
tel.: +99 (871) 246-03-04; * e-mail: *isroil.yuldoshev@tdtu.uz*

Submitted: 18.07.2019 Revised: 11.09.2019 Accepted: 15.11.2019

Abstract. The parameters of the combined photo-thermoelectric (PV-TEG) installation using modern solar cells (SC) made of polycrystalline silicon and thermoelectric batteries (TB) based on bismuth telluride with improved thermal contacts were experimentally investigated. The processes of heating and cooling the photovoltaic part of the installation were studied. Analysis of the results of photographs of infrared radiation heating processes indicate that all surfaces are almost uniform in temperature. The white "spot" partially observable in the central parts of the PVB predicts a high temperature, i.e. about the process of "overheating". After cooling of the "cold" junction of the thermoelectric battery with water below room temperature, a significant change in the temperature gradient of the PVB and a partial restoration of the main parameters of the PVB were observed. The inhomogeneity of the temperature gradient over the surface of the PVB is apparently due to the uneven removal of heat from the front surface to the back of the

battery. Based on the obtained experimental data, comparative graphs of the parameters of the combined PV-TEG installation with and without a reflector are constructed.

Keywords: Combined PV-TEG installation, solar cell, thermoelectric battery, reflector, thermal imager, temperature of the photo-electric module, cooling, photo-electric battery, thermo-EMF, overheating.

Введение

Известно, что эффективность ФЭБ уменьшается при повышенных температурах окружающей среды [1-8]. Если учесть, что продолжительность срока службы ФЭБ зависит от её температуры, то управление рабочей температурой ФЭБ является важным фактором. Одним из методов регулирования температуры ФЭБ является метод, основанный на применении термоэлектрических устройств. Устройство, приклеенное к тыльной поверхности ФЭБ преобразует передаваемое от рабочей поверхности тепло в электрическую энергию, и таким образом повышает эффективность ФЭБ [9-17].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование параметров комбинированной фото-термоэлектрической установки с применением современных солнечных элементов и термоэлектрических батарей с высокими электрическими и теплотехническими характеристиками.

На основе ранее полученных результатов исследований, был изготовлен опытный образец комбинированной установки, в состав которой входят: фотоэлектрическая батарея, термоэлектрический генератор и рефлектор (рис.1) [18-22].



Рис.1. Общий вид комбинированной фото-термоэлектрической установки

Fig.1. General view of the combined PV-TEG installation

Комбинированная фото-термоэлектрическая установка крепится на опоре лабораторного столика, оснащенной механизмом слежения за Солнцем. В качестве отражающих поверхностей рефлекторов были использованы листы из нержавеющей стали с никелевым покрытием.

Методы и материалы

Измерения проводились 3 - 4.05.2019г. в естественных условиях на Гелиополигоне Ташкентского государственного технического университета в г.Ташкенте в следующей последовательности: параметры комбинированной фото-термоэлектрической установки измерялись без рефлектора, а затем с рефлектором, ориентированным на юг под углом к горизонту 25° (оптимальный наклон весеннего солнцестояния в мае месяце) в дневное время суток. Измерялись плотность потока солнечного излучения, температура окружающей среды, скорость ветра, напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, температуры фронтальной и тыльной стороны фотоэлектрической части, термо-ЭДС, вырабатываемый ток термоэлектрической части установки.

Были изучены процессы нагрева и охлаждения фотоэлектрической установки. Температура фронтальной поверхности ФЭБ фиксировалась с помощью тепловизора (FLIR – E63900), во время нагрева солнечным излучением и после охлаждения ФЭБ, путем пропускания воды в систему охлаждения, см. рис.2.

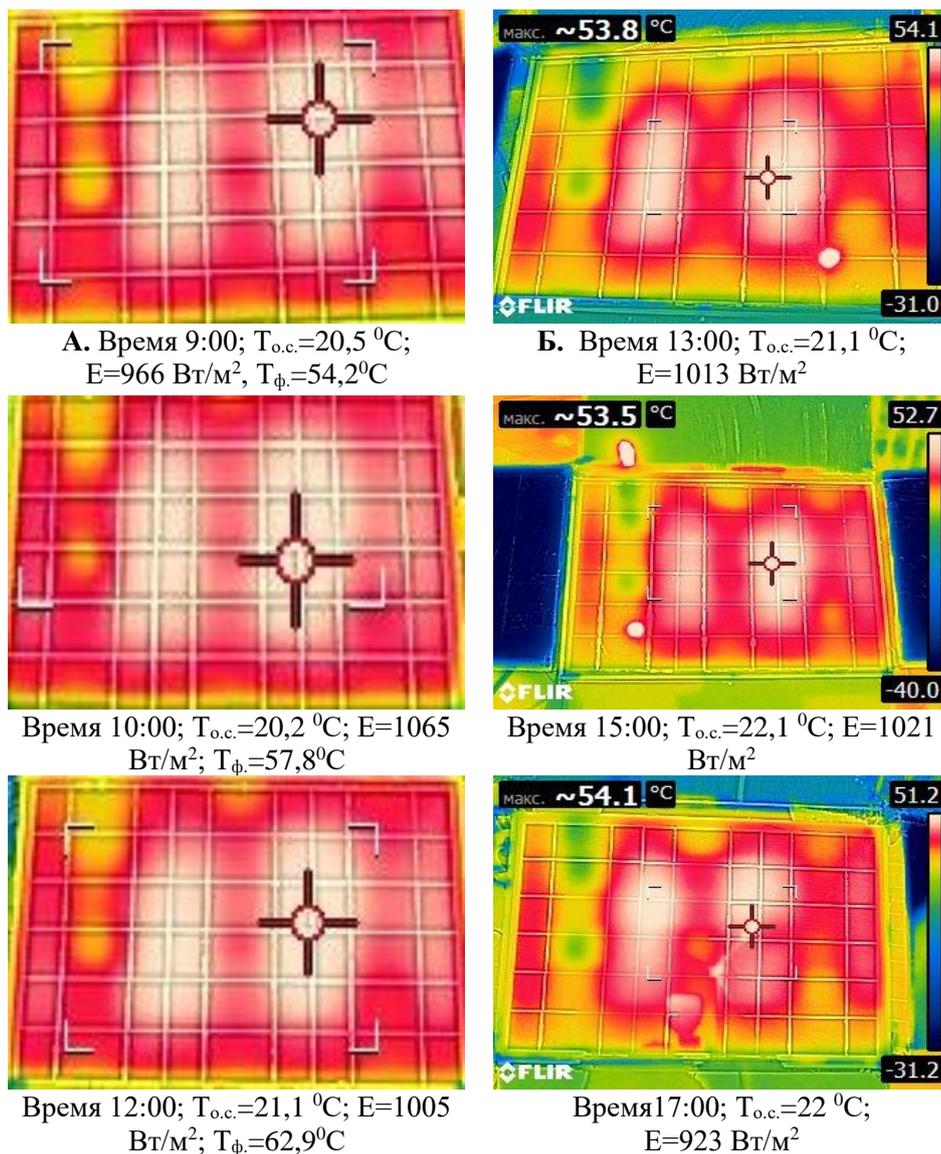


Рис.2. Динамика изменения температуры фронтальной поверхности фотоэлектрической части комбинированной фото-термоэлектрической установки без рефлектора
 А - от 9:00 по 12:00 - до охлаждения ФЭБ; Б - от 13:00 по 17:00 - после охлаждения ФЭБ

Fig.2. Dynamics of the temperature change of the front surface of the photovoltaic part of a combined PV-TEG installation without a reflector

А - from 9:00 to 12:00 - until the cooling of the PVB; Б - from 13:00 to 17:00 - after cooling the PVB

Исходя из экспериментальных данных на рис.2 можно сделать вывод о том, что снимки, полученные до охлаждения ФЭБ, свидетельствуют о росте температуры от 9:00 до 12:00 час. дня. После подключения воды от холодного резервуара к системе охлаждения (рис.2, Б) наблюдалось существенное изменение градиента температуры ФЭБ и частичное восстановление основных параметров фотоэлектрической батареи. Неоднородность градиента температуры по поверхности ФЭБ, по-видимому, связана с неравномерным отводом тепла с фронтальной поверхности на тыльную сторону батареи. Все поверхности (рис. 2, А) фотоэлектрической батареи были нагреты и почти однородны по температуре.

Результаты

Экспериментальные результаты комбинированной фото-термоэлектрической установки с рефлектором получены 4.05.2019г. На рис.3 приведена динамика изменения температуры фронтальной поверхности фотоэлектрической части установки с рефлектором. Исходя из рис. 3, можно ска-

зять, что вне габаритных размеров ТБ температурные показатели ФЭБ остаются высокими. Это связано с тем, что между каналами охлаждающего устройства отсутствует теплоотвод, т.е. тыльная поверхность не полностью покрыта термоэлектрическими батареями. В комбинированной фото-термоэлектрической установке суммарная площадь ТБ составляет 1/5 часть площади ФЭБ. Метеопараметры (температура окружающей среды, скорость ветра, плотность потока солнечного излучения и др.) измеренные в течение дня 4.05.2019 г., были ближе к значениям 3.05.2019 г., поэтому сравнительные данные являются достоверными.

Анализируя полученные снимки можно сделать вывод о том, что с помощью этой конструкции системы охлаждения можно управлять температурой рабочей поверхности фотоэлектрической части установки без рефлектора в НОСТ (нормальные условия температуры СЭ).

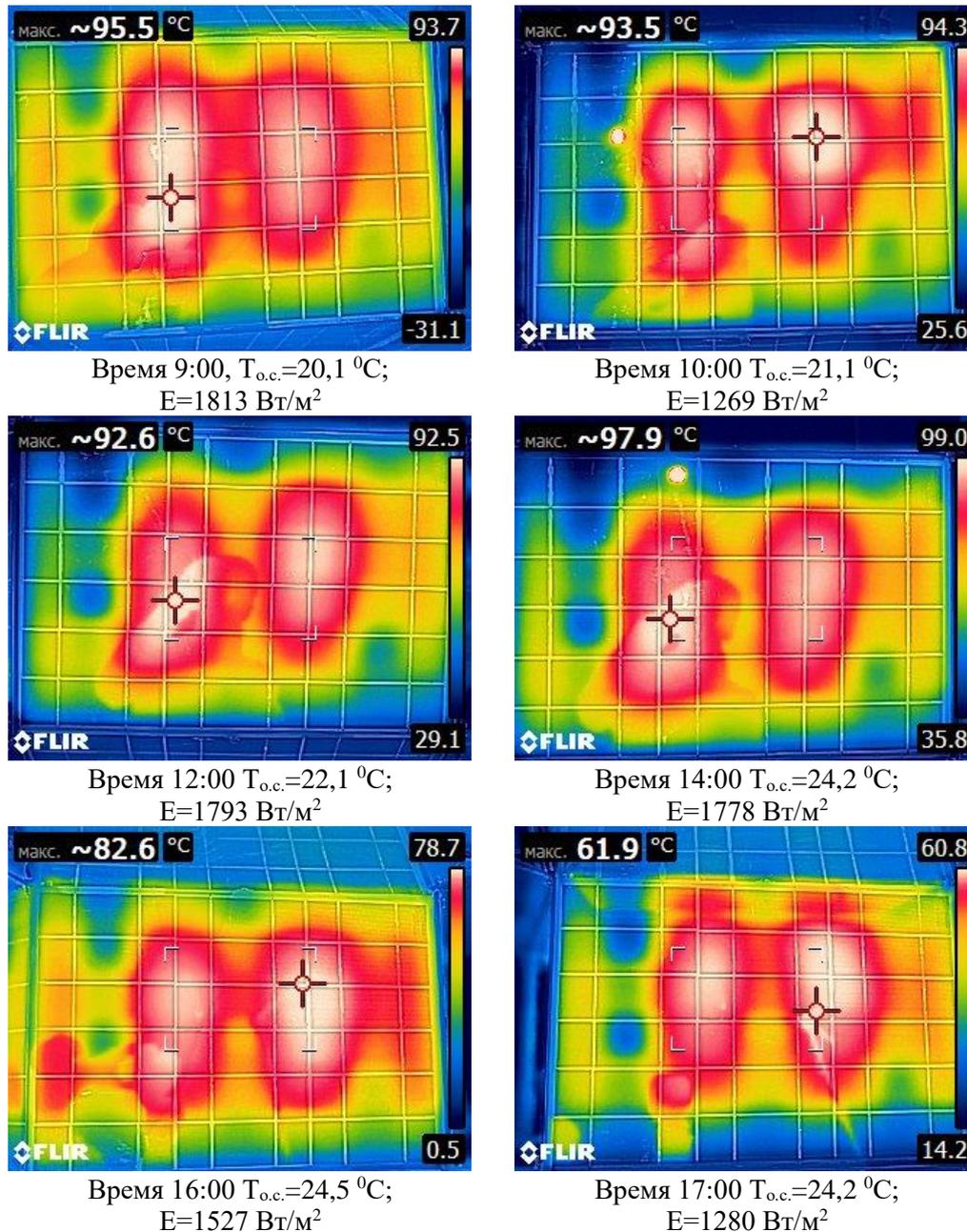


Рис.3. Динамика изменения температуры фронтальной поверхности фотоэлектрической части комбинированной фото-термоэлектрической установки с рефлектором

Fig.3. Dynamics of changes in the temperature of the front surface of the photovoltaic part of a combined PV-TEG installation with a reflector

На рис.4 изображена зависимость температуры фотоэлектрической части комбинированной фото-термоэлектрической установки от времени суток. Графики построены на основе показателей термопар на основе медь-константан, расположенных на фронтальной и тыльной поверхностях ФЭБ.

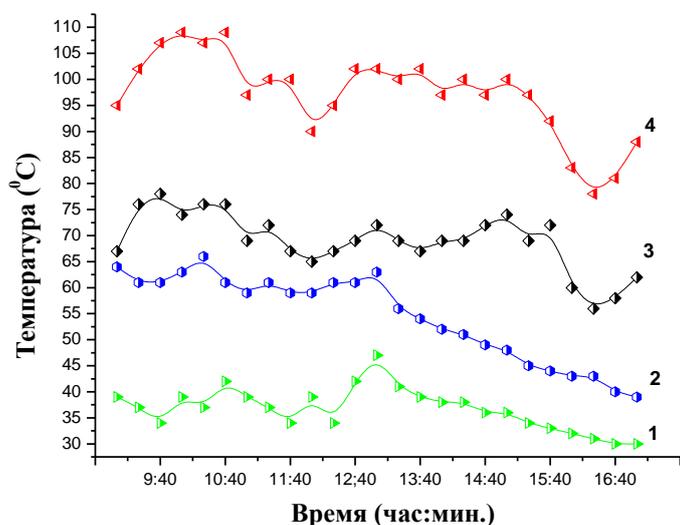


Рис.4. Зависимость температуры фотоэлектрической части комбинированной фото-термоэлектрической установки от времени суток: 1,2 –соответственно, температуры горячего спая ТБ и фронтальной поверхности ФЭБ без рефлектора; 3,4- соответственно, температуры горячего спая ТБ и фронтальной поверхности ФЭБ с рефлектором

Fig.4. The dependence of the temperature of the photoelectric part of the combined FTEG installation on the time of day: 1,2 - accordingly, the temperature of the hot junctions of the TB and the front surface of the PVB using without a reflector; 3,4-, respectively, the temperature of the "hot" junctions of the TB and the front surface of the PVB using a reflector

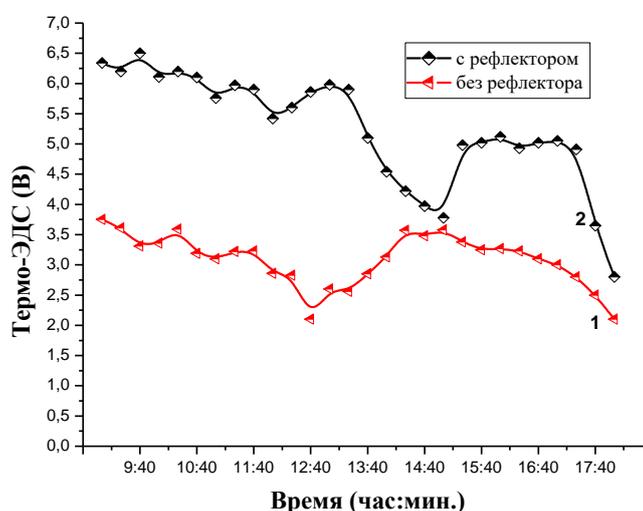


Рис.5. Зависимость термо-ЭДС термоэлектрической части, комбинированной фототермоэлектрической установки от времени суток: 1-термо-ЭДС термоэлектрической части установки без рефлектора; 2 - термо-ЭДС термоэлектрической части установки с рефлектором

Fig.5. Dependence of the thermoelectric power of the thermoelectric part of the combined PV-TEG installation on the time of day: 1-thermo-EMF of the thermoelectric part of the installation without reflector; 2 - thermo-EMF of the thermoelectric part of the installation with a reflector

Из графиков рис.4 видно, что использование рефлектора и без него при температуре окружающей среды $\sim 23 \pm 1,5^{\circ}\text{C}$ и скорости ветра $1 \pm 0,5$ м/с значения температуры фотоэлектрической части комбинированной фото-термоэлектрической установки сильно отличаются друг от друга. Как видно из графиков (кривые 1,2) после 13 час. дня за счет активизации ТБ (при подаче теплоносителя к охлаждающим устройствам) и увеличения скорости ветра температура фронтальной поверхности

ФЭБ и горячего спаев ТБ уменьшилась. При использовании рефлектора происходит скачок температуры (от 78⁰С до 109⁰С, кривые 3,4), которая является рентабельной для работы ТБ, и наоборот, - происходит перегрев ФЭБ.

Из-за увеличения температуры существенно уменьшаются напряжение холостого хода, КПД, мощность ФЭБ, в результате чего увеличивается время зарядки в системе аккумулирования электрической энергии и даже прекращение аккумуляции.

На рис.5 приведен результат экспериментального исследования зависимости термо-ЭДС термоэлектрической части комбинированной фото-термоэлектрической установки от времени суток. Известно, что мощность ТБ линейно зависит от разности температур ΔT (разность холодных и горячих спаев ТБ).

Обсуждение результатов

Мощность ТБ можно рассчитать на основе следующей формулы:

$$P_g = S_m I_{teg} (T_h - T_c) - I_{teg}^2 R_m \quad (1)$$

Здесь S_m - коэффициент Зеебека; R_m - электрические сопротивление ТБ; I_{teg} -генерируемый ток ТЭГ; T_h и T_c - соответственно температуры холодных и горячих спаев ТБ.

В этих процессах температура горячего спаев будет $T_h \approx T_{b,s}$, где $T_{b,s}$ - температура тыльной поверхности ФЭБ. Результат показаний температуры горячей поверхности ТБ приведен на рис.4 (кривые 1,3). Расчеты показывают, что усредненные значения термо-ЭДС термоэлектрической части установки с рефлектором и без неё отличаются на ~59%.

Исследованы также зависимости основных параметров фотоэлектрической части установки с рефлектором и без него от времени суток (рис.6). Анализируя графики (кривые 1,2) на рис.5 и рис.6, можно сделать вывод о том, что при высокой температуре в ФЭБ термо-ЭДС термоэлектрической части заметно увеличилось и наоборот при низкой температуре в фотоэлектрической части установки основные параметры ФЭБ увеличиваются. Это наблюдается в промежутке от 13 до 15 час. дня.

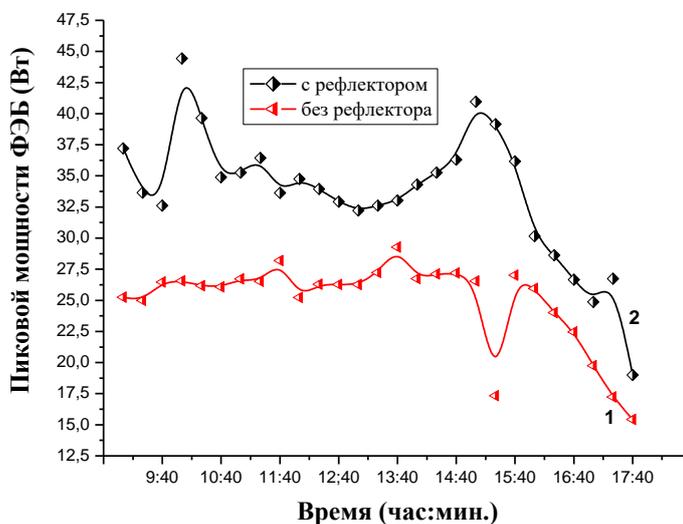


Рис.6. Зависимость пиковой мощности фотоэлектрической части установки от времени суток
1-изменение пиковой мощности ФЭБ без рефлектора в течение суток;
2- изменение пиковой мощности ФЭБ с рефлектором в течение суток

Fig.6. Dependences of the peak power of the photovoltaic part of the PV-TEG installation on the time of day
1-change in the peak power of the PVB without reflector during the day;
2- change in the peak power of the PVB with a reflector during the day

На рис. 7 приведено изменение значения плотности потока солнечного излучения на рабочей поверхности фотоэлектрической части установки с рефлектором и без него. Показания плотности прямого и рассеянного потока солнечного излучения были зарегистрированы с помощью измери-

тельного прибора PL-110SM Solar-Meet instrument (Германия) и эталонного образца СЭ. Коэффициент отражения солнечного излучения от боковых отражающих рефлекторов составлял $R \sim 0,58$, что приводит к увеличению мощности падающего солнечного излучения в 1,72 раза.

Исходя из рис.7 можно сделать вывод о том, что вырабатываемый ток фотоэлектрической части установки прямо пропорциональна плотности потока солнечного излучения, поэтому графики (кривые 1,2) на рис. 6 и рис.7 являются идентичными.

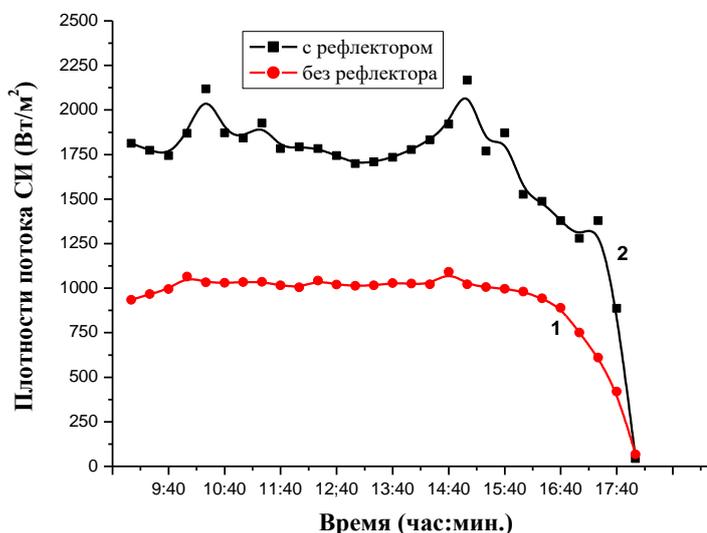


Рис.7. Изменение плотности потока солнечного излучения на рабочей поверхности ФЭБ с рефлектором и без него

Fig.7. Changing the density of the flux of solar radiation on the working surface of the PVB with and without a reflector.

Использованные нами рефлекторы относятся к классу слабо концентрирующих систем. Слабо концентрирующие системы применяются для повышения плотности потока солнечного излучения на рабочих поверхностях модулей или панелей СЭ [23]. В связи с этим, важным требованием к их выходным энергетическим характеристикам, является обеспечение равномерного распределения плотности лучистого потока на приемную поверхность. Этому требованию отвечают рефлекторы с плоскими отражающими поверхностями.

Заключение

Экспериментально определено, что использование отражающего рефлектора, соразмерного к фотоэлектрической части комбинированной фото-термоэлектрической установки, привело к увеличению пика мощности ФЭБ в 1,34 раз и термо-ЭДС термоэлектрической части в 1,7 раз.

Благодарности

Авторы благодарны д.ф.-м.н. Муминову Р.А, д.т.н. Турсуну М.Н. и к.т.н. Дыскину В.Г. за обсуждение результатов. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства инновационного развития Республики Узбекистан в рамках проекта ПФИ ФА-Ф3-004 «Изучение фундаментальных новых физических моделей, механизмов, способов для формирования высокоэффективных дешевых фотопреобразователей, а также долговечных фотоэнергетических установок на их основе».

Acknowledgments

The authors are grateful to Dr.Sc. Muminov R.A, Dr. Sc. Tursunov M.N. and Dr. Dyskin V.G. for the discussion of the results. The work was carried out with the financial support of the Ministry of Innovation Development of the Republic of Uzbekistan in the framework of project ПФИ ФА-Ф3-004 «The study of fundamental new physical models, mechanisms, methods for the formation of highly efficient, cheap photo converters, as well as durable photovoltaic installations based on them»

Литература

- [1] E Skoplaki and J. Palyvos, "Operating temperature of photovoltaic modules: a survey of pertinent correlations", *Renewable Energy*, no. 34, pp. 23-29, 2009.
- [2] Р.А. Муминов, М.Н. Турсунов, О.Ф. Тукфатуллин, "Влияние температуры на вольтамперные характеристики фотоэлектрических батарей на базе монокристаллического кремния", *Гелиотехника*, № 4, стр. 21–24, 2007.
- [3] T.T. Chow, "A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology", *Applied Energy*, vol. 87, pp. 365–379, 2010.
- [4] М.Н. Турсунов, И.А. Юлдошев, "Разработка фотоэлектрических батарей, установок, эффективно работающих в условиях Центральной Азии", *Проблемы энерго-ресурсосбережения*, Специальный выпуск, стр. 160-165, 2011.
- [5] R.R. Avezov, J.S. Akhatov, and N.R. Avezova, "A Review on Photovoltaic-Thermal (PV-T) Air and Water collectors", *Applied Solar Energy*, vol. 47, no. 3, pp. 169-183, 2011.
- [6] M.N. Tursunov, R. A. Muminov, V.G. Dyskin, and I.A. Yuldashev, "A Mobile Photothermal Converter and Its Operating Characteristics", *Applied Solar Energy*, vol. 49, no. 1, pp. 16-18, 2013.
- [7] P. Singh and N. Ravindra, "Temperature dependence of solar cell performance — an analysis", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 101, pp. 36-45, 2012.
- [8] K. Emery, J. Burdick, Y. Caiyem, et al., "Temperature dependence of photovoltaic cells, modules and systems", *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, pp. 1275-1278, 1996.
- [9] Tsung-Chieh Cheng., Chin-Hsiang Cheng, Zhu-Zin Huang, and Guo-Chun Liao, "Development of an energy-saving module via combination of solar cells and thermoelectric coolers for green building applications", *Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 133-140, 2011.
- [10] Y. Deng, W. Zhu, Y. Wang, and Y. Shi, "Enhanced performance of solar-driven photovoltaic-thermoelectric hybrid system in an integrated design", *Solar Energy*, vol. 88, pp. 182-191, 2013.
- [11] X. Ju, Z. Wang, G. Flamant, P. Li, and W. Zhao, "Numerical analysis and optimization of a spectrum splitting concentration photovoltaic-thermoelectric hybrid system", *Solar Energy*, vol. 86, pp. 1941-1954, 2012.
- [12] H. Najafi and K.A. Woodbury, "Modeling and analysis of a combined photovoltaic-thermoelectric power generation system", *J. Sol. Energ.* vol. 135, 031013, 2013.
- [13] W.G.J.H.M. van Sark, "Feasibility of Photovoltaic-Thermoelectric hybrid modules", *Applied Energy*, vol. 88, no. 8, pp. 2785–2790, 2011.
- [14] F. Attivissimo, A.Di Nisio, A.M.L. Lanzolla, M. Paul, "Feasibility of a photovoltaic-thermoelectric generator: performance analysis and simulation results", *IEEE T. Instrum. Meas.*, vol. 64, pp. 1158-1169, 2015.
- [15] Y. Vorobiev, J. Gonzalez-Hernandez, P. Vorobiev, and L. Bulat, "Thermal-photovoltaic solar hybrid system for efficient solar energy conversion", *Solar Energy*, vol. 80, pp. 170-176, 2006.
- [16] C. Kim, D.H. Kim, H. Kim, and J.S. Chung, "Significant enhancement in the thermoelectric performance of a bismuth telluride nanocompound through brief fabrication procedures", *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 4, pp. 2949-2954, 2012.
- [17] Y. Zhang, J. Fang, C. He, et al., "Integrated energy-harvesting system by combining the advantages of polymer solar cells and thermoelectric devices", *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 117, no. 47, pp. 24685-24691, 2013.
- [18] И.А. Юлдошев, "Комбинированные энергоустановки на основе фотоэлектрических батарей из кристаллического кремния", Дисс. на соискание уч. степени доктора технических наук. Ташкент, 188 с., 2016.
- [19] M.N. Tursunov, R.A. Muminov, I.A. Yuldashev, et al., "Photothermal Electric Battery Based on Silicon Solar Cells", *Applied Solar Energy*, vol. 47, no. 1, pp. 63-65, 2011.
- [20] С.Л. Лутпуллаев, М.Н. Турсунов С. Дадамухамедов, И.А. Юлдошев, "Фототермопреобразователь" Узбекистан, Ташкент, Патент на полезную модель № FAP 00793 от 18.07.2011.
- [21] М.Н. Турсунов, В.Г. Дыскин., С. Дадамухамедов и др., "Определение параметров комбинированной системы фотопреобразователь - термоэлектрический преобразователь", *Гелиотехника*, № 3, стр. 24-27, 2012.

- [22] М.Н. Турсунов, В.Г. Дыскин, И.А. Юлдошев, “Исследование параметров комбинированной установки на основе «фото-термогенераторов» с концентраторами”, Материалы III Международной конференции по Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро и наноструктурах, Фергана. 14-15 ноября, стр. 108-110, 2014.
- [23] I.A. Yuldoshev, A.K. Saymbetov, “Combined photo thermo converters solar energy with reflecting concentrators”, In Proceedings of XII International scientific conference “Solid state Physics”, Astana, 25-27 June, pp. 217-219, 2014.

References

- [1] E Skoplaki and J. Palyvos, “Operating temperature of photovoltaic modules: a survey of pertinent correlations”, *Renewable Energy*, no. 34, pp. 23-29, 2009.
- [2] R.A. Muminov, M.N. Tursunov, O.F. Tukfatullin, “Vliyaniye temperatury na vol'tampernyye kharakteristiki fotoelektricheskikh batarey na baze monokristallicheskogo kremniya” [The effect of temperature on the current-voltage characteristics of single-crystal silicon-based photovoltaic batteries], *Geliotekhnika*, no. 4, pp. 21–24, 2007 (in Russian).
- [3] T.T. Chow, “A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology”, *Applied Energy*, vol. 87, pp. 365–379, 2010.
- [4] M.N. Tursunov and I.A. Yuldoshev, “Razrabotka fotoelektricheskikh batarey, ustanovok effektivno rabotayushchikh v usloviyakh Tsentral'noy Azii” [Development of photovoltaic batteries, installations, efficiently working in the conditions of Central Asia], *Problemy energo-resursosberezheniya [Problems of energy and resource saving], Special Issue*, pp. 160-165, 2011 (in Russian).
- [5] R.R. Avezov, J.S. Akhatov, and N.R. Avezova, “A Review on Photovoltaic-Thermal (PV-T) Air and Water collectors”, *Applied Solar Energy*, vol. 47, no. 3, pp. 169-183, 2011.
- [6] M.N. Tursunov, R. A. Muminov, V.G. Dyskin, and I.A. Yuldashev, “A Mobile Photothermal Converter and Its Operating Characteristics”, *Applied Solar Energy*, vol. 49, no. 1, pp. 16-18, 2013.
- [7] P. Singh and N. Ravindra, “Temperature dependence of solar cell performance — an analysis”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 101, pp. 36-45, 2012.
- [8] K. Emery, J. Burdick, Y. Caiyem, et al., “Temperature dependence of photovoltaic cells, modules and systems”, *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, pp. 1275-1278, 1996.
- [9] Tsung-Chieh Cheng., Chin-Hsiang Cheng, Zhu-Zin Huang, and Guo-Chun Liao, “Development of an energy-saving module via combination of solar cells and thermoelectric coolers for green building applications”, *Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 133-140, 2011.
- [10] Y. Deng, W. Zhu, Y. Wang, and Y. Shi, “Enhanced performance of solar-driven photovoltaic-thermoelectric hybrid system in an integrated design”, *Solar Energy*, vol. 88, pp. 182-191, 2013.
- [11] X. Ju, Z. Wang, G. Flamant, P. Li, and W. Zhao, “Numerical analysis and optimization of a spectrum splitting concentration photovoltaic-thermoelectric hybrid system”, *Solar Energy*, vol. 86, pp. 1941-1954, 2012.
- [12] H. Najafi and K.A. Woodbury, “Modeling and analysis of a combined photovoltaic-thermoelectric power generation system”, *J. Sol. Energ.* vol. 135, 031013, 2013.
- [13] W.G.J.H.M. van Sark, “Feasibility of Photovoltaic-Thermoelectric hybrid modules”, *Applied Energy*, vol. 88, no. 8, pp. 2785–2790, 2011.
- [14] F. Attivissimo, A.Di Nisio, A.M.L. Lanzolla, M. Paul, “Feasibility of a photovoltaic-thermoelectric generator: performance analysis and simulation results”, *IEEE T. Instrum. Meas.*, vol. 64, pp. 1158-1169, 2015.
- [15] Y. Vorobiev, J. Gonzalez-Hernandez, P. Vorobiev, and L. Bulat, “Thermal-photovoltaic solar hybrid system for efficient solar energy conversion”, *Solar Energy*, vol. 80, pp. 170-176, 2006.
- [16] C. Kim, D.H. Kim, H. Kim, and J.S. Chung, “Significant enhancement in the thermoelectric performance of a bismuth telluride nanocompound through brief fabrication procedures”, *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 4, pp. 2949-2954, 2012.
- [17] Y. Zhang, J. Fang, C. He, et al., “Integrated energy-harvesting system by combining the advantages of polymer solar cells and thermoelectric devices”, *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 117, no. 47, pp. 24685-24691, 2013.
- [18] I.A. Yuldoshev, “Kombinirovannyye energoustanovki na osnove fotoelektricheskikh batarey iz kristallicheskogo kremniya” [Combined power plants based on crystalline silicon photovoltaic batteries],

- “Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk”, Thesis of Doctor of Technical Sciences, Tashkent, p. 188, 2016 (in Russian).
- [19] M.N. Tursunov, R.A. Muminov, I.A. Yuldashev, et al., “Photo-Thermal Electric Battery Based on Silicon Solar Cells”, *Applied Solar Energy*, vol. 47, no. 1, pp. 63-65, 2011.
- [20] S.L. Lutpullayev, M.N. Tursunov, S. Dadamukhamedov, and I.A. Yuldoshev, “Fototermopreobrazovatel” [Phototherm Transducer], “Uzbekistan, Tashkent, Patent na poleznuyu model” [Uzbekistan, Tashkent, Utility Model Patent], № FAP 00793 ot 18.07.2011 (in Russian).
- [21] M.N. Tursunov, V.G. Dyskin, S. Dadamukhamedov, et al., “Opredeleniye parametrov kombinirovannoy sistemy fotopreobrazovatel' - termoelektricheskiy preobrazovatel” [Determination of the parameters of the combined system photo-converter - thermoelectric converter], *Geliotekhnika*, no. 3, pp. 24-27, 2012 (in Russian).
- [22] M.N. Tursunov, V.G. Dyskin, and I.A. Yuldoshev, “Issledovaniye parametrov kombinirovannoy ustanovki na osnove “foto-termobatarey” s kontsentratorami” [Study of the parameters of a combined installation based on "photo-thermal batteries" with concentrators], In Proc. of the III International Conference on Optical and Photoelectric Phenomena in Semiconductor Micro and Nanostructures, Fergana. 14-15 november, pp. 108-110, 2014 (in Russian).
- [23] I.A. Yuldoshev, A.K. Saymbetov, “Combined photo thermo converters solar energy with reflecting concentrators”, In Proceedings of XII International scientific conference “Solid state Physics”, Astana, 25-27 June, pp. 217-219, 2014.