

УДК 620.92

DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-64-74

## Экспериментальное исследование фотоэлектрической тепловой батареи с тонкопленочным модулем на основе CdTe

И.Р. Жураев, И.А. Юлдошев, З.И. Жураева

Приведены результаты экспериментального исследования CdTe тонкопленочного фотоэлектрического модуля (ФЭМ) и разработанной на основе данного типа ФЭМ фотоэлектрической тепловой батареи (ФЭТБ) с абсорбером в виде тепловой батареи, выполненной из алюминиевых листов в коробчатом виде с радиаторными теплообменниками. Экспериментальные данные измеренных параметров окружающей среды, электрофизических и теплотехнических характеристик установок приведены за 06 августа 2022 г. За счет теплоотвода и охлаждения модуля среднедневные значения температуры на поверхности ФЭТБ снизились на 21,5%, величина электрической мощности увеличилась на 9,2%, а значения напряжения холостого хода и тока короткого замыкания выросли на 2,3 и 1,5% по сравнению с начальными характеристиками ФЭМ.

С помощью разработанной конструкции ФЭТБ за время измерений с 10-00 до 17-30 часов выработано 134 л нагретой воды средней температурой 38 °C. Как показывает результат исследования, представленная конструкция ФЭТБ может быть успешно использована для комбинированного производства электрической и тепловой энергии для нужд потребителей.

**Ключевые слова:** фотоэлектрические модуль и тепловая батарея, температура нагрева, способ охлаждения.

**Для цитирования:** Жураев И.Р., Юлдошев И.А., Жураева З.И. Экспериментальное исследование фотоэлектрической тепловой батареи с тонкопленочным модулем на основе CdTe // Вестник МЭИ. 2023. № 5. С. 64—74. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-64-74.

## Experimental Study of a Photovoltaic Thermal Battery with a Thin-film Module Based on CdTe

I.R. Zhuraev, I.A. Yuldoshev, Z.I. Zhuraeva

The article presents the results of an experimental study of a CdTe thin-film photovoltaic module (PVM) and a photovoltaic-thermal array (PVTA) developed on the basis of this type of PVM with an absorber in the form of a thermal array made of aluminum sheets in a box-like shape with radiator heat exchangers. The experimental data on the measured environmental parameters, electrophysical and thermal characteristics of the installations are given as of August 6, 2022. Due to the heat removal and cooling of the module, the daily average temperature values at the PVTA surface decreased by 21.5%, the electric power output increased by 9.2%, and the values of the no-load voltage and short-circuit current increased by 2.3% and 1.5%, respectively, in comparison with the PVM initial characteristics. By using the developed PVTA design, 134 L of heated water with an average temperature of 38 °C was produced during measurements from 10-00 to 17-30 h. The study results have shown that the presented PVTA design can be successfully used for combined production of electricity and heat for the needs of consumers.

**Key words:** photovoltaic module, photovoltaic-thermal array, heating temperature, cooling method.

**For citation:** Zhuraev I.R., Yuldoshev I.A., Zhuraeva Z.I. Experimental Study of a Photovoltaic Thermal Battery with a Thin-film Module Based on CdTe. Bulletin of MPEI. 2023;5:64—74. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-64-74.

### Введение

Привлечение в систему энергообеспечения солнечных фотоэлектрических установок требует обеспечения их стабильной работы в разных погодных условиях. При эксплуатации в условиях жаркого климата фотоэлектрические модули нагреваются до температуры, превышающей рабочие пределы. Данное обстоятельство снижает энергетические показатели и ведет к быстрой деградации модулей.

В целях решения данной проблемы в течение последних 15-ти лет были разработаны новые технологии производства солнечных фотоэлектрических элементов и модулей на кремниевой основе. Благодаря им модули получили повышенную сопротивляемость

к перегревам. Новые технологии в значительной степени решают проблемы стабильной эффективности, но в производстве чрезвычайно затратны, что влечет за собой увеличение цены модулей [1]. Задача снижения температуры до уровня обеспечения эффективной работы установок стала предпосылкой для создания направления исследований по охлаждению модулей, теплоотвода, рекуперации тепла и его использования. В течение прошедших лет изучены разные способы охлаждения модулей — водяной, воздушный, наножидкостный, с фазопереходными материалами, хладагентом [2]. В [3] исследовано моделирование тепловой части фотоэлектрической тепловой батареи (ФЭТБ) кремниевого кристаллического, аморфного кремниевого и тонкопленочных модулей на основе CdTe, CIS,

CIGS. В [4, 5] проведен анализ инновационных методов охлаждения солнечной панели и применения гибридных фотоэлектрических тепловых систем. В [6, 7] представлены гибридный фотоэлектрический коллектор термальной воды с различными фотоэлектрическими технологиями, фотоэлектрические тепловые системы и области их применения. В [8—10] даны описания разработанных конструкций фотоэлектрических тепловых батарей, выполнено сравнение характеристик установок с воздушными, водяными и гибридными коллекторами. В [11—13] авторы исследовали теплофотоэлектрические установки и системы мониторинга их работы. Рассмотрены вопросы теплоснабжения с использованием фотоэлектрических модулей. В [14—19] приведены разработки ряда технологий и установок в области фотоэлектрических тепловых батарей и результаты их исследования. Все перечисленные работы в области ФЭТБ выполнены, в основном, с модулями на кремниевой основе.

ФЭТБ представляет собой комбинацию фотоэлектрического модуля и тепловой батареи различных конструктивных исполнений. Ее использование, по сравнению с применением двух независимых гелиоустановок по отдельности, дает следующие преимущества:

- комбинированное производство электрической и тепловой энергии;
- экономию установочной площади и средств;
- снижение срока окупаемости;
- практичность использования.

Кроме того, понижение себестоимости установок и удельной стоимости за единицу производимой энергии — актуальная задача технологии фотоэлектрических тепловых установок. Всем предъявляемым требованиям может соответствовать ФЭТБ на основе модулей тонкопленочной технологии. Таким образом, цель настоящей работы заключается в разработке и создании конструкции ФЭТБ на основе CdTe тонкопленочного фотоэлектрического модуля и проведении экспериментальных исследований для изучения характеристик ФЭТБ.

### Описание созданной конструкции фотоэлектрической тепловой батареи

Задачи снижения температуры нагрева и, соответственно, повышения эффективности фотоэлектрических модулей можно решить посредством улучшения теплоотвода от модулей. Это непосредственно связано с теплопроводностью контактирующих материалов, используемых в качестве абсорберов. В целях практического изучения работы ФЭТБ авторами была разработана конструкция фотоэлектрической тепловой батареи с абсорбером в виде тепловой батареи коробчатого вида, изготовленной из алюминиевых листов с радиаторными трубками, размещенными внутри короба. Тепловая батарея прикреплена соответствующим

способом к тыльной поверхности ФЭМ тонкопленочного типа на основе теллурида кадмия. На данную конструкцию ФЭТБ подана заявка на получение патента полезной модели. Приведем результаты экспериментального изучения работы разработанной опытной конструкции ФЭТБ с абсорбером (рис. 1).

На тыльную сторону фотоэлектрического модуля 1 установлена тепловая батарея 2, покрытая теплоизоляционными материалами 3. Подача воды в батарею и выпуск нагретой воды из неё осуществляется по трубкам 4. Вся конструкция скреплена скобой и прикреплена к направляющим опорной конструкции.

Разработанная конструкция тепловой батареи в виде алюминиевого короба с теплообменными трубками в разрезе изображена на рис. 2. Размеры фотоэлектрического модуля — 1200×600×6,8 мм, тепловой батареи — 1200×600×15 мм, полезный объем батареи — 10 л. В качестве теплообменников внутри короба можно использовать алюминиевые трубы диаметром 8...10 мм и размещением с минимальным шагом на стенку короба.

Тепловая батарея 2, выполненная в виде алюминиевого короба, добавлена на тыльную сторону фотоэлектрического модуля 1. С наружной стороны она покрыта теплоизоляционными материалами 3, 4. Теплообменные трубы 5 — сквозные и прикреплены к внутренней стенке короба. Внутри короба и через сквозные теплообменные трубы циркулирует холодная вода. В процессе теплообмена происходит охлаждение фотоэлектрического модуля, и вместе с тем вырабатывается нагретая вода. Схема подачи холодной воды в ФЭТБ и аккумулирования нагретой воды дана на рис. 3.

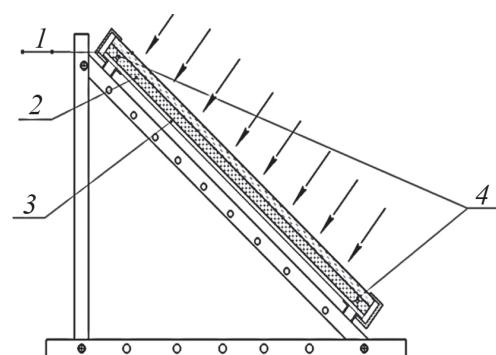


Рис. 1. ФЭТБ, вид с боковой стороны:

1 — фотоэлектрический модуль; 2 — тепловая батарея; 3 — теплоизоляционный материал; 4 — трубы для подачи и выпуска воды

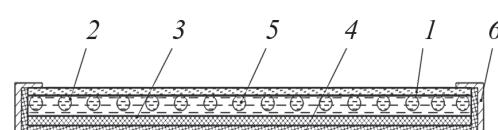


Рис. 2. Вид тепловой батареи в разрезе:

1 — фотоэлектрический модуль; 2 — тепловая батарея; 3, 4 — теплоизоляционные материалы; 5 — теплообменные трубы; 6 — крепление

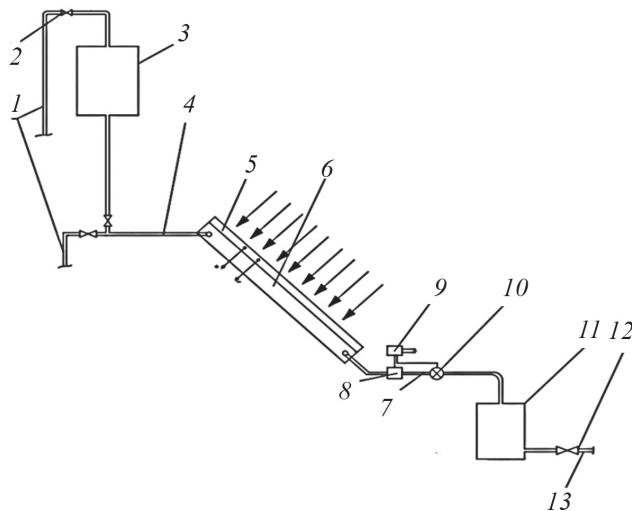


Рис. 3. Схема подачи холодной воды в ФЭТБ с автоматическим управлением выпуска и аккумулирования нагретой воды:

1 — трубопроводы для подачи воды; 2 — вентиль; 3 — накопительный бак холодной воды; 4 — трубка для подачи воды в батарею; 5 — фотоэлектрический модуль; 6 — тепловая батарея; 7 — трубка выпуска нагретой воды; 8 — термодатчик; 9 — термоконтроллер; 10 — электромагнитный клапан; 11 — аккумуляционный бак нагретой воды; 12 — вентиль; 13 — труба для передачи нагретой воды потребителю

Подача воды осуществляется из трубопровода холодной воды 1 через вентиль 2 в накопительный бак 3. Также возможна прямая подача воды из водопроводной сети по трубопроводу 1. Далее через трубку 4 вода попадает в тепловую батарею 6, прикрепленную к фотоэлектрическому модулю 5. При достижении верхней границы температуры нагрева по электрическому сигналу термоконтроллера открывается электромагнитный клапан, и вода из батареи по трубе 7 выливается в бак аккумулирования 11. Затем нагретая вода может использоваться потребителем. В зимний период вместо воды можно использовать органические теплоносители типа антифриз, пропиленгликоль или иные виды незамерзающих жидкостей. В этом случае система будет двухконтурной с теплообменным баком. Для дополнительного нагрева воды можно использовать электрический ТЭН (трубчатый электронагреватель) или тепловой насос.

#### Методы и материалы

Научно-исследовательские работы, как правило, проводят на основе теоретического, экспериментального исследований и изучения объектов в соответствующих конкретных условиях с выполнением расчетных и измерительных работ [20]. Для исследования характеристик ФЭМ и ФЭТБ выбран метод проведения натурных экспериментов в естественных условиях окружающей среды. При выборе методики авторы руководствовались существующими отраслевыми и

международными стандартами [21, 22]. В ходе опытов измерены следующие параметры и показатели:

- температура окружающего воздуха и скорость ветра;
- температура нагрева поверхности ФЭМ и ФЭТБ;
- солнечная радиация на поверхности ФЭМ и ФЭТБ;
- электрические характеристики ФЭМ и ФЭТБ;
- давление холодной воды в системе подачи воды в ФЭТБ;

- температура холодной воды на входе в ФЭТБ;
- температура нагретой воды на выходе из ФЭТБ;
- время нагрева воды в ФЭТБ;
- объем нагретой воды в мерной ёмкости;

Для получения параметров использованы следующие измерительные приборы:

- мультиметр UYIQAO UA78+ (замеры величины тока, напряжения);
- тепловизор FLIR E5 (определение температуры ФЭМ и ФЭТБ);
- анемометр UNI-T UT363 Mini (измерения скорости ветра и температуры воздуха);
- пиранометр Solar Power Meter Di-LOG SL101 (измерения солнечной радиации);
- манометр давления (измерения давления воды);
- термометр с выносным датчиком (измерения температуры воздуха и воды).

Объект экспериментального исследования — ФЭМ и ФЭТБ тонкопленочной структуры на основе CdTe.

Для проведения натурных экспериментов на гелиополигоне кафедры автоматики и электроники Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова были установлены ФЭМ и ФЭТБ на основе CdTe под углом наклона 40° к горизонту с южной ориентацией (рис. 4).

Целью проведения эксперимента стало измерение, сравнение и сопоставление характеристик и параметров ФЭМ и ФЭТБ, особенно:

- влияние температуры окружающей среды, скорости ветра, плотности потока солнечной радиации на нагрев модулей и характеристики ФЭМ и ФЭТБ;

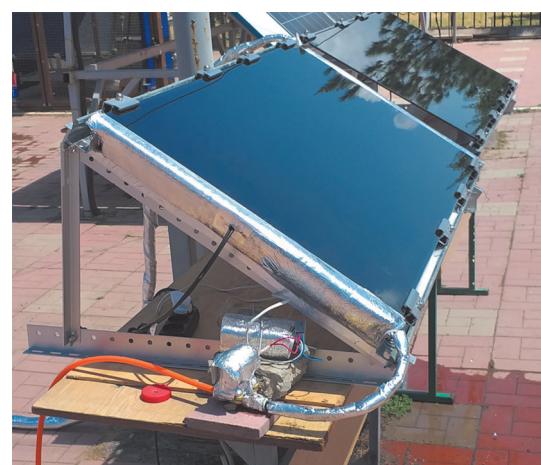


Рис. 4. Фото экспериментальной установки

- воздействие охлаждения тыльной стороны модуля на его характеристики;
- возможность получения нагретой воды с помощью ФЭТБ с применением разработанной тепловой батареи в виде алюминиевого радиатора.

### Описание объекта исследования

Фотоэлектрический модуль тонкопленочной структуры на основе CdTe — модуль габаритными размерами  $1200 \times 600$  мм с креплениями на металлической опорной конструкции.

Фотоэлектрическая тепловая батарея (ФЭТБ) состоит из фотоэлектрического модуля размером  $1200 \times 600$  мм с прикрепленной на тыльную сторону тепловой батареей конструктивного вида «алюминиевый короб с теплообменными трубками» (алюминиевый радиатор) с утеплением теплоизоляционными материалами.

### Результаты и обсуждения

Экспериментальные замеры параметров проходили 4 и 6 августа 2022 г. с 10:00 до 17:30 ч дня с повтор-

ряемостью в каждые полчаса. Полученные значения плотности потока солнечной радиации, температуры воздуха, скорости ветра изображены на рис. 5. Плотность потока солнечной радиации на поверхности ФЭМ и ФЭТБ составила  $713 \text{ Вт/м}^2$  — в 12:30, и  $181 \text{ Вт/м}^2$  — в 17:30. Среднедневная температура воздуха —  $35^\circ\text{C}$ , а скорость ветра — 1 м/с.

На рисунках 6, 7 даны графики изменения значений  $U_{xx}$  и  $I_{k3}$  для ФЭМ и ФЭТБ. В 10:00 утра напряжение холостого хода ФЭМ под воздействием температуры снизилось и составило  $105,7 \text{ В}$ , а  $U_{xx}$  ФЭТБ было равно  $107,3 \text{ В}$ , по сравнению с номинальным напряжением холостого хода ( $122 \text{ В}$ , табл. 1), измеренным по условиям STC. Паспортные данные исследуемого модуля, согласно данным производителя, приведены в табл. 1.

Значения тока короткого замыкания  $I_{k3}$  и напряжения холостого хода  $U_{xx}$  фотоэлектрического модуля в зависимости от температуры нагрева модуля рассчитаны по следующим формулам [23]:

$$I_{k3} = \frac{W}{W_{STC}} I_{k3STC} [1 + \alpha (T_m - T_{STC})]; \quad (1)$$

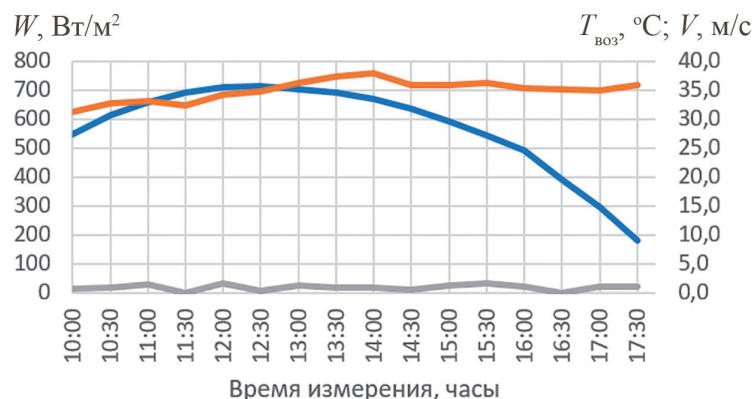


Рис. 5. Графики изменения значения солнечной радиации  $W$ , температуры воздуха  $T_{bos}$  и скорости ветра  $V$  в течение дня:

—  $W$ , Вт/м<sup>2</sup>; —  $T_{bos}$ , °C; —  $T_{bos}$ , °C

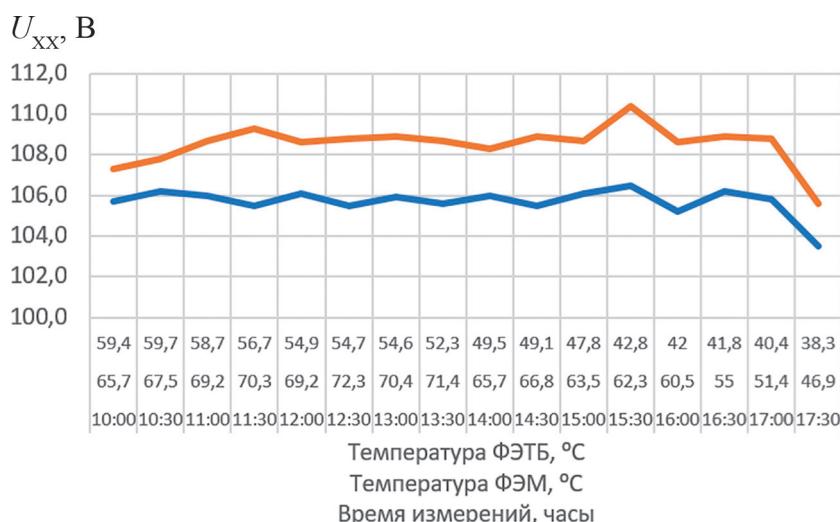


Рис. 6. Графики изменения значений напряжения холостого хода в течение дня в зависимости от температуры ФЭМ и ФЭТБ:

—  $U_{xx_{ФЭТБ}}$ , В; —  $U_{xx_{ФЭМ}}$ , В

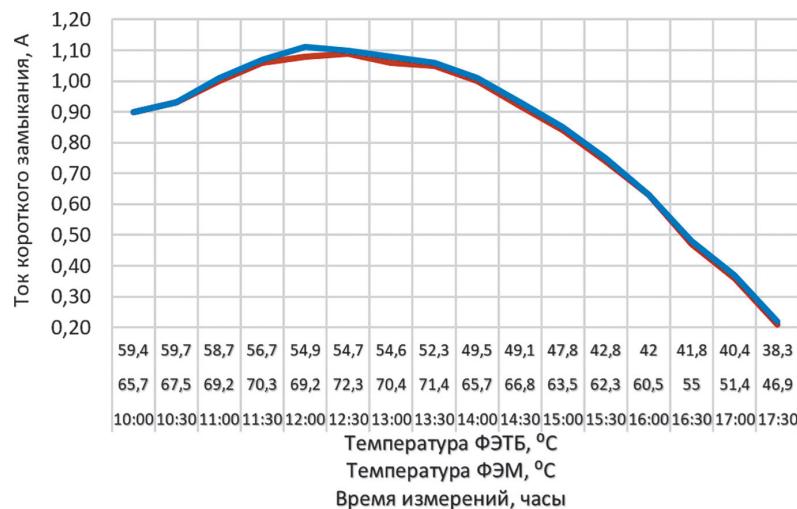


Рис. 7. Графики изменения значений тока короткого замыкания в течение дня в зависимости от температуры ФЭМ и ФЭТБ:

—  $I_{k3ФЭМ}$ , А; —  $I_{k3ФЭТБ}$ , А

Таблица 1

#### Паспортные данные исследуемого модуля

Тип и марка модуля	Номинальные значения при условиях STC: 1000 Вт/м <sup>2</sup> , 25 °C, AM1,5				
	Электрические характеристики				
	напряжение холостого хода $U_{xx}$ , В	напряжение при максимальной мощности $U_{max}$ , В	ток короткого замыкания $I_{k3}$ , А	ток при максимальной мощности $I_{max}$ , А	мощность $P_u$ , Вт
Тонкопленочный на основе CdTe, ASP-S1-90	122	96	1,06	0,94	90
	Температурные характеристики				
	Температурный коэффициент			Рабочий температурный диапазон модуля, °C	
	по $I_{k3}$ , $\alpha\%/\text{°C}$	по $U_{xx}$ , $\beta\%/\text{°C}$	по $P_u$ , $\gamma\%/\text{°C}$		
	0,060	-0,321	-0,214	от -40 до +85	

$$U_{xx} = U_{xxSTC} \left[ 1 + \beta (T_m - T_{STC}) \right] \left[ 1 + \delta \ln \frac{W}{W_{STC}} \right], \quad (2)$$

где  $W$  — плотность потока солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>;  $W_{STC}$  — плотность потока солнечной радиации в лабораторных условиях STC испытания, 1000 Вт/м<sup>2</sup>;  $I_{k3STC}$  — ток короткого замыкания модуля по STC;  $U_{xxSTC}$  — напряжение холостого хода модуля по STC;  $T_m$  — температура модуля в условиях окружающей среды;  $T_{STC}$  — температура модуля по STC, 25 °C;  $\delta$  — угол склонения солнца по отношению к экватору, измеряемый в градусах и вычисляемый по эмпирической формуле Купера [24]:

$$\delta = 23,45 \sin \left( 360 \frac{(284 + n)}{365} \right), \quad (3)$$

где  $n$  — номер дня года ( $0 \leq n \leq 365$ ) (для измеренной даты значение  $n = 228$ ).

По (3) найдем значение  $\delta$  и получим 13,45°, что составляет 0,235 радиан.

По паспортным данным температурных коэффициентов и формулам (1), (2) вычислим значения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода при изменении температуры модуля в пределах от 60 до 85 °C. Расчетные значения данных параметров добавим в табл. 2. По данным табл. 2 построим графические зависимости указанных параметров (рис. 8, 9).

Из данных рис. 8, 9 следует, что с ростом температуры нагрева модуля значения тока короткого замыкания

Таблица 2

#### Значения параметров модуля

Температура модуля, °C	Ток короткого замыкания $I_{k3}$ , А	Напряжение холостого хода $U_{xx}$ , В
60	0,59	94,4
65	0,67	94,3
70	0,72	94,1
75	0,76	93,6
80	0,78	92,4
80	0,79	90,7

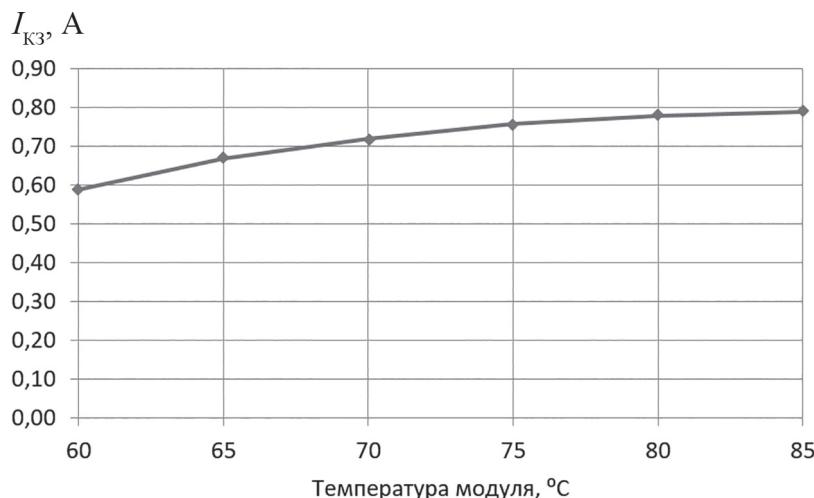


Рис. 8. График изменения значения тока короткого замыкания  $I_{K3}$  в зависимости от температуры нагрева модуля

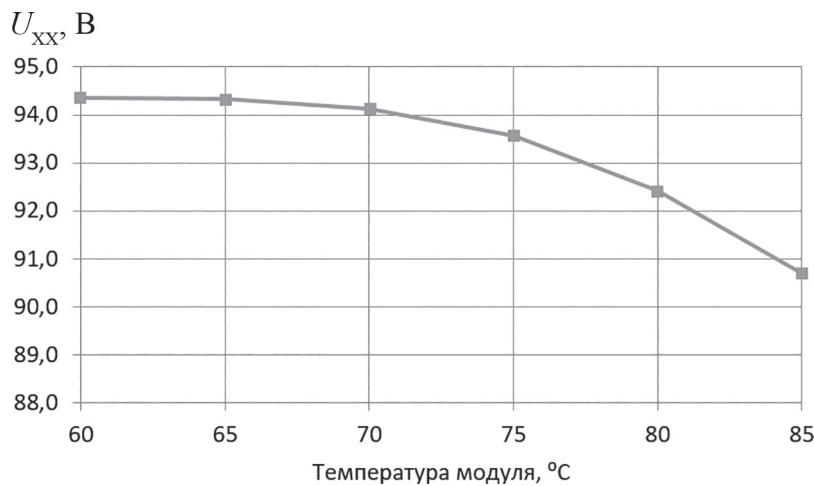


Рис. 9. График изменения значения напряжения холостого хода  $U_{XX}$  в зависимости от температуры нагрева модуля

кания увеличиваются, а напряжения холостого хода — уменьшаются.

На рисунке 10 представлены графики изменения температур ФЭМ и ФЭТБ. Из графиков видно, что за счет циркуляции воды в тепловой батарее произошло значительное падение температуры модуля ФЭТБ.

Рассмотрим изменения мощности установок при подсчете  $k$  — коэффициента заполнения вольт-амперной характеристики (ВАХ) ФЭТБ и ФЭМ по фактически измеренным в течение дня максимальным значениям напряжения холостого хода и тока короткого замыкания, а также напряжения и тока в точке максимальной мощности [25]:

$$k_{\text{ФЭТБ}} = \frac{U_{\max} I_{\max}}{U_{XX} I_{K3}} = \frac{84,51 \cdot 0,91}{108,9 \cdot 1,08} = 0,65; \quad (4)$$

$$k_{\text{ФЭМ}} = \frac{U_{\max} I_{\max}}{U_{XX} I_{K3}} = \frac{81,54 \cdot 0,86}{105,9 \cdot 1,06} = 0,62.$$

Используя измеренные значения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода, вычислим мощности ФЭТБ и ФЭМ:

$$P_{\text{ФЭТБ}} = U_{XX_{\text{ФЭТБ}}} I_{K3_{\text{ФЭТБ}}} k_{\text{ФЭТБ}}; \quad (5)$$

$$P_{\text{ФЭМ}} = U_{XX_{\text{ФЭМ}}} I_{K3_{\text{ФЭМ}}} k_{\text{ФЭМ}}.$$

На основании рассчитанных значений мощностей ФЭТБ и ФЭМ, согласно (4), (5), построим графическую зависимость по времени дня (рис. 11).

Мощность модуля  $P_u$  по измеренным значениям напряжения холостого хода и тока короткого замыкания для сравнения определим по следующей эмпирической формуле [25]:

$$P_u = U_{XX_u} I_{K3_u} k, \quad (6)$$

где  $U_{XX_u}$ ,  $I_{K3_u}$  — фактически измеренные значения напряжения холостого хода и тока короткого замыкания исследуемого модуля;  $k$  — коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики, вычисляемый как отношение номинальной мощности модуля к произведению номинальных значений  $U_{XX_u}$  и  $I_{K3_u}$ , значения которых берутся по паспорту производителя модуля согласно STC:



Рис. 10. Графики изменения температуры ФЭМ и ФЭТБ в течение дня:

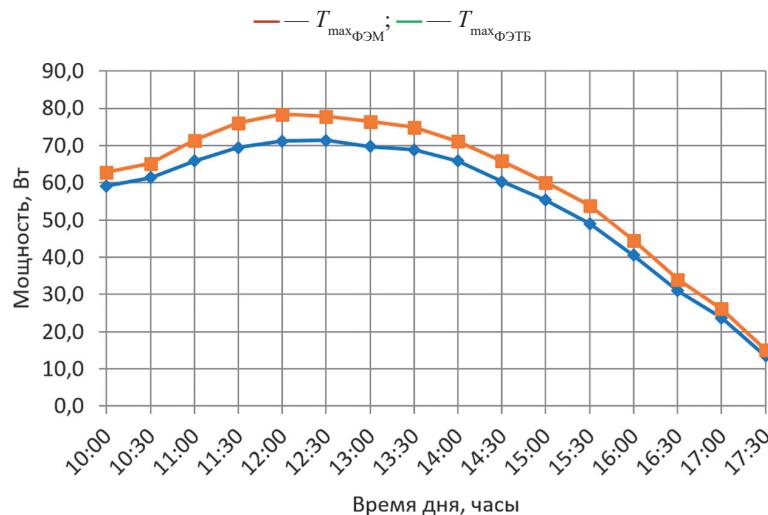


Рис. 11. Графики изменения мощностей ФЭМ (◆) и ФЭТБ (■) в течение дня по фактическому коэффициенту заполнения ВАХ:

$$k = P_{\text{н}} / (U_{\text{XX}} I_{\text{K3}}). \quad (7)$$

Рассчитаем по (7) коэффициент заполнения ВАХ для исследуемого модуля по номинальным значениям соответствующих величин согласно паспорту производителя модуля:

$$k = 90 / (122 \cdot 1,06) = 0,7.$$

Следовательно, изменения величины мощности  $P_{\text{н}}$  фотоэлектрических модуля и тепловой батареи, полученные по (6) и экспериментально измеренным значениям напряжения холостого хода и тока короткого замыкания, даны в виде графиков на рис. 12.

Изменение значений мощности описывается полиномиальным уравнением второй степени с коэффициентом достоверности  $R^2 = 0,99$ . На рисунках 13, 14 продемонстрированы диаграммы зависимости объема нагретой воды от времени нагрева холодной воды в тепловой батарее и изменения температуры воды за счет теплопередачи от модуля на теплоноситель.

Анализ данных на рис. 13 показал, что за световой день (с 10:00 до 17:30) выработано в общем объеме

134 л нагретой воды средней температурой 38 °C. По данным рис. 14 видна динамика увеличения температуры воды в тепловой батарее в течение дня. Для анализа влияния теплоотвода посредством тепловой батареи выполнено сопоставление измеренных данных (табл. 3, 4).

Как следует из табл. 3, 4, средние значения напряжения холостого хода ФЭТБ увеличились на 2,3 и 1,5% относительно значений  $U_{\text{XX}}$  и  $I_{\text{K3}}$  ФЭМ. Температура поверхности ФЭТБ упала в среднем на 13,8 °C или на 21,5% относительно температуры ФЭМ. Среднее значение мощности ФЭТБ по измеренным значениям  $U_{\text{XX}}$  и  $I_{\text{K3}}$  и фактическому коэффициенту заполнения вольт-амперной характеристики выросло на 5,0 Вт или на 9,2% по сравнению с мощностью ФЭМ.

### Заключение

При изучении ФЭТБ на основе CdTe тонкопленочного фотоэлектрического модуля с абсорбером в виде тепловой батареи из алюминиевых листов были проведены измерения входных внешних параметров, выходных характеристик и теплофизических параметров

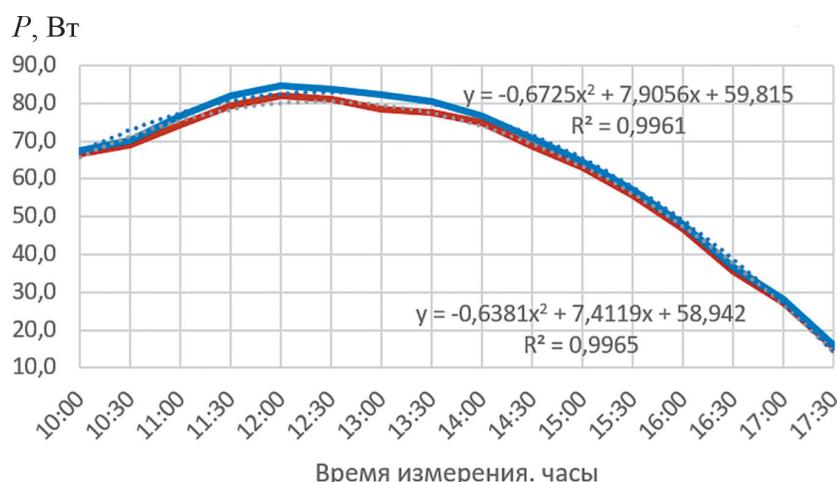


Рис. 12. Графики изменения мощностей ФЭМ и ФЭТБ в течение дня по значению коэффициента заполнения ВАХ согласно STC:  
—  $P_{n_{ФЭМ}}$ ; —  $P_{n_{ФЭТБ}}$ ; ..., ..... — полиномиальные  $P_{n_{ФЭМ}}$  и  $P_{n_{ФЭТБ}}$



Рис. 13. Диаграмма зависимости объема нагретой воды от времени нагрева холодной воды

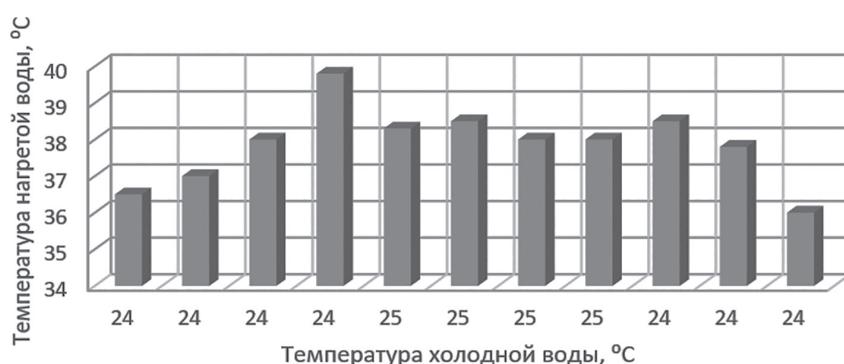


Рис. 14. Диаграмма изменения температуры воды

Таблица 3

## Сопоставление измеренных параметров в дневные часы

Параметры	10:00				12:00			
	ФЭМ	ФЭТБ	Отклонение	Процент изменения	ФЭМ	ФЭТБ	Отклонение	Процент изменения
$U_{xx}$ , В	105,7	107,3	1,6	1,5	106,1	108,6	2,5	2,4
$I_{K3}$ , А	0,9	0,9	0	0	1,08	1,11	0,03	3,6
$W$ , Вт/м <sup>2</sup>	548	548	0	0	711	711	0	0
$T_{bos}$ , °C	31,2	31,2	0	0	34,2	34,2	0	0
$V$ , м/с	0,8	0,8	0	0	1,7	1,7	0	0
$T_{maxim}$ , °C	65,7	59,4	-6,3	-9,8	69,2	54,9	-14,3	-22,3
$P$ , Вт	59,1	62,8	3,7	6,8	71,2	78,4	7,2	13,1

Таблица 4

## Сопоставление измеренных параметров в дневные часы

Параметры	14:00				16:00				Среднее отклонение	Процент отклонения
	ФЭМ	ФЭТБ	Отклонение	Процент изменения	ФЭМ	ФЭТБ	Отклонение	Процент изменения		
$U_{xx}$ , В	106	108,3	2,3	2,2	105,2	108,6	3,4	3,2	2,5	2,3
$I_{K3}$ , А	1	1,01	0,01	1,2	0,62	0,63	0,01	1,2	0,01	1,5
$W$ , Вт/м <sup>2</sup>	669	669	0	0	490	490	0	0	0	0
$T_{bos}$ , °C	37,9	37,9	0	0	35,4	35,4	0	0	0	0
$V$ , м/с	1	1	0	0	1,1	1,1	0	0	0	0
$T_{maxim}$ , °C	65,7	49,5	-16,2	-25,2	60,5	42	-18,5	-28,8	-13,8	21,5
$P$ , Вт	65,9	71,1	5,2	9,5	40,5	44,5	4	7,3	5	9,2

ФЭТБ и ФЭМ. Анализ экспериментально измеренных данных за световой день 06.08.2022 г. с 10:00 до 17:30 показал рост значений энергетических параметров разработанной конструкции ФЭТБ. С помощью ФЭТБ площадью 0,7 м<sup>2</sup> за 7,5 ч получен объём нагретой воды в 134 л (см. рис. 13), средней температурой 38 °C. За счет снижения температуры модуля посредством теплоотвода электрическая мощность ФЭТБ увеличилась в среднем на 5,8% по сравнению с мощностью ФЭМ (см. табл. 4).

В дальнейших исследованиях планируется отработать и нормировать технические и конструктивные па-

раметры ФЭТБ с тепловой батареей для изготовления промышленного образца. Научной новизной экспериментальной установки стали разработка конструкции с отличительными материалами и их компоновкой, автоматический режим технологического процесса и применение фотоэлектрического тонкопленочного модуля на основе теллурида кадмия.

Практической ценностью и новизной созданной модели являются отличительный конструктивный вид, материал, мобильность установки и съёма тепловой батареи, удобство монтажа, автоматизация технологического процесса работы.

## Литература

1. **Каргиеев В.М.** Новейшие технологии солнечных элементов и модулей [Электрон. ресурс] <https://www.solarhome.ru/basics/solar/pv/modern-solar-cells.htm> (дата обращения 25.12.2022).

2. **Chow T.T.** A Review on Photovoltaic/thermal Hybrid Solar Technology // Appl. Energy. 2010. V. 87. Pp. 365—379.

3. **Haloui H. e. a.** Comparative Study of the Hybrid Solar Thermal Photovoltaic Collectors Based on Thin Films Solar Cells in South of Algeria // Res Rev Electrochem. 2017. V. 8(2). Pp. 109—122.

## References

1. **Kargiev V.M.** Noveyshie Tekhnologii Solnechnykh Elementov i Moduley [Elektron. Resurs] <https://www.solarhome.ru/basics/solar/pv/modern-solar-cells.htm> (Data Obrashcheniya 25.12.2022). (in Russian).

2. **Chow T.T.** A Review on Photovoltaic/thermal Hybrid Solar Technology. Appl. Energy. 2010;87: 365—379.

3. **Haloui H. e. a.** Comparative Study of the Hybrid Solar Thermal Photovoltaic Collectors Based on Thin Films Solar Cells in South of Algeria. Res Rev Electrochem. 2017;8(2):109—122.

4. **Olawole O.C. e. a.** Innovative Methods of Cooling Solar Panel: A Concise Review // J. Phys. Conf. Series. 2019. V. 1299(1). P. 012020.
5. **Zain Ul Abdin, Ahmed Rachid.** A Survey on Applications of Hybrid PV/T Panels // Energies. 2021. V. 14(4). P. 1205.
6. **Mishra R.K., Tiwari G.N.** Energy Matrices Analyses of Hybrid Photovoltaic Thermal Water Collector with Different PV Technology // Solar Energy. 2013. V. 91. Pp. 161—173.
7. **Tiwari G.N., Gaur A.** Photovoltaic Thermal (PVT) Systems and Its Applications // Proc II Intern. Conf. Green Energy and Technol. 2014. Pp. 132—138.
8. **Strebkov D.S., Filippchenkova N.S.** Results of an Experimental Study of a Solar Photovoltaic-Thermal Module // Appl. Solar Energy. 2020. V. 56. Pp. 442—448.
9. **Fudholi A. e. a.** Performance Analysis of Photovoltaic Thermal (PVT) Water Collectors // Energy Conversion and Management. 2014. V. 78. Pp. 641—651.
10. **Kazema H.A. e. a.** Comparison and Evaluation of Solar Photovoltaic Thermal System with Hybrid Collector: An Experimental Study // Thermal Sc. and Eng. Progress. 2021. V. 22. P. 100845.
11. **Sukhatme K., Sukhatme S.P.** Solar Energy: Principles of Thermal Collection and Storage. N.-Y.: Tata McGraw Hill, 1996.
12. **Кувшинов В.В., Бекиров Э.А.** Теплофотоэлектрическая установка для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии // Строительство и техногенная безопасность. 2019. № 15(67). С. 141—147.
13. **Харченко В.В., Никитин Б.А., Тихонов П.В., Макаров А.Э.** Теплоснабжение с использованием фотоэлектрических модулей // Техника в сельском хозяйстве. 2013. № 5. С. 11—12.
14. **Харченко В.В.** Комплекс мониторинга основных параметров гелиоустановок с фотопреобразователями // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 2(119). С. 32—36.
15. **Турсунов М.Н., Юлдошев И.А.** Разработка фотоэлектрических батарей, установок эффективно работающих в условиях Центральной Азии // Проблемы энергоресурсосбережения. 2011. Специальный выпуск. С. 160—165.
16. **Турсунов М.Н., Дадамухамедов С., Юлдошев И.А., Турдиев Б.М.** Комбинированная фототеплопреобразовательная установка // Нанотехнологии и возобновляемые источники энергии: Материалы республ. науч.-практ. конф. Ташкент, 2012. С. 173—175.
17. **Tursunov M. e. a.** Features of Optimization of Increasing the Efficiency of on Autonomous Photo Thermal Installation for Rural Regions // Proc. E3s Web of Conf. 2020 [Электрон. ресурс] [https://www.academia.edu/99201016/Features\\_of\\_optimization\\_of\\_increasing\\_the\\_efficiency\\_of\\_an\\_autonomous\\_photo\\_thermal\\_installation\\_for\\_rural\\_regions](https://www.academia.edu/99201016/Features_of_optimization_of_increasing_the_efficiency_of_an_autonomous_photo_thermal_installation_for_rural_regions) (дата обращения 25.12.2022).
4. **Olawole O.C. e. a.** Innovative Methods of Cooling Solar Panel: A Concise Review. J. Phys. Conf. Series. 2019;1299(1):012020.
5. **Zain Ul Abdin, Ahmed Rachid.** A Survey on Applications of Hybrid PV/T Panels. Energies. 2021;14(4): 1205.
6. **Mishra R.K., Tiwari G.N.** Energy Matrices Analyses of Hybrid Photovoltaic Thermal Water Collector with Different PV Technology. Solar Energy. 2013; 91:161—173.
7. **Tiwari G.N., Gaur A.** Photovoltaic Thermal (PVT) Systems and Its Applications. Proc II Intern. Conf. Green Energy and Technol. 2014:132—138.
8. **Strebkov D.S., Filippchenkova N.S.** Results of an Experimental Study of a Solar Photovoltaic-Thermal Module. Appl. Solar Energy. 2020;56: 442—448.
9. **Fudholi A. e. a.** Performance Analysis of Photovoltaic Thermal (PVT) Water Collectors. Energy Conversion and Management. 2014;78: 641—651.
10. **Kazema H.A. e. a.** Comparison and Evaluation of Solar Photovoltaic Thermal System with Hybrid Collector: An Experimental Study. Thermal Sc. and Eng. Progress. 2021;22:100845.
11. **Sukhatme K., Sukhatme S.P.** Solar Energy: Principles of Thermal Collection and Storage. N.-Y.: Tata McGraw Hill, 1996.
12. **Kuvshinov V.V., Bekirov E.A.** Teplofotoelektricheskaya Ustanovka dlya Kombinirovannoy Vyrabotki Teplovoy i Elektricheskoy Energii. Stroitel'stvo i Tekhnogenaya Bezopasnost'. 2019;15(67):141—147. (in Russian).
13. **Kharchenko V.V., Nikitin B.A., Tikhonov P.V., Makarov A.E.** Teplosnabzhenie s Ispol'zovaniem Fotoelektricheskikh Moduley. Tekhnika v Sel'skom Khozyaystve. 2013;5:11—12. (in Russian).
14. **Kharchenko V.V.** Kompleks Monitoringa Osnovnykh Parametrov Gelioustanovok s Fotopreobrazovatelyami. Al'ternativnaya Energetika i Ekologiya. 2013; 2(119):32—36. (in Russian).
15. **Tursunov M.N., Yuldashev I.A.** Razrabotka Fotoelektricheskikh Batarey, Ustanovok Effektivno Rabotayushchikh v Usloviyakh Tsentral'noy Azii. Problemy Energoresursosberezheniya. 2011. Spetsial'nyy Vypusk:160—165. (in Russian).
16. **Tursunov M.N., Dadamukhamedov C., Yuldashev I.A., Turdiev B.M.** Kombinirovannaya Fototeplopereobrazovatel'naya Ustanovka. Nanotekhnologii i Vozobnovlyayemye Istochniki Energii: Materialy Respabl. Nauch.-prakt. Konf. Tashkent, 2012:173—175. (in Russian).
17. **Tursunov M. e. a.** Features of Optimization of Increasing the Efficiency of on Autonomous Photo Thermal Installation for Rural Regions. Proc. E3s Web of Conf. 2020 [Elektron. Resurs] [https://www.academia.edu/99201016/Features\\_of\\_optimization\\_of\\_increasing\\_the\\_efficiency\\_of\\_an\\_autonomous\\_photo\\_thermal\\_installation\\_for\\_rural\\_regions](https://www.academia.edu/99201016/Features_of_optimization_of_increasing_the_efficiency_of_an_autonomous_photo_thermal_installation_for_rural_regions) (Data Obrashcheniya 25.12.2022).

18. **Shoguchkarov S.K. e. a.** Verification of Mathematical Model for a Photovoltaic Thermal-Thermoelectric Generator Unit Using Concentrated Solar Radiation // Appl. Solar Energy. 2021. V. 57(5). Pp. 384—390.
19. **Tursunov M.N., Muminov R.A., Dyskin V.G., Yuldashev I.A.** A Mobile Photothermal Converter and Its Operating Characteristics // Appl. Solar Energy. 2021. V. 49(1). Pp. 16—18.
20. **Пономарев А.Б., Пикулева Э.А.** Методология научных исследований. Пермь: Изд-во Пермского национал. исслед. политех. ун-та, 2014.
21. **ГОСТ 58649—2019 (IEC 61829.2015).** Батареи фотоэлектрические, измерения вольтамперных характеристик в натурных условиях.
22. **ГОСТ Р МЭК 61853-1—2013.** Модули фотоэлектрические. Определение рабочих характеристик и энергетическая оценка.
23. **Honglu Zhu e. a.** Online Modelling and Calculation for Operating Temperature of Silicon-Based PV Modules Based on BP-ANN // Intern. J. Photoenergy. 2017. V. 11. Pp. 1—13.
24. **Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнеццов В.А., Малинин Н.К.** Солнечная энергетика. М., Издат. дом МЭИ, 2008.
25. **Способы измерения мощности солнечных батарей** [Электрон. ресурс] <https://www.solnechnye.ru/batareya> (Дата обращения 07.08.2022).
18. **Shoguchkarov S.K. e. a.** Verification of Mathematical Model for a Photovoltaic Thermal-Thermoelectric Generator Unit Using Concentrated Solar Radiation. Appl. Solar Energy. 2021;57(5):384—390.
19. **Tursunov M.N., Muminov R.A., Dyskin V.G., Yuldashev I.A.** A Mobile Photothermal Converter and Its Operating Characteristics. Appl. Solar Energy. 2021; 49(1):16—18.
20. **Ponomarev A.B., Pikuleva E.A.** Metodologiya Nauchnykh Issledovaniy. Perm': Izd-vo Permskogo Na-tsion. Issled. Politekh. Un-ta, 2014. (in Russian).
21. **GOST 58649—2019 (IEC 61829.2015).** Batarei Fotoelektricheskie, Izmereniya Vol'tampernykh Kharakteristik v Naturnykh Usloviyakh. (in Russian).
22. **GOST R MEK 61853-1—2013.** Moduli Fotoelektricheskie. Opredelenie Rabochikh Kharakteristik i Energeticheskaya Otsenka. (in Russian).
23. **Honglu Zhu e. a.** Online Modelling and Calculation for Operating Temperature of Silicon-Based PV Modules Based on BP-ANN. Intern. J. Photoenergy. 2017;11: 1—13.
24. **Vissarionov V.I., Deryugina G.V., Kuznetsov V.A., Malinin N.K.** Solnechnaya Energetika. M., Izdat. Dom MEI, 2008. (in Russian).
25. **Sposoby Izmereniya Moshchnosti Solnechnykh Batarey** [Elektron. Resurs] <https://www.solnechnye.ru/batareya> (Data obrashcheniya 07.08.2022). (in Russian).

#### Сведения об авторах:

**Жураев Ислом Рахматович** — соискатель, научный сотрудник Ташкентского государственного технического университета им. И. Каримова, Узбекистан, e-mail: nauka-jir@mail.ru

**Юлдошев Исройл Абриевич** — доктор технических наук, профессор Ташкентского государственного технического университета им. И. Каримова, Узбекистан

**Жураева Зухра Исламовна** — ассистент Ташкентского государственного технического университета им. И. Каримова, Узбекистан

#### Information about authors:

**Zhuraev Islom R.** — Applicant, Research Assistant of Tashkent State Technical University Named After I. Karimov, Uzbekistan, e-mail: nauka-jir@mail.ru

**Yuldashev Isroi A.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Tashkent State Technical University Named After I. Karimov, Uzbekistan

**Zhuraeva Zukhra I.** — Assistant of Tashkent State Technical University Named After I. Karimov, Uzbekistan

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 24.11.2022

**The article received to the editor:** 24.11.2022

**Статья принята к публикации:** 06.06.2023

**The article has been accepted for publication:** 06.06.2023