

УДК 621.383; 621.472(575.4)

DOI: 10.18413/2409-1634-2016-2-4-46-52

Пенджиев А. М.  
Астанов Н. Г.

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ МОБИЛЬНОЙ СОЛНЕЧНОЙ  
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ В ЗАВИСИМОСТИ  
ОТ ОРИЕНТАЦИИ НА СОЛНЦЕ**

Туркменский государственный архитектурно-строительный институт, 4/1 Гунеш, м. Бекрова, Ашхабат-32, 744032, Туркменистан, [ampenjiev@rambler.ru](mailto:ampenjiev@rambler.ru)

**Аннотация**

В статье приводятся результаты расчетов математической модели (теоретические) и экспериментальных исследований вольт-амперной и ватт-амперной характеристики режимов работы солнечной мобильной фотоэлектрической станции в зависимости от внутренних и внешних факторов, степени ориентации на Солнце в аридной среде Туркменистана.

**Ключевые слова:** солнечная мобильная станция, фотоэлектрический преобразователь, математическая модель, системы слежения за Солнцем, вольт и ваттные амперные характеристики, Туркменистан.

Akhmet M. Penjiyev  
Nepes G. Astanov

**POWER EFFICIENCY OF THE MOBILE SOLAR PHOTO-ELECTRIC  
STATION DEPENDING ON ORIENTATION TO THE SUN**

Turkmen State Institute of Architecture and Construction (Ashgabat, Turkmenistan), [ampenjiev@rambler.ru](mailto:ampenjiev@rambler.ru)

**Abstract**

The article provides the results of calculations of the mathematical model (theoretical) and experimental researches of the volt-ampere and watt-ampere characteristics of operating modes of the solar mobile photo-electric station depending on internal and external factors, degrees of orientation to the Sun in the arid environment of Turkmenistan.

**Keywords:** solar mobile station; the photo-electric converter; mathematical model; systems of tracking the Sun; volt and watt ampere characteristics; Turkmenistan

**Введение**

В своем обращении Президент Туркменистана Гурбангулы Бердмухамедов к участникам Международной научной конференции «Инновационные технологии в использовании возобновляемых источников энергии» в декабре 2014 года сказал: «Туркменистан - государство, обладающее огромными запасами наземных и подземных богатств, углеводородных и горно-минеральных ресурсов, богатое на солнечную энергию и пустынный песок, имеющий в своем составе кремний. Наша главная задача - рациональное использование этих богатств, сохранение их для будущих поколений, производство из песка Каракумов и экспорт на мировые рынки кремния, являющегося базовым химическим элементом для создания оборудования, позволяющего получать экологически чистую электроэнергию» [1].

Для повышения энергетической эффективности и обеспечения наибольшего прихода солнечной радиации на рабочую поверхность существуют рекомендации по ориентации наземных стационарных солнечных установок (СУ) в зависимости от широты местности и времени года.

Целью данной статьи является показать экономическую эффективность использования СУ возможности повышения и применения систем слежения за Солнцем, которые позволят увеличить выходную мощность ФЭП и дневной интервал генерирования электрической энергии. С применением системы слежения за Солнцем с частичной (азимутальной) или полной (азимутальной и зенитальной) ориентацией [10-12].

Научная новизна заключается в том, что авторы приводят свои обоснованные результаты экспериментальных исследований и теоретических расчетов в области экономий энергетической эффективности энергоресурсов с использованием солнечной энергии в зависимости от ориентации солнечных энергетических установок и станций.

**Исследования математической модели**

Наиболее эффективным методом исследования СУ является имитационное моделирование, позволяющее по сравнению с натурными экспериментами учесть влияние на энергетические характеристики СУ большого числа параметров и сократить затраты времени и средств на проведение необходимых расчетов и исследований.

В основу математического моделирования была заложена классическая модель

фотопреобразователя с  $p-n$  переходом [11]:

$$U = \frac{A \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \left[ \frac{(J_{\phi} - J)}{J_o} + 1 \right] - JR, \quad (1)$$

где  $U$  - напряжение, В;  $k$  - постоянная Больцмана;  $T$  - рабочая температура ФЭП, К;  $q$  - заряд электрона;  $J_{\phi}$  - фототок, пропорциональный интенсивности солнечного излучения  $I$ , падающего на поверхность ФЭП, ( $J_{\phi}/I = \text{const}$ ) А/см<sup>2</sup>;  $J$  - ток, А/см<sup>2</sup>;  $J_o$  - обратный ток насыщения, определяемый свойствами исходного полупроводника, определялся из выражения (1) при условии  $J=0$  и  $U=U_{xx}$ , А/см<sup>2</sup>;  $R$  - внутреннее электрическое сопротивление, Ом/см<sup>2</sup>;  $A$  - безразмерный параметр кривизны вольт-амперной характеристики (ВАХ),  $A = 1 \dots 2$ .

Для исследования режимов работы СУ с ФЭП была разработана математическая модель, реализованная в программной среде. В целях ее апробации построены ВАХ и вольт-ваттная характеристика (ВВХ), для модуля ФЭП состоящего из параллельно соединенных блоков при стандартных условиях освещения  $AM1_{I_0}=1000$  Вт/м<sup>2</sup> и рабочей температуре. Фотоэлементы из монокристаллического кремния имеют следующие характеристики:  $J_{окз}=2,74$  А/м<sup>2</sup>;  $U_{xx}=22$ В;  $R=1$  Ом·см<sup>2</sup>; площадь  $S=0,3792$  м<sup>2</sup>. Фотоэлектрический модуль, по паспортным данным, выдает максимальную мощность  $P_{max}=49,4$  Вт,  $U_{xx}=20,6$  В,  $I_{кз}=2,4$ А, оптимальное рабочее напряжение  $U_{опт}=16,3$ В ток  $J_{опт}=2,75$  А мощность  $P_{опт}=44,8$  Вт.

Как видно из рис. 1 (а), полученные теоретические расчеты вольт-амперных характеристик (ВАХ) математической модели совпадают с паспортными данными, что подтверждает адекватность разработанной модели.

Однако реальные характеристики ФЭП значительно отличаются от стандартных, вследствие изменения параметров внешней среды (интенсивности солнечного излучения и температуры воздуха), которые зависят от географического положения предполагаемой эксплуатации установки, времени года, суток и степени ориентации СУ на Солнце.

Влияние изменения интенсивности солнечного излучения и рабочей температуры на ВАХ ФЭП, можно записать в виде выражений [5-9,11]:

$$J_{K.3.} = J_{o_{K.3.}} + \Delta J_I + \Delta J_T; \quad (2)$$

$$U_{XX} = U_{o_{XX}} + \Delta U_{I1} + \Delta U_{I2} + \Delta U_T, \quad (3)$$

где  $J_{o_{кз}}$  и  $U_{o_{xx}}$  - исходный ток короткого замыкания и напряжение холостого хода, измеренные при стандартных условиях освещения  $AM1(I_0=1000$  Вт/м<sup>2</sup>) и рабочей температуре ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ );  $\Delta J_I$ ,  $\Delta U_{I1}$ ,  $\Delta U_{I2}$  - поправки, учитывающие изменение плотности потока солнечного излучения;  $\Delta J_T$ ,  $\Delta U_T$  - поправки, учитывающие изменение рабочей температуры:

$$\Delta J_I = \frac{I - I_0}{I_0} J_{o_{K.3.}}; \quad (4)$$

$$\Delta U_{I1} = -\Delta J_I \cdot R_{II}; \quad (5)$$

$$\Delta U_{I2} = \kappa \cdot \lg \left( \frac{I}{I_0} \right); \quad (6)$$

$$\Delta J_T = \beta_I \cdot J_{o_{K.3.}} (T - T_0); \quad (7)$$

$$\Delta U_T = \beta_U \cdot U_{XX} (T - T_0), \quad (8)$$

где  $R_{II}$  - последовательное сопротивление элемента;  $\kappa$  - коэффициент, зависящий от типа солнечного элемента,  $0,5 \leq \kappa \leq 1,5$ [2];  $\beta_I$ ,  $\beta_U$  - температурные коэффициенты тока и напряжения, 1/<sup>0</sup>С.

При определении интенсивности солнечной радиации (прямой, рассеянной и суммарной) на горизонтальную поверхность при

математическом моделировании использовались данные многолетних наблюдений [13]. Для исключения интервалов, интенсивности в

которых не известны, использовался метод полиномиальной аппроксимации [2-7, 11, 12].

Суммарная интенсивность солнечного излучения на стационарную наклонную

поверхность, ориентированную на юг была рассчитана по выражению [10-12]:

$$I_H = I_{\Pi} \frac{\cos \xi}{\cos \theta} + I_{\Delta} \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + \rho(I_{\Pi} + I_{\Delta}) \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (9)$$

где  $I_{\Pi}$ ,  $I_{\Delta}$  – интенсивностью прямого и рассеянного (диффузного) солнечного излучения на горизонтальную поверхность, Вт/м<sup>2</sup>;  $\theta$  – угол между направлениями на Солнце и зенит в град., определяется по формуле (10);  $\xi$  – угол между направлением на Солнце и нормалью к наклонной поверхности, ориентированной на юг в град. определяется по формуле (11);  $\beta$  – угол наклона рассматриваемой поверхности к горизонту в град.;  $\rho$  – коэффициент отражения (альбедо) поверхности Земли и окружающих тел [11].

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega. \quad (10)$$

$$\cos \xi = \sin(\varphi - \beta) \sin \delta + \cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega, \quad (11)$$

где  $\delta$  – склонение Солнца, определяется по формуле Купера в град [1],  $\varphi$  – широта местности, в град.;  $\omega$  – часовой угол движения Солнца, в град.

Часовой угол рассчитывался по формуле [5]:

$$\omega = (15^{\circ} \text{час}^{-1})(t_{solar} - 12), \quad (12)$$

где  $t_{solar}$  – локальное солнечное время в часах.

Расчет суммарной интенсивности солнечного излучения на приемник, расположенный под углом  $\beta$  и ориентирующийся на Солнце только по одной координате (азимутальное слежение)

производился по формуле (9), с разницей в нахождении угла между направлением на Солнце и нормалью (вместо  $\xi$  используется  $i$ ). Данный угол определялся по формуле [8-11]:

$$\cos i = \sin \beta [\cos \delta (\sin \varphi \cos a_{\Pi} \cos \omega + \sin a_{\Pi} \sin \omega) - \sin \delta \cos \varphi \cos a_{\Pi}] + \cos \beta [\cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi] \quad (13)$$

где  $a_{\Pi}$  – азимут приемника.

При слежении за Солнцем по азимуту, азимут приемника равен азимуту Солнца ( $a_{\Pi} = a$ ) и определялся по формуле [6-11]:

$$a = \arcsin\left(\frac{\cos \delta \sin \varphi}{\cos \alpha}\right), \quad (14)$$

где  $\alpha$  – угол высоты Солнца, определялся по формуле:

$$I_{OP} = \frac{I_{\Pi}}{\cos \theta} + I_{\Delta} \frac{(1 + \cos \theta)}{2} + \rho(I_{\Pi} + I_{\Delta}) \frac{1 - \cos \theta}{2}, \quad (16)$$

Для расчета температуры окружающего воздуха были привлечены ежечасные данные по температуре окружающего воздуха, приведенные в справочнике [13] и применялась аналитическая зависимость изменения температуры воздуха в течение времени, учитывающая среднесуточную, суточную амплитуду, период изменения температуры воздуха [7-12].

$$\alpha = \arcsin(\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega) \Rightarrow \alpha = \arcsin(\cos \theta). \quad (15)$$

Суммарная интенсивность солнечного излучения при полной ориентации поверхности была рассчитана по выражению [1]:

Все вышеприведенные выражения были учтены в разработанной математической модели. На рисунке 1 приведены результаты теоретических расчетов энергоэффективности на основе математической модели вольт-амперной характеристики (ВАХ) и ватт-амперная характеристика (ВВХ) ФЭП:

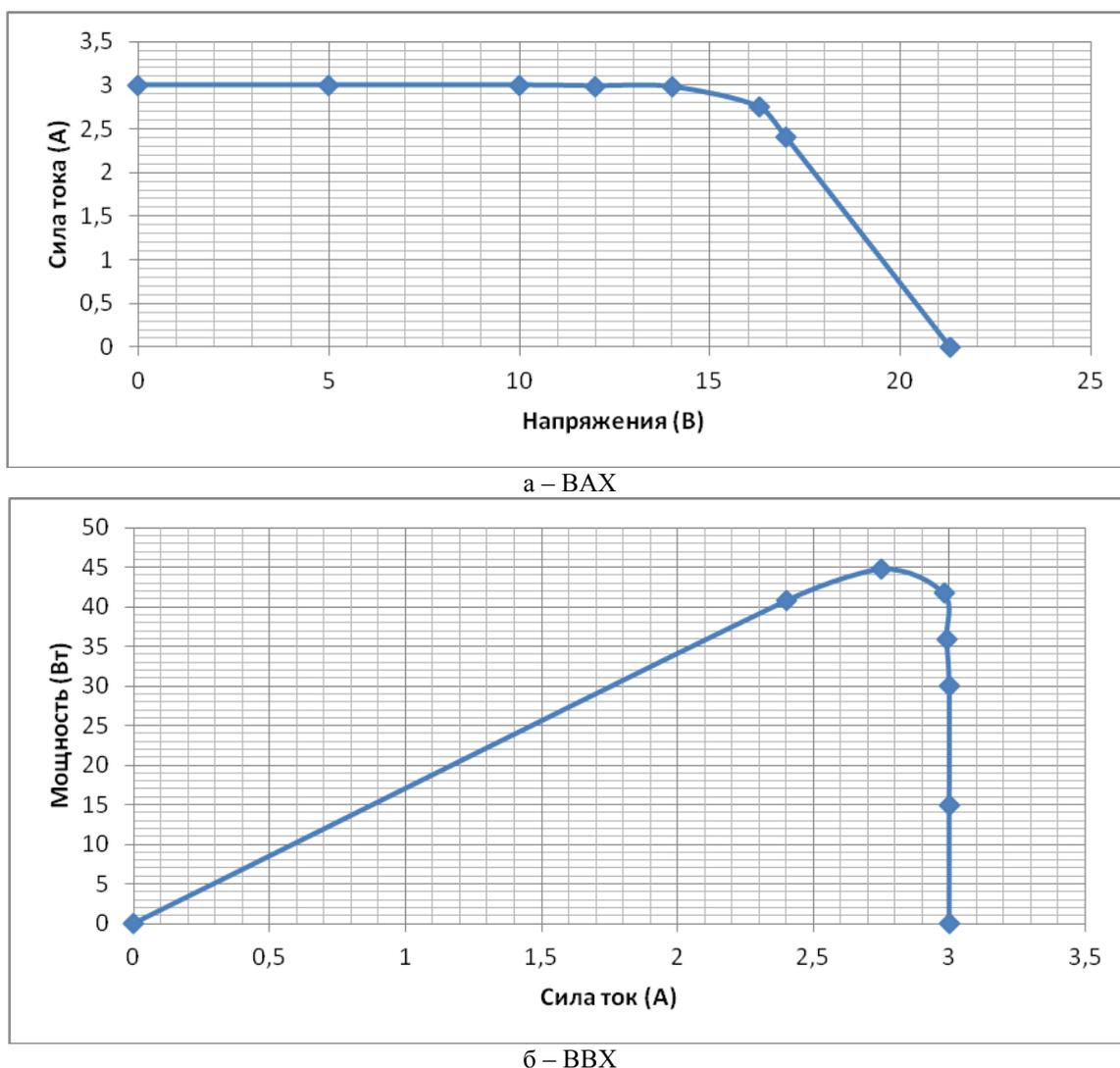


Рис. 1. Характеристики модуля ФЭП при теоретических расчетах, стандартных без слежения с ориентацией на Юг: а – ВАХ 21 мая в 10 часов; б – ВВХ

Fig. 1. Characteristics of the FEP module in case of theoretical calculations, standard without tracking with orientation to the South: a – VAKH on May 21 at ten o'clock; b – VVH

**Результаты экспериментальных исследований.** Нами разработана мобильная солнечная фотоэлектрическая станция, представляющая в виде чемодана (дипломата) встроены с одной стороны фотоэлектрический модуль, с другой стороны встроены принадлежащие к станции оборудования (инвентарь, аккумулятор, угломер и ножки для крепления станции). Исследования мобильной станции проведены в дайханском объединений Хатаб-Атамыратского этрапа (района) Лебапского веляята (области) Юго-Восточного Туркменистана, находящийся:  $38^{\circ}$  северной широты;  $53^{\circ}$  восточной долготы.

Экспериментальные исследования проведены в двух режимах: станция ориентирована на юг с изменением угла наклона; станция ориентирована на юг с изменением угла наклона и слежения за солнцем. Результаты экспериментальных вольт, ватт-амперных характеристики модуля ФЭП при теоретических расчетах, без слежения стандартной с ориентацией на юг под углом к горизонту  $60^{\circ}$ , со слежением азимутальным под углом к горизонту  $60^{\circ}$ , ориентацией слежения за солнцем, 18 мая 2015 года в 10 часов, приведены в таблице и на рис. 2.

Таблица

Теоретические расчеты фотоэлектрического модуля и экспериментальные исследования со слежением и без нее

Table

**Theoretical calculations of the photo-electric module and pilot studies with and without tracking**

Энергетические параметры	Теоретические расчеты	Со слежением	Без слежения
R - Солнечная радиация Вт/ кв.м	1 094,891	912,4088	729,927
I кз- Сила тока (А)	3	2,5	2
U <sub>кз</sub> - Напряжения (В)	21,2	21,1	20
I опт- Сила тока (А)	2,7	2	1,5
U <sub>опт</sub> – Напряжения (В)	16,5	15	15
P опт – мощность (Вт)	44,55	30	22,5
η- КПД (%)	15,41753	15,3448	14,54484

Регрессивная зависимость и коэффициент корреляционная при теоретических расчетах на основе математической модели мобильной станции фотоэлектрической станции:

вольт-амперной характеристики равна:  
 $y = -0,1127x + 3,7694; R^2 = 0,4961;$

вольт-ваттная характеристика:  $y = 10,022x + 8,551; R^2 = 0,3486.$

Регрессивная зависимость и коэффициент корреляционная при экспериментальных

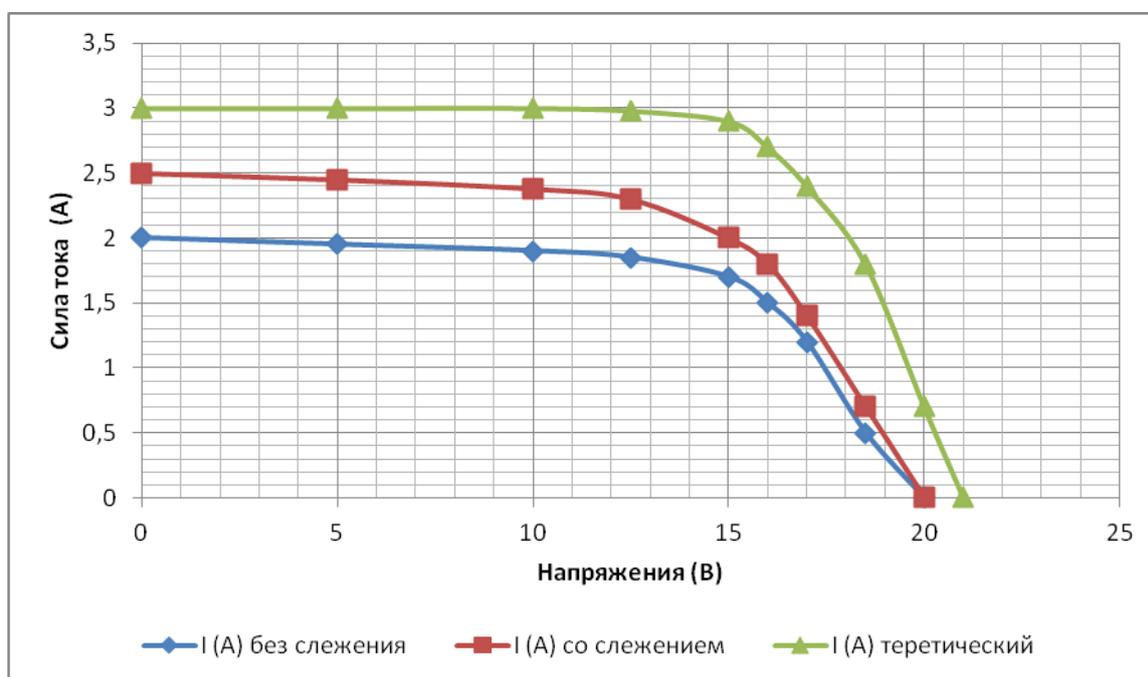
исследованиях мобильной станции фотоэлектрической станции:

ВАХ  $y = -0,104x + 3,0434; R^2 = 0,6203;$

ВАХ со слежением за солнцем:  $y = 0,0818x + 2,4356; R^2 = 0,5804;$

ВВХ без слежения за солнцем ориентированной на юг:  $y = 7,1586x + 5,8938; R^2 = 0,2361;$

ВВХ со слежением за солнцем с поворотом на 60 градусов:  $y = 7,9471x + 8,2286; R^2 = 0,2599;$



а – ВАХ

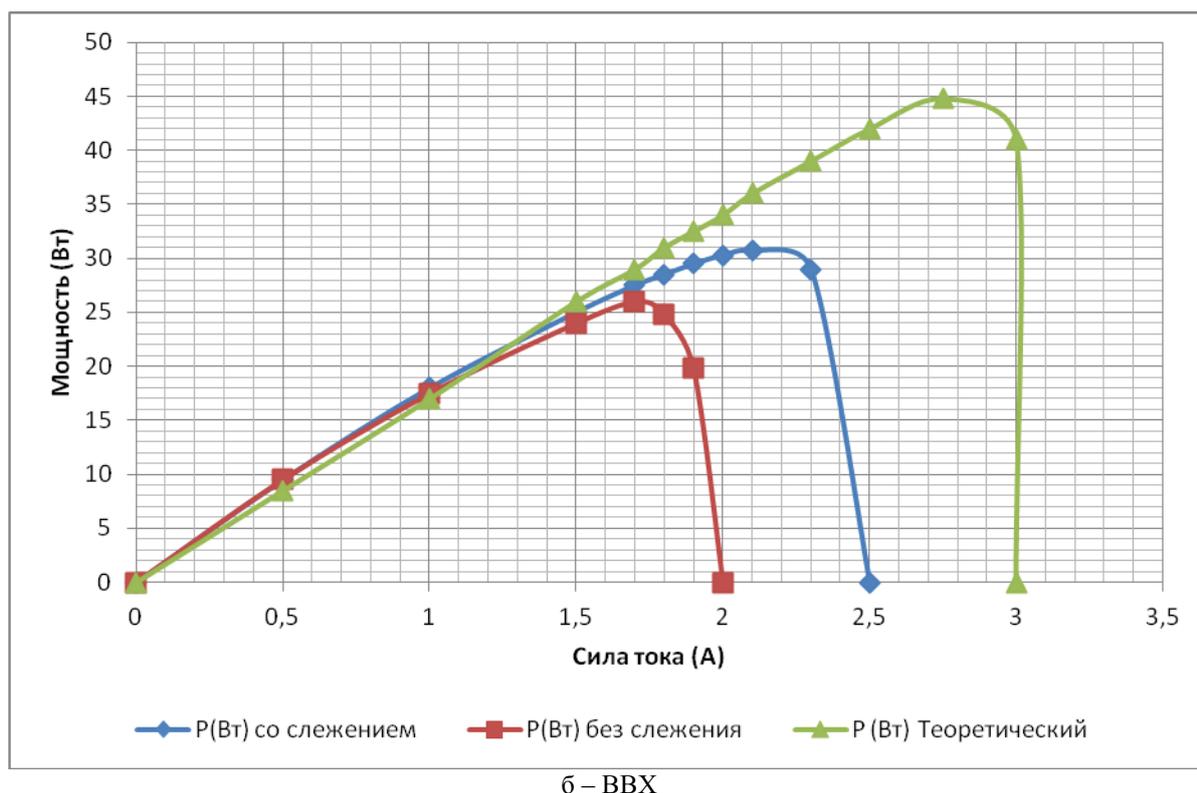


Рис. 2. Характеристики модуля ФЭП при теоретических расчетах, без слежения стандартной с азимутальной ориентацией на Юг под углом к горизонту  $60^\circ$ , со слежением за солнцем: а – ВАХ 18 мая в 10 часов; б – ВВХ  
Fig. 2. Characteristics of the FEP module in theoretical calculations, without tracking standard with azimuthal orientation to the south at an angle of  $60^\circ$  to the horizon, with tracking for the Sun: а – VAKH on May 18 at ten o'clock; б– VVH

### Результаты компьютерного моделирования и их обсуждение

Результаты моделирования работы модуля ФЭП, характеристики которого приведены выше, для климатических условий юго-восточных районов Туркменистана ( $\varphi = 38^\circ$ ), в 10 ч локального солнечного времени 18 мая представлены на рис. 2. Анализ показывает, что выходная мощность модуля ФЭП с системой слежения за Солнцем в указанное время значительно больше мощности стационарного. Полная ориентация модуля на Солнце дает практически те же характеристики, что и при частичной (азимутальной) ориентации. Следовательно, проведение подобного сравнительного моделирования энергоэффективности для круглогодичного периода позволит дать оценку о целесообразности применения систем автоматизированного слежения в СУ с ФЭП.

### Выводы

Математическая модель энергоэффективности позволяет оценить влияние на выходные экономические характеристики модуля ФЭП, как внутренних (число последовательно, параллельно соединенных элементов, внутреннего сопротивления), так и внешних

факторов (интенсивности солнечного излучения, температуры воздуха, степени ориентации модуля ФЭП на Солнце в зависимости от времени года и суток).

Сравнение полученных при моделировании значений интенсивности солнечного излучения с данными, приведенными в таблице 1 и рис. 1 показало, что погрешность не превышает 12%, а температуры окружающего воздуха с данными, приведенными в справочнике по климату – 5%. Сопоставление значений  $J_{0кз}$ ,  $U_{0хх}$ ,  $P_{max}$  полученных при моделировании со значениями, приведенными в паспортных данных модуля ФЭП, подтверждает адекватность разработанной модели. Со слежением мощность и сила тока увеличивается на 15 %, естественно и КПД увеличивается на 1 %. в 10 часов утра,

Математическую модель можно использовать для оценки целесообразности применения систем автоматического слежения в СУ с ФЭП.

### Список литературы

1. Бердымухамедов, Г. М. Государственное регулирование социально-экономического развития Туркменистана. Том 1. А.: Туркменская государственная издательская служба, 2010.

2. Пенджиев, А. М. Изменение климата и возможности уменьшения антропогенных нагрузок. Монография. LAMBERT Academic Publishing, 2012

3. Пенджиев, А. М. Экологические проблемы освоения пустынь. Монография, Издатель: LAP LAMBERT Academic Publishing 2014, - 226 с.

4. Пенджиев, А. М. Планирование развития фотоэнергетики в Туркменистане // Экологическое планирование и управление. 2007. - № 4.

5. Пенджиев, А. М. Ожидаемая эколого-экономическая эффективность использования фотоэлектрической станции в пустынной зоне Туркменистана // Альтернативная энергетика и экология – ISJAEЕ. 2007. - № 5. - С. 135–137.

6. Пенджиев, А. М., Астанов, Н. Г., Пенжиев, М. А.. Использование солнечно-энергетических установок в заповедных зонах Туркменистана для улучшения аридной экосистемы //Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» № 12 (104) 2011. - С. 26-32.

7. Пенджиев, А. М. Возобновляемая энергетика и экология (обобщение статей)//Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» № 08 (148) 2014. - С. 45-78

8. Пенджиев, А. М. Механизм чистого развития: приоритеты энергоэффективности в Туркменистане // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» № 10 (78), 2009. - С. 142-148

9. Пенджиев, А. М. Перспективы альтернативной энергетики и ее экологический потенциал в Туркменистане. //Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» № 9 (77), 2009. - С. 131-139

10. Раушенбах, Г. Справочник по проектированию солнечных батарей: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983. - 360 с.

11. Стребков, Д. С., Пенджиев, А. М., Мамедсахатов, Б. Д. Развитие солнечной энергетики в Туркменистане. Монография. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2012.

12. Использование солнечной энергии. Под редакцией профессора Рыбаковой Л.Е. Ашхабад: Ылым, 1985.

13. Научно - прикладной справочник по климату СССР. Серия 3, ч.1-16, вып. 1-30, Л.: 1989. - 502 с.

#### References

1. Berdimukhamedov, G. M. State regulation of social and economic development of Turkmenistan. Volume 1. A.: Turkmen public publishing service, 2010.

2. Pendzhiyev, A. M. Climate change and possibilities of reduction of anthropogenous stress loads. A Monograph. LAMBERT Academic Publishing, 2012.

3. Pendzhiyev, A. M. Environmental problems of the development of deserts. A Monograph, Publisher: LAP LAMBERT Academic Publishing 2014. 226 p.

4. Pendzhiyev, A. M. Development planning of photopower in Turkmenistan// Ecological planning and management. 2007. No. 4.

5. Pendzhiyev, A. M. The expected environmental and economic efficiency of using the photo-electric station in a desert zone of Turkmenistan// Alternative power engineering and ecology – ISJAEЕ. 2007. No. 5. Pp. 135-137.

6. Pendzhiyev, A. M., Astanov, N. G., Penzhiyev, M. A. The use of solar power stations in reserved zones of Turkmenistan for improvement of an arid ecosystem//the International scientific magazine «Alternative Power Engineering and Ecology» No. 12 (104) 2011. Pp. 26-32.

7. Pendzhiyev, A. M. Renewable power and ecology (articles review)// The International scientific magazine «Alternative Power Engineering and Ecology» No. 08 (148) 2014. Pp. 45-78.

8. Pendzhiyev, A. M. Clean development mechanism: energy efficiency priorities in Turkmenistan // The International scientific magazine «Alternative Power Engineering and Ecology» No. 10 (78), 2009. Pp. 142-148.

9. Pendzhiyev, A. M. Prospects of alternative power engineering and its ecological potential in Turkmenistan // The International scientific magazine «Alternative Power Engineering and Ecology» No. 9 (77), 2009. Pp. 131-139.

10. Raushenbakh, G. Reference book on designing of solar batteries: Transl. from English. M.: Energoatomizdat, 1983. 360 p.

11. Strebkov, D. S., Pendzhiyev, A. M., Mamedsakhmatov, B. D. Development of solar power in Turkmenistan. A Monograph. M.: I BEND VIESH, 2012.

12. Use of a solar energy. Under edition of professor Rybakova L. E. Ashkhabad: Ylym, 1985.

13. Scientifically-applied reference book on climate of the USSR. Series 3, p. 1-16, issue 1-30, L.: 1989. 502 p.

**Пенджиев Ахмет Мырадович**, доктор сельскохозяйственных наук, академик МАНЭБ, доцент

**Астанов Непес Гурдович**, Специалист Атамурадского района, Лебапского вelayа Туркменистана

**Akhmet M. Penjiyev**, Doctor of Agricultural Sciences, Academician of MANEB, Associate Professor

**Nepes G. Astanov**, Expert of Atamurad Regional Department of National Education, Lebap Area, Turkmenistan