

Технические науки

УДК 621.383; 621.472(575.4)

ИССЛЕДОВАНИЯ МОБИЛЬНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОРИЕНТАЦИИ⁹

А.М. Пенджиев, Туркменский государственный архитектурно-строительный институт (Ашхабад, Туркменистан).

Н.Г. Астанов, Атамурадский районный отдел народного образования Лебапского велаята Министерства образования Туркменистана (Атамуратский етрап, Туркменистан).

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.

Введение. В своем обращении Президента Туркменистана Гурбангулы Бердмухамедова 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 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. Эффективность использования СУ можно повысить и применением систем слежения за Солнцем, которые позволяют увеличить выходную мощность ФЭП и дневной интервал генерирования электрической энергии. Существуют системы слежения за Солнцем с частичной (азимутальной) или полной (азимутальной и зенитальной) ориентацией [10-12].

Целесообразность их использования в СУ должно обосновываться проведением необходимых исследований и расчетов.

Исследования математической модели. Наиболее эффективным методом исследования СУ является имитационное моделирование, позволяющее по сравнению с натурными экспериментами учесть влияние на энергетические характеристики СУ

⁹ Рецензент: П.А. Назаров, доктор технических наук, профессор Туркменского государственного архитектурно-строительного института (Ашхабад, Туркменистан).

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]:

$$U = \frac{A \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \left[\frac{(J_{\phi} - J)}{J_0} + 1 \right] - JR, \quad (1)$$

где U - напряжение, В; k - постоянная Больцмана; T - рабочая температура ФЭП, К; q - заряд электрона; J_{ϕ} - фототок, пропорциональный интенсивности солнечного излучения I , падающего на поверхность ФЭП, ($J_{\phi}/I = \text{const}$) А/см²; J - ток, А/см²; J_0 - обратный ток насыщения, определяемый свойствами исходного полупроводника, определялся из выражения (1) при условии $J=0$ и $U=U_{xx}$, А/см²; R - внутреннее электрическое сопротивление, Ом/см²; 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 вольт-амперных характеристик (ВАХ) и ватт-амперная характеристика (ВВХ), для модуля ФЭП состоящего из параллельно соединенных блоков при стандартных условиях освещения AM1 $I_0 = 1000$ Вт/м² и рабочей температуре. Фотоэлементы из монокристаллического кремния имеют следующие характеристики: $J_{окз} = 2,74$ А/м²; $U_{xx} = 22$ В; $R = 10$ Ом·см²; площадь $S = 0,3792$ м². 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 и 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]:

$$J_{кз} = J_{о_{кз}} + \Delta J_I + \Delta J_T; \quad (2)$$

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

где $J_{о_{кз}}$ и $U_{о_{xx}}$ - исходный ток короткого замыкания и напряжение холостого хода, измеренные при стандартных условиях освещения AM1 ($I_0 = 1000$ Вт/м²) и рабочей температуре ($T = 25^\circ\text{C}$); ΔJ_I , ΔU_{I1} , ΔU_{I2} - поправки, учитывающие изменение плотности потока солнечного излучения; ΔJ_T , ΔU_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_{I1} - последовательное сопротивление элемента; κ - коэффициент, зависящий от типа солнечного элемента, $0.5 \leq \kappa \leq 1.5$ [2]; β_I, β_U - температурные коэффициенты тока и напряжения, $1/^\circ\text{C}$.

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]:

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

где I_{II}, I_D , - интенсивностью прямого и рассеянного (диффузного) солнечного излучения на горизонтальную поверхность, Вт/м²; θ - угол между направлениями на Солнце и зенит в град., определяется по формуле (10); ξ - угол между направлением на Солнце и нормалью к наклонной поверхности, ориентированной на юг в град. определяется по формуле (11); β - угол наклона рассматриваемой поверхности к горизонту в град.; ρ - 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 δ - склонение Солнца, определяется по формуле Купера в град [1], φ - широта местности, в град.; ω - часовой угол движения Солнца, в град.

Часовой угол рассчитывался по формуле [5]:

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

где t_{solar} - локальное солнечное время в часах.

Расчет суммарной интенсивности солнечного излучения на приемник, расположенный под углом β 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 ξ используется i). Данный угол определялся по формуле [8-11]:

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

где a_{Π} - 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 α – угол высоты Солнца, определялся по формуле:

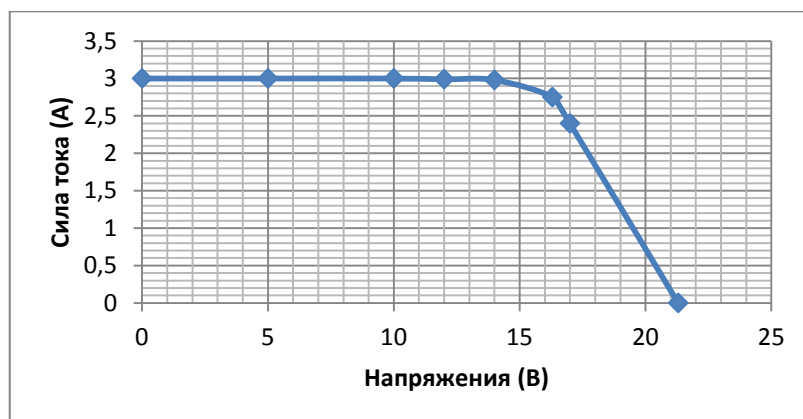
$$\alpha = \arcsin(\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega) \Rightarrow \alpha = \arcsin(\cos \theta). \quad (15)$$

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

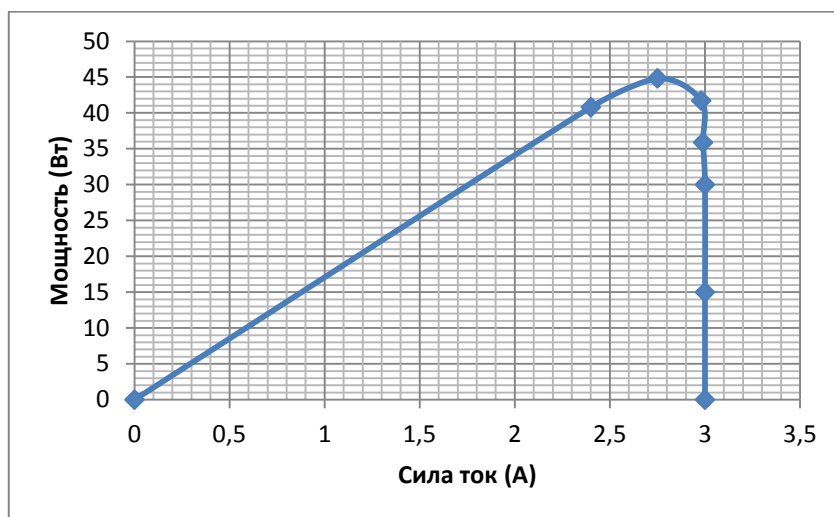
$$I_{OP} = \frac{I_{\Pi}}{\cos \theta} + I_{Д} \frac{(1 + \cos \theta)}{2} + \rho(I_{\Pi} + I_{Д}) \frac{1 - \cos \theta}{2}, \quad (16)$$

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].

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



а – ВАХ



б – BVX

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

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 велаята (области) Юго-Восточного Туркменистана находящийся: 38° северной широты; 53° 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°, со слежением азимутальным под углом к горизонту 60°, ориентацией слежения за солнцем, 18 мая 2015 года в 10 часов, приведены на таблице 1 и рис. 2.

Таблица 1 теоретических расчетов фотоэлектрического модуля и экспериментальные исследования со слежением и без нее.

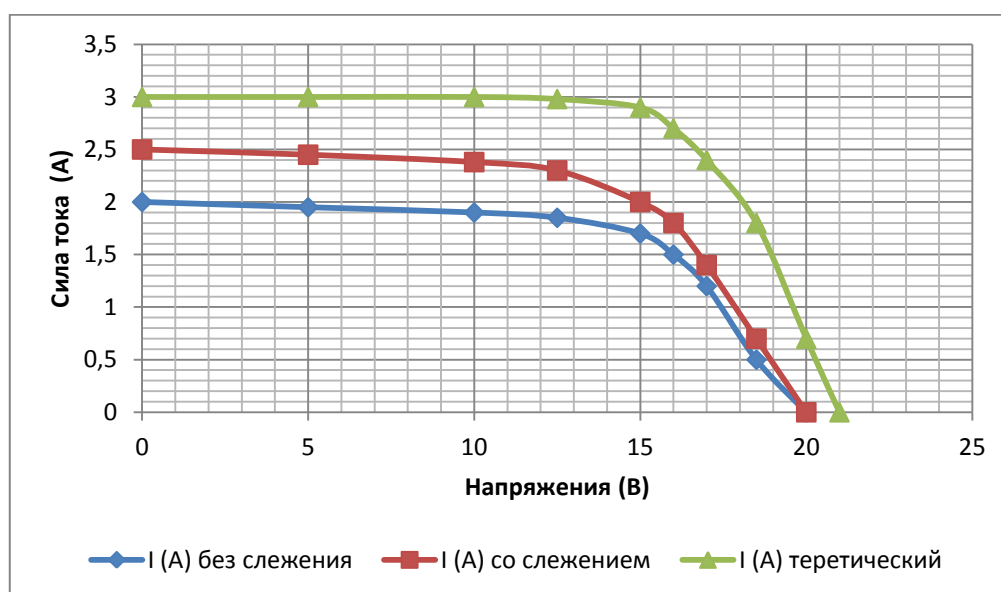
Энергетические параметры	Теоретические расчеты	Со слежением	Без слежения
R -Солнечная радиация Вт/ кв.м	1094,891	912,4088	729,927
I кз- Сила тока (А)	3	2,5	2
Uхх - Напряжения (В)	21,2	21,1	20
I опт- Сила тока (А)	2,7	2	1,5
Uопт – Напряжения (В)	16,5	15	15
P опт – мощность (Вт)	44,55	30	22,5
η- КПД (%)	15,41753	15,3448	14,54484

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

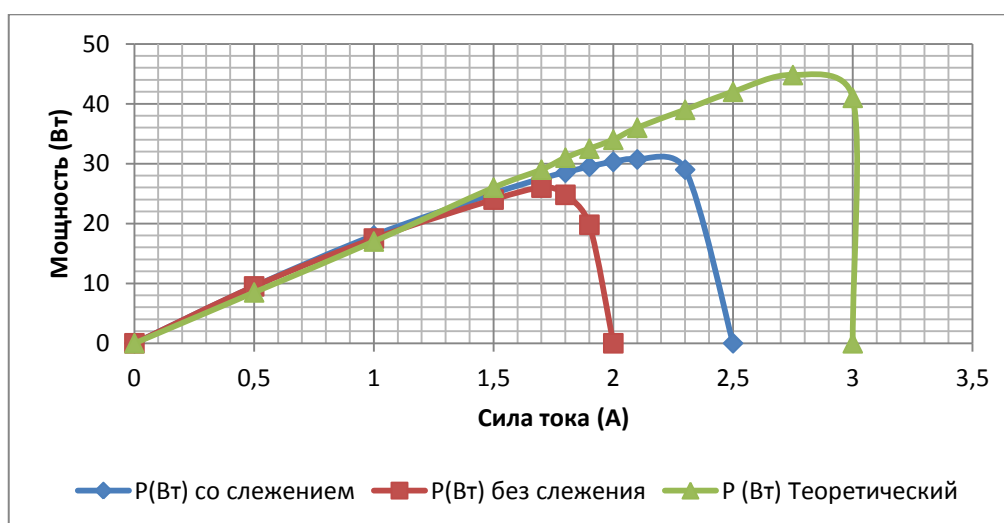
- вольт-амперной характеристики равна: $y = -0,1127x + 3,7694$; $R^2 = 0,4961$;
- вольт-ваттная характеристика: $y = 10,022x + 8,551$; $R^2 = 0,3486$.

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



б – ВВХ

Рис. 2. Характеристики модуля ФЭП при теоретических расчетах, без слежения стандартной с азимутальной ориентацией на Юг под углом к горизонту 60°, со слежением за солнцем: а – ВАХ 18 мая в 10 часов; б – ВВХ

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 для круглогодичного периода позволит дать оценку о целесообразности применения систем автоматизированного слежения в СУ с ФЭП.

Выводы. Математическая модель позволяет оценить влияние на выходные 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 $J_{0 \text{ к.з.}}$, $U_{0 \text{ хх}}$, 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.

Литература:

1. Бердымухамедов Г.М. Государственное регулирование социально-экономического развития Туркменистана. Том 1. А.: Туркменская государственная издательская служба, 2010.
2. Пенжиев 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. ISBN: 978-3-8433-9325-6
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 // Альтернативная энергетика и экология. 2011. № 12 (104). 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 // Альтернативная энергетика и экология». 2009. №10 (78). С. 142-148

9. Пенджиев А.М. Перспективы альтернативной энергетике 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 энергетике 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.



Pendzhiev A.M., Astanov N.G. Issledovaniya mobil'noj solnechnoj fotoelektricheskoy stancii v zavisimosti ot orientacii // Nauka. Mysl'. – 2016. – № 6-2.

© А.М. Пенджиев, 2016.

© Н.Г. Астанов, 2016.

© «Наука. Мысль», 2016.

— ● —

Abstract. The authors show results of calculations of mathematical model (theoretical) experimental researches of the volt-ampere and watt-ampere characteristic of operating modes of 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, photo-electric converter, mathematical model, systems of tracking the Sun, volt- and watt-ampere characteristics, Turkmenistan.

— ● —

Сведения об авторах

Ахмет Мырадович **Пенджиев**, кандидат технических, доктор сельскохозяйственных наук, академик МАНЭБ, член-корр. РАЕ доцент Туркменский государственный архитектурно-строительный институт (Ашхабат, Туркменистан).

Непес Гурдмырадович **Астанов**, специалист Атамуратского районного отдела народного образования Лебапского велаята Министерства образования Туркменистана (Атамуратский етрап, Туркменистан).

— ● —

Подписано в печать 20.05.2016.

© Наука. Мысль, 2016