



# DETERMINATION OF THE EFFICIENCY OF SOLAR PHOTOELECTRIC PLANTS WITH A COMBINED PRODUCTION OF THERMAL AND ELECTRIC ENERGY

**S.F. Ergashev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Fergana Polytechnic Institute,  
Fergana,  
Uzbekistan

**D.R. Otamirzaev<sup>2</sup>**

<sup>2</sup>Namangan Engineering Technological  
Institute,  
Namangan,  
Uzbekistan

---

## ABSTRACT

*The possibility of increasing the total conversion factor of solar installations by generating heat and electrical energy from one receiving surface is being considered. To achieve this goal, an installation is proposed, which is a photovoltaic panel and a heat collector. The results of comparative experimental studies of the proposed installations are presented.*

**KEYWORDS:** *surface temperature; photovoltaic installation; Solar cells; combined conversion of solar energy; conversion factor.*

---

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫРАБОТКЕ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

**С.Ф.Эргашев<sup>1</sup>,**

<sup>1</sup>Ферганский политехнический институт, Фергана, Узбекистан

**Д.Р.Отамирзаев<sup>2</sup>**

<sup>2</sup>Наманганский инженерно технологический институт, Наманган, Узбекистан

**Аннотация:** Рассматривается возможность увеличения суммарного коэффициента преобразования солнечных установок за счет выработки тепловой и электрической энергии с одной приемной поверхности. Для реализации данной цели предложена установка, представляющий собой фотоэлектрическую панель и тепловой коллектор. Приводятся результаты сравнительных экспериментальных исследований предложенных установок.

**Ключевые слова:** температура поверхности; фотоэлектрическая установка; солнечные элементы; комбинированное преобразование солнечной энергии; коэффициент преобразования.



## Введение

В настоящее время по мере уменьшения традиционных источников энергии большое внимание уделяется на использование возобновляемых источников энергии растет по всему миру, в том числе в Узбекистане предложены большие усилия на развитие использования возобновляемых источников энергии [1]. Солнечные фотоэлектрические преобразователи являются самым распространенным видом возобновляемых источников энергии. При использовании фотоэлектрических установок их главным недостатком является невысокая эффективность преобразования потока солнечной радиации в электрическую энергию (КПД промышленных фотоэлементов составляет 15–20%). В то же время солнечные коллекторы, используемые для нагрева теплоносителя, имеют тепловой КПД в несколько раз выше. Следовательно, для повышения КПД системы целесообразно использовать комбинированную солнечную установку, совмещающую в себе тепловой коллектор и фотоэлектрический модуль.

С развитием науки и техники появляется все больше солнечных установок, при работе которых с одной и той же рабочей поверхности одновременно может вырабатываться тепловая и электрическая энергия. С уверенностью их можно отнести к новому классу гелиотехники – термофотоэлектрические солнечные установки, которые одновременно преобразуют всю падающую на них солнечную радиацию в тепло и электроэнергию, т.е. одновременно нагревают теплоноситель и являются электрическим генератором постоянного тока [2].

Использование комбинированных термофотоэлектрических установок дает заметную экономию материалов для их изготовления на единицу мощности, увеличивает их суммарный коэффициент преобразования и эффективность использования. Это объясняется тем, что абсорберы тепловых гелиосистем и фотоэлектрические преобразователи солнечных батарей преобразуют различные длины волн солнечного спектра, поэтому с одной рабочей поверхности можно получать как тепловую, так и электрическую энергию, не уменьшая эффективность работы тепловой и электрической части. Производство термофотоэлектрических панелей на основе серийных установок позволит сократить затраты на выпуск абсорберов с дорогими селективными покрытиями и на материалы для производства конструкций фотоэлектрических модулей, объединив их в одну установку [3].

Существует комбинированные солнечные фототермопреобразователи. В котором избыточное тепло, с тыльной поверхности служит источником энергии термоэлементов находящихся там же [4].

## Постановка задачи исследования

Современные промышленные солнечные элементы из монокристаллического и поликристаллического кремния имеют плоскую конструкцию, их КПД составляет 17–20%, при коэффициенте поглощения до 95%. При преобразовании солнечной энергии 80% энергии идет в основном на тепловой нагрев элементов, что только ухудшает их качественную работу. Расположив солнечные элементы поверх теплового абсорбера гелиоколлектора, при эффективном теплообмене создается возможность для увеличения КПД всей установки. Отвод теплоты теплоносителем, циркулирующим по контуру гелиосистемы, препятствует перегреву фотопреобразователей и, соответственно, повышает суммарную выработку электрической энергии. Высокий коэффициент поглощения солнечных элементов дает возможность до 80% поглощенной ими солнечной энергии пойти на нагрев приемной поверхности теплового абсорбера. Коэффициент преобразования до 80% является высоким показателем для многих абсорберов промышленных тепловых солнечных установок.

## Цель и задачи исследования

Цель исследования – проведение эксперимента для подтверждения теоретических данных об увеличении суммарного коэффициента преобразования потока падающей солнечной радиации термофотоэлектрической установкой и увеличения мощностных характеристик с единицы площади её приемной поверхности при использовании комбинированной выработки тепловой и электрической энергии. Подобный эксперимент был проведен в работе [5].

Эксперименты по измерению энергетических характеристик солнечной установки проводились в натуральных условиях на территории открытой лабораторной площадки факультета “Автоматика и энергетика” Наманганского инженерно-технологического института Республики Узбекистан с мая по июль 2020 года.

В работе использовались метод прямых измерений по току короткого замыкания и напряжению холостого хода фотопреобразователя при безнагрузочном режиме и методы температурных измерений теплоносителя. Исследования проводились в

натурных условиях на открытой площадке в ясные дни, при естественном солнечном освещении и максимальной освещенности (около  $1000 \text{ Вт/м}^2$ ). Условием проведения эксперимента являлось постоянство интенсивности солнечной радиации.

При проведении работ использовалась солнечная установка (рис. 1), длиной 1 м и шириной 0.6 м, предназначенного непосредственно для монтажа кровельного покрытия жилых домов. Сама комбинированная установка состоит из отдельных

фотоэлектрических элементов (ячеек), установленные между полипропиленовую плоскость и защитного стекла, с боков имеются технологические ребра, тыльная часть соединен с теплообменником, теплообменник представляет собой металлическую лист присоединенный к ребрам солнечной установки и два штуцера для циркуляции рабочей жидкости которые присоединены к резервуару. Внутри комбинированной установки находится жидкий теплоноситель.



Рис. 1. Термофотоэлектрическая солнечная установка

На приемной поверхности установки находятся солнечные элементы, способные вырабатывать электрическую энергию. Элементы покрывают от 8/10 до 9/10 части установки. За счет более низкой температуры внизу теплообменника при циркуляции теплоносителя происходит охлаждение элементов, что улучшает качество их работы. Так как кремниевые солнечные элементы преобразуют отличную от тепловой части спектра, происходит общее увеличение энерговыработки. Заводской КПД используемой солнечной установки (при освещенности  $E_0=1000 \text{ Вт/м}^2$ ) составляет 16 %, тепловой КПД предлагаемой комбинированной установки в стационарном режиме – 58 %. Соответственно удельная мощность солнечной батареи может составлять до  $160 \text{ Вт/м}^2$ , а теплового коллектора –  $583 \text{ Вт/м}^2$ .

Работа термофотоэлектрической установки описывается по методике [5].

Максимальная мощность  $P_{max}$ , вырабатываемая солнечной батареей:

$$P_{max} = F_{ff} I_{кз} U_{xx} = I_{max} U_{max} \quad (1)$$

где  $F_{ff}$  – фактор заполнения вольт-амперной характеристики;  $I_{кз}$  – ток короткого замыкания;  $U_{xx}$  – напряжение холостого хода;  $I_{max}$  – ток в рабочей точке;  $U_{max}$  – напряжение в рабочей точке.

КПД фотоэлектрической солнечной бата-реи рассчитывается по известной формуле:

$$\eta_{сб} = \frac{I_{max} U_{max}}{S_{эл} E_0} = \frac{P_{max}}{S_{эл} E_0} \quad (2)$$

где  $S_{эл}$  – полезная площадь солнечных элементов,  $\text{м}^2$ ;  $E_0$  – освещенность рабочей поверхности,  $\text{Вт/м}^2$ .

Соответственно расчет теплового абсорбера производится также известным методом [6]. Полезная энергия  $Q_u$ , отводимая из коллектора в единицу времени, Вт, равна:

$$Q_u = F_R A [I_T(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)], \quad (3)$$



где  $A$  – площадь коллектора,  $m^2$ ;  $F$  – коэффициент отвода теплоты из коллектора;  $I_T$  – плотность потока суммарной солнечной радиации в плоскости коллектора (с учетом углового коэффициента  $R$ ),  $Вт/м^2$ ;  $\tau$  – пропускательная способность прозрачных покрытий по отношению к солнечному излучению;  $\alpha$  – поглощательная способность пластины коллектора по отношению к солнечному излучению;  $U_L$  – полный коэффициент тепловых потерь коллектора,  $Вт/м^2 \text{ град}$ ;  $T_i$  – температура жидкости на входе в коллектор (на номинальном режиме),  $^{\circ}C$ ;  $T_a$  – температура окружающей среды,  $^{\circ}C$ .

Для практических расчетов более применим упрощенный вариант формулы (3):

$$Q_u = S_{TK} G C_p (T_{\text{вых}} - T_i), \quad (4)$$

Где  $Q_u$  – тепловая мощность солнечного коллектора  $P_{TK}$ ;  $S_{TK}$  – площадь коллектора,  $m^2$ ;  $T_{\text{вых}}$  – температура жидкости на выходе из коллектора.

Соответственно КПД теплового коллектора определяется формулой:

$$\eta_{СК} = \frac{P_{TK}}{S_{TK} E_0} \quad (5)$$

Для комбинированной установки освещенность  $E_0$  одинакова для тепловой и электрической части, а величины площадей  $S_{СК}$  и  $S_{эл}$  эквивалентны, т.е. можно записать:

$$\eta_{TK} = \frac{P_{TK}}{S_{TK} E_0}; \quad \eta_{СБ} = \frac{P_{СБ}}{S_{TK} E_0}, \quad (6)$$

где  $\eta_{СК}$ ,  $\eta_{СБ}$  – тепловой и электрический КПД комбинированной установки соответственно;  $P_{TK}$ ,  $P_{СБ}$  – мощность, отводимая от теплового коллектора и солнечной батареи соответственно;  $S_{TK}$  – полезная площадь термофотоэлектрической установки, заполненная солнечными элементами.

Общая мощность термофотоэлектрической установки равна сумме мощностей тепловой и фотоэлектрической частей:

$$P_{TK} = P_{TK} + P_{СБ} = S_{TK} E_0 (\eta_{TK} + \eta_{СБ}) = S_{TK} E_0 \eta_{TKф}, \quad (7)$$

где  $\eta_{TKф}$  – общий суммарный КПД термофотоэлектрической установки (комбинированной установки).

Отсюда видно, что при увеличении отбираемой мощности от солнечной установки за счет фотоэлектрической составляющей возрастает её суммарный КПД, так как площадь и освещенность рабочей поверхности остаются постоянными.

При неполном покрытии приемной поверхности комбинированной установки солнечными элементами формулу (7) необходимо заменить:

$$P_{TKф} = S_{TKф} E_0 (\eta_{TK} + f_{TKф} \eta_{СБ}) \quad (8)$$

где  $f_{TKф}$  – коэффициент заполнения солнечными элементами приемной поверхности комбинированной установки. В нашем случае он изменяется в пределах от 8/10 до 9/10.

КПД солнечных элементов при нагреве уменьшается:

$$\eta_{СБ} = f_{TKф} \eta_0 (1 - k(T_i - T_0)) \quad (9)$$

где  $\eta_0$  – КПД фотоэлемента при  $T_0 = 25^{\circ}C$ ;  $T_i$  – температура нагретого фотоэлемента (считаем её равной температуре жидкости на входе в коллектор); падение КПД солнечного элемента зависит от температурного градиента  $k$  и составляет от 0,3 до 0,5 %/ $^{\circ}C$  [7].

С учетом изложенного формула принимает вид:

$$P_{TKф} = S_{TKф} E_0 \frac{G C_p (T_{\text{вых}} - T_i)}{E_0} + S_{TKф} E_0 f_{TKф} \eta_0 (1 - k(T_i - T_0)), \quad (10)$$

По формулам (1) – (10) можно определить все параметры солнечной установки с учетом тепловой и электрической части.

## Результаты исследований

Для проведения экспериментов выбирались летние ясные дни с большой интенсивностью солнечной радиации. Освещенность при измерениях составляла от 980 до 1000  $Вт/м^2$ .

Паспортные данные использованной солнечной батареи:

Марка: AS – 100P,  $P_{max} = 100 \text{ Вт}$ ,  $U_{xx} = 21.8 \text{ В}$ ,  $I_{кз} = 6.1 \text{ А}$

Вышеприведенные значения справедливы при значениях:  $AM=1.5$   $E_0=1000 \text{ Вт/м}^2$   $T_c=25^{\circ}C$

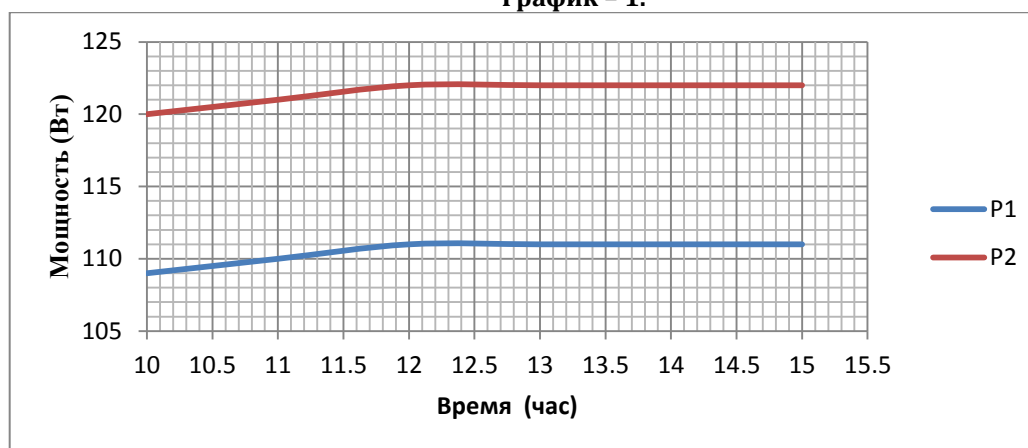
С учетом жаркого климата Узбекистана температура поверхности солнечного фотоэлектрического преобразователя может достигать до  $70^{\circ}C$  и выше, поэтому, не удается достичь номинальных значений энергетических характеристик в реальных условиях. В связи с этим целесообразно использовать комбинированные установки.

В таблице – 1, Приведены результаты измерения предложенной комбинированной установки.

Таб. 1.

№	Время измерения	Температура поверхности СБ (°C)	Ток короткого замыкания	Напряжение холостого хода
1	9.05.2020	29	5.65	21.75
2	25.05.2020	30	5.65	21.7
3	10.06.2020	31	5.64	21.7
4	21.06.2020	30	5.64	21.7

График - 1.



P1 – мощность фотоэлектрической батареи, P2 – Электрическая мощность комбинированной установки

Температурный градиент зависимости КПД солнечного элемента  $k = 0.42 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}}$  [6]. Использование комбинированной установки, можно предотвращать 3% снижения КПД электрической части установки в реальных условиях. Тепловая мощность комбинированной установки согласно формулам (4) составляет 583 Вт.

## Выводы

Проведенные исследования показывают, что использование теплового коллектора с солнечными фотоэлектрическими преобразователями существенно увеличивает КПД солнечных батарей на 3% [7]. Это происходит вследствие того, что при работе солнечных батарей без теплового отвода инфракрасная тепловая составляющая солнечной радиации идет на нагрев фотоэлементов, что часто может приводить к их перегреву и падению КПД фотоэлементов [8, 9].

В результате исследований получены следующие результаты:

1. Можно сделать заключение об эффективности работы солнечных установок с

комбинированной выработкой электрической и тепловой энергии [3, 4].

2. Показано, что с 1 м<sup>2</sup> поверхности разработанной комбинированной установки можно получать до 160 Вт электрической и около 583 Вт тепловой мощности.

3. Суммарный коэффициент преобразования солнечной энергии комбинированной установки увеличивается до 75 %. При том, что электрический КПД солнечных элементов, используемых в исследованиях, около 17 %, а тепловой КПД установки может составлять до 58 %.

4. Использование разработанной установки в жилых домах с непрерывным источником воды является эффективным.

## Литературы

1. Закон Республики Узбекистан ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ г. Ташкент, 21 мая 2019 г., № ЗРУ-539
2. Кузнецов К.В., Тюхов И.И., Сергиевский Э.Д. Исследование характеристик солнечного воздушного гибридного коллектора // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: 6-й Междунар. науч.-техн. конф., 13–14 мая 2008 г. Москва, ГНУ ВИЭСХ, 2008. Ч. 4. С. 227–231.
3. Пат. 150121 РФ, МПК Н 01 L 31/00. Фототермопреобразователь солнечной



- энергии / В.В. Кувишинов, А.И. Баишта, В.А. Сафонов; патентообладатель В.В. Кувишинов. Заявка № 2014149414/93; заявл. 17.10.2014; опубл. 27.01.2015, Бюл. № 3.
4. Патент FAP 00793 Фототермопреобразователь / Лутпуллаев С.Л., Турсунов М.Н., Дадамухамедов С., Юлдошев И.А. UZ
  5. O. D.R, "ENERGY CHARACTERISTICS OF SOLAR PHOTOELECTRIC INSTALLATIONS UNDER THE COMBINED PRODUCTION OF HEAT AND ELECTRIC ENERGY IN THE CONDITIONS OF UZBEKISTAN," *Int. J. Psychosoc. Rehabil.*, vol. 24, no. 04, pp. 1836–1842, Feb. 2020, doi: 10.37200/IJPR/V24I4/PR201291.
  6. Кувишинов В.В. Методы расчета и повышения эффективности использования теплофотоэлектрических установок // Сб. науч. тр. СНУЯЭ и П. 2013. Вып. 3 (47). С.166–172.
  7. Арбузов Ю.Д., Евдокимов В.М. Основы фотоэлектричества. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007. 292 с.
  8. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. М.: Энергоатомиздат, 1983. 397 с
  9. Кувишинов В.В. Использование солнечных концентраторов для повышения мощностных характеристик сетевых фотоэлектрических станций // сб. науч. работ СНУЯЭиП. Севастополь: СНУЯЭиП, 2014. Вып. 1 (49). С. 144 – 149.