

1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника
1.3.14.Физикаи гарми ва назарияи техникаи гармӣ
1.3.14.The thermal physics and theory of thermal technics

УДК 620.92:626.97
ББК 31.15

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ
ПРОЦЕССОВ В СОЛНЕЧНОМ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ МОДУЛЕ**

Мирзоқобилова Фирӯза Осимовна -
преподаватель кафедры общей физики и твердого
тела ГОУ "ХГУ имени академика Б. Гафурова"
(Республика Таджикистан, г. Худжанд),
e-mail: m_firuz_91@mail.ru.

**ТАДҚИҚИ РАВАНДҲОИ ГАРМӢ ДАР
МОДУЛИ ФОТОЭЛЕКТРИКИИ
ОФТОБӢ**

Мирзоқобилова Фирӯза Осимовна - муаллимаи
кафедраи физикаи умумӣ ва ҷисмҳои сахт МДТ
"ДДХ ба номи академик Б. Гафуров" (Ҷумҳурии
Тоҷикистон, ш.Хуҷанд), e-mail:
m_firuz_91@mail.ru.

**STUDY OF THERMAL PROCESSES IN A
SOLAR PHOTOELECTRIC MODULE**

Mirzokobilova Firuz Osimovna - Teacher of the
Department General Physics and Solid State under SEI
«Khujand State University named after academician
B.G.Gafurov» (Tajikistan Republic, Khujand),
e-mail: m_firuz_91@mail.ru.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, тепловой поток, эффективность, электрическая энергия, тепловая энергия, информационная система, аккумулированная энергия.

В данной работе определены экстремальные и средние месячные значения температуры фотоэлектрического модуля и температуры воздуха местности (г.Худжанд). Исследована динамика полезной электрической и тепловой энергии солнечной фотоэлектрической термальномой установки. Изучена суточная и сезонная динамика аккумулированной тепловой энергии в материале ФЭМ с учетом стохастического характера солнечного излучения и климата местности. Установлено, что среднегодовая величина $\langle T_{\max} - T_{\text{средн}} \rangle$ ФЭМ составляет 20°C. В зимние месяцы величина $\langle T_{\max} - T_{\text{средн}} \rangle$ уменьшается до 15°C. Аккумулированная энергия $\Delta W_{\text{акк}}$ СФТУ в полдень достигает 50 Втч/м² или 1,5% от удельной суточной суммы СИ. Суточная сумма СИ E_c составляет около 3,5 кВтч/м² для октября. Установлено, что аккумулированная тепловая энергия в материале подложки имеет низкий коэффициент корреляции (0,18) с электрической мощностью СФТУ. Уменьшение выработки электроэнергии за счет роста температуры модуля в пределах 1...2%, компенсируется выработкой тепловой энергии гибридной солнечной установки. Суточная полезная тепловая энергия СФТУ составляет 2 кВтч/м² при тепловой эффективности 50%. Суточная выработка электроэнергии СФТУ составляет 280 Втч/м² при электрической эффективности около 8%. Общая электрическая и тепловая эффективность СФТУ составляет 58%.

Вожаҳои калидӣ: модули фотоэлектрикӣ, сели гармӣ, самаранокӣ, энергияи электрӣ, энергияи гармӣ, системаи информатсионӣ, энергияи захирашуда.

Дар кори мазкур қимматҳои зиёдтарин ва миёнаи моҳонаи ҳарорати модули фотоэлектрикӣ ва ҳарорати ҳавои минтақа (ш. Хуҷанд) муайян карда шудаанд. Динамикаи энергияи ғоиданоки электрӣ ва гармии дастгоҳи фотоэлектрикии термалии офтобӣ (ДФТО) омӯхта шудааст. Динамикаи шабонарӯзӣ ва мавсимии энергияи гармии ҷамъшуда дар маводи модули фотоэлектрикӣ (МФ), бо назардошти хусусияти стохастикии афканиши офтоб ва иқлими маҳаллӣ омӯхта шудааст. Муайян карда шудааст, ки қимати миёнаи солони $\langle T_{\max} - T_{\text{миёна}} \rangle$ МФ 20°C мебошад. Дар моҳҳои зимистон қимати $\langle T_{\max} - T_{\text{миёна}} \rangle$ то 15°C паст мешавад. Энергияи ҷамъшудаи ДФТО $\Delta W_{\text{ҷамъ}}$ дар нисфирӯзӣ 50 Втч/м² ё 1,5% аз суммаи шабонарӯзии афканиши хоси офтобро ташкил медиҳад. Суммаи шабонарӯзии афканиши офтоб дар моҳи октябр тақрибан 3,5 кВт /м² аст. Муқаррар карда шудааст, ки энергияи гармии ҷамъшуда дар материали асос (подложка), бо

тавоноии электрии ДФТО коэффисиенти пасти таносуи (0,18)- ро дорад. Камшавии тавлиди нерӯи барқ аз ҳисоби баланд шудани ҳарорати модул дар ҳудуди 1...2%, аз ҳисоби истеҳсоли энергияи гармии дастгоҳи гибридии офтобӣ ҷуброн карда мешавад. Энергияи гармии муфиди шабонарузии ДФТО ҳангоми самаранокии гармидиҳӣ 50% будан 2 кВт/м² мебошад. Истеҳсоли энергияи электрии шабонарузии ДФТО, ҳангоми самаранокии электрӣ тақрибан 8% будан, 280 Вт/м² мебошад. Самаранокии умумии электрӣ ва гармии ДФТО 58% -ро ташкил медиҳад.

Key words: photovoltaic module, heat flow, efficiency, electrical energy, thermal energy, information system, accumulated energy.

In this paper, the extreme and average monthly values of the temperature of the photovoltaic module and the air temperature of the area (Khujand) are determined. The dynamics of useful electrical and thermal energy of a solar photovoltaic thermal installation has been studied. The daily and seasonal dynamics of the accumulated thermal energy in the material of the photovoltaic module is studied, taking into account the stochastic nature of solar radiation and the local climate. It has been established that the average annual value $\langle T_{max}-T_{average} \rangle$ of the photovoltaic module is 20°C. In winter months, the $\langle T_{max}-T_{average} \rangle$ value decreases to 15°C. The accumulated energy ΔW_{ac} of a solar photovoltaic thermal installation at noon reaches 50 Wh/m² or 1.5% of the specific daily amount of solar radiation. The daily amount of solar radiation is about 3.5 kWh/m² for October. It has been established that the accumulated thermal energy in the substrate material has a low correlation coefficient (0.18) with the electrical power of the solar photovoltaic thermal installation. The decrease in electricity generation due to the increase in the temperature of the module within 1...2% is compensated by the generation of thermal energy of the hybrid solar installation. The daily useful thermal energy of solar photovoltaic thermal installation is 2 kW/m² with a thermal efficiency of 50%. The daily electricity generation of solar photovoltaic thermal installation is 280 Wh/m² with an electrical efficiency of about 8%. The overall electrical and thermal efficiency of solar photovoltaic thermal installation is 58%.

В условиях ограниченности ископаемых ресурсов и растущего использования мировых запасов углеводородов, перед каждым государством стоит важнейшая задача - поиск путей максимального смягчения проблем энергообеспечения страны в его условиях. Одним из путей решения этой глобальной задачи, стоящей перед человечеством, является использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Наиболее распространенным и доступным ВИЭ является солнечная энергия. Солнечная энергия, в настоящее время, используется для получения тепловой и электрической энергии в хозяйственных нуждах децентрализованных объектов.

Солнечные энергетические установки (СЭУ) используются для получения электроэнергии (солнечные фотоэлектрические установки - СФЭУ) и получения тепловой энергии (солнечные коллекторы - СК) [1]. Солнечные фотоэлектрические термальные установки (СФТУ), иногда называют гибридные солнечные установки, используются для одновременного получения электрической и тепловой энергии. В английской литературе принят термин photo-electric thermal installations and systems с кратким обозначением PVT [2].

Энергетическая эффективность солнечной фотоэлектрической установки (СФЭУ) исследована в период зимнего минимума солнечного излучения в условиях северных долинных регионов РТ [3]. Оценка электрической и тепловой эффективности СФЭУ, установленной внутри здания дана в [4].

В данной работе теоретически обоснована методика исследования динамики процесса получения электрической и тепловой энергии в фотоэлектрическом модуле (ФЭМ) из поликристаллического кремния. **Целью работы** является исследование суточной и сезонной динамики аккумулированной тепловой энергии в материале ФЭМ с учетом стохастического характера солнечного излучения и климата местности.

Теоретическая часть. Поток солнечной энергии P_c , поступающий на поверхность ФЭМ [3] определяется по формуле:

$$P_c = \tau \alpha S G \quad (1)$$

где τ – коэффициент пропускания стеклянного покрытия;
 G – облученность поверхности стеклянного покрытия;
 α – коэффициент поглощения;
 S – площадь поверхности ФЭМ.

Часть потока солнечной радиации (P_c) преобразуется в электрическую энергию ($P_э$), часть поглощается материалом ФЭМ, в основном стекляннм покрытием ($P_{акк}$) и оставшая часть передаётся воздуху, который находится между стекляннм покрытием и ФЭМ ($P_{тепл}$), это тепло мы можем использовать для отопления здания. Составим уравнение баланса

$$P_c = P_э + P_{акк} + P_{тепл} \quad (2)$$

Тепловые потоки, переданные окружающему ФЭМ воздуху равняются

$$P_{тепл} = P_c - P_э - P_{акк} \quad (3)$$

Коэффициент электрической эффективности ФЭМ определяется:

$$\eta_э = P_э / P_c \quad (4)$$

откуда находим

$$P_c = P_э / \eta_э \quad (5)$$

Электрическая эффективность $\eta_э$ в выражении (5) определяется температурой T_m модуля следующей зависимостью

$$\eta_э = \eta(T_m) = \eta(0^\circ\text{C}) - k \times T_m \quad (6)$$

где $\eta(T_m)$, $\eta(0^\circ\text{C})$ – КПД ФЭМ при T_m и 0°C соответственно; $k = \text{const}$.

Аккумулированная солнечная энергия материалом ФЭМ за интервал времени Δt облучения определяется выражением

$$\Delta W_{акк} = \rho V c \Delta T_m \quad (7)$$

где ρ – плотность стекла, V – объем стекла, c – теплоемкость стекла,

$\Delta T_m = T_{конч} - T_{нач}$ – разность температуры модуля за время облучения Δt . Масса подложки из окиси кремния включает массу полупроводниковых слоев из поликристаллического кремния, что составляет несколько процентов.

Полезная тепловая энергия W_i для интервала измерения Δt_i определяется по формуле

$$W_i = m_i c \Delta T_i \quad (8)$$

где m_i – масса воздуха, прошедшая через выход СФТУ за интервал Δt_i ,

c – теплоемкость воздуха, ΔT_i – разность температур на входе и выходе СФТУ.

Суточная полезная тепловая энергия СФТУ определяется

$$W_c = \sum_{i=1}^N W_i \quad (9)$$

где $N = 288$ число измерений в сутки при интервале измерений $\Delta t_i = 5$ мин.

Месячная полезная тепловая энергия СФТУ определяется суммой

$$W_m = \sum_{j=1}^D W_{cj} \quad (10)$$

где D – число дней в месяце, j – число месяца и $j = 1, D$.

Средний месячный КПД СФТУ определяется:

$$\eta_m = W_m / E_m \quad (11)$$

где W_m – месячный объём полезной тепловой энергии СФТУ, E_m – месячная сумма солнечного излучения, приходящая на площадь S приемника СФТУ.

Экспериментальная часть, обсуждение результатов.

Автоматическое управление и исследование СФТУ проводится с помощью информационной системы (ИС) на основе микрокомпьютера. ИС обеспечивает непрерывный мониторинг выходных параметров СФТУ с регистрацией данных с заданным интервалом на флешкарту с объёмом 1 Гб. Дистанционное управление (включение / отключение РVT установки и нагрузки), контроль выходных параметров осуществляется через мобильную сеть с помощью СМС (Short Message Service).

Результаты измерений выходных параметров: напряжение и ток на выходе ФЭМ, температура модуля, температура воздуха на входе и выходе воздушного коллектора СФТУ хранятся и обрабатываются в формате *Excel*. База данных получена для установки ФЭМ с азимутом юг, угла места 40° .

Суточная и сезонная динамика аккумулированной энергии в материале ФЭМ, полезной электрической и тепловой энергии СФТУ исследована на основе базы данных мониторинга параметров и приведенных выше формул.

Проведен анализ базы экспериментальных данных за период 2020 - 2021г.г.

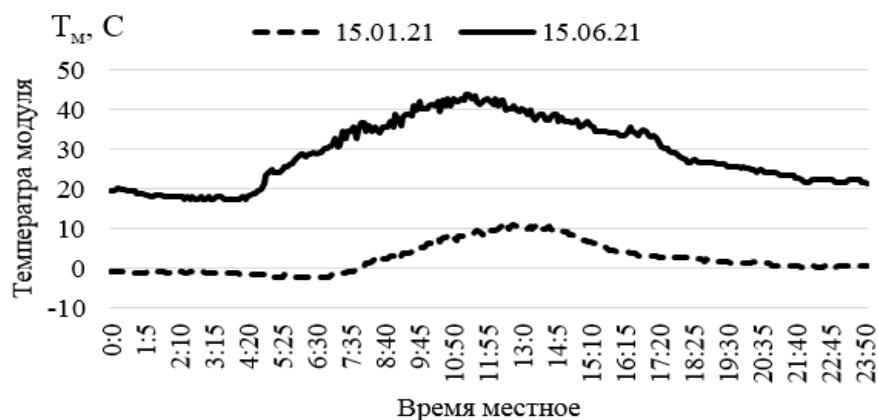


Рис.1 Мониторинг температуры фотоэлектрического модуля

Мониторинг температуры ФЭМ для середины января 15.01.2021г и середине июня 15.06.2021г. показаны на рис. 1. Максимальная температура ФЭМ составляет около 15°C, при средней температуре модуля – 1,5°C для января, самого холодного месяца года.

Максимальная температура ФЭМ составляет около 50,6°C для июня, при средней температуре модуля 30,6°C, минимальной температуре 17,4°C.

Экстремальные и средние месячные температуры ФЭМ в условиях северных регионов РТ (г.Худжанд, 2021г.) представлены на рис.2а, б.

Разность максимальной и средней месячной температуры $T_{\max}-T_{\text{средн}}$, среднегодовое значение разности температур $\langle T_{\max}-T_{\text{средн}} \rangle$ показана на Рис.2б.

Среднегодовая величина $\langle T_{\max}-T_{\text{средн}} \rangle$ ФЭМ составила 20°C. В зимние месяцы величина $\langle T_{\max}-T_{\text{средн}} \rangle$ уменьшается до 15°C.

Мониторинг температуры ФЭМ со стеклянным покрытием (СФТУ) представлен на Рис.3. Как видно, температура теплоизолированного модуля СФТУ для ясных дней в зимние месяцы достигает 50...60°C, что больше температуры воздуха внутри зданий. Рекомендуемая температура воздуха для жилых комнат составляет 20°C и для подсобных помещений не ниже 15°C. Тепловая энергия СФТУ используется для отопления, путем подачи вентилятором трубопровода нагретого модулем воздуха во внутрь зданий [4].

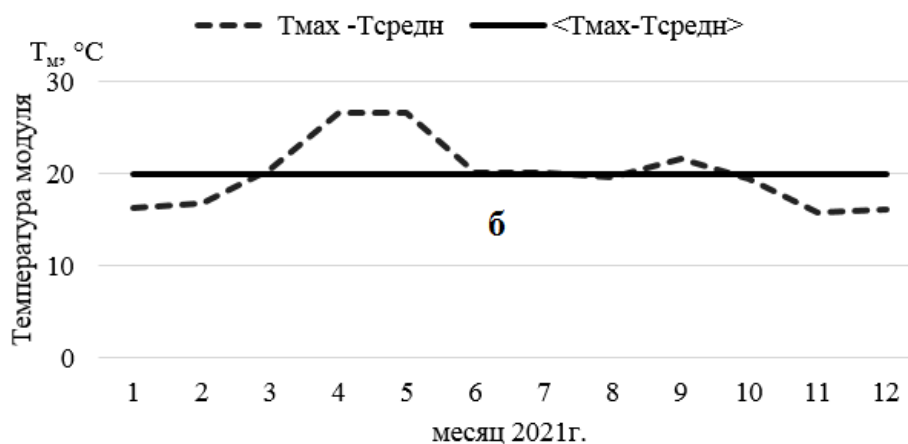
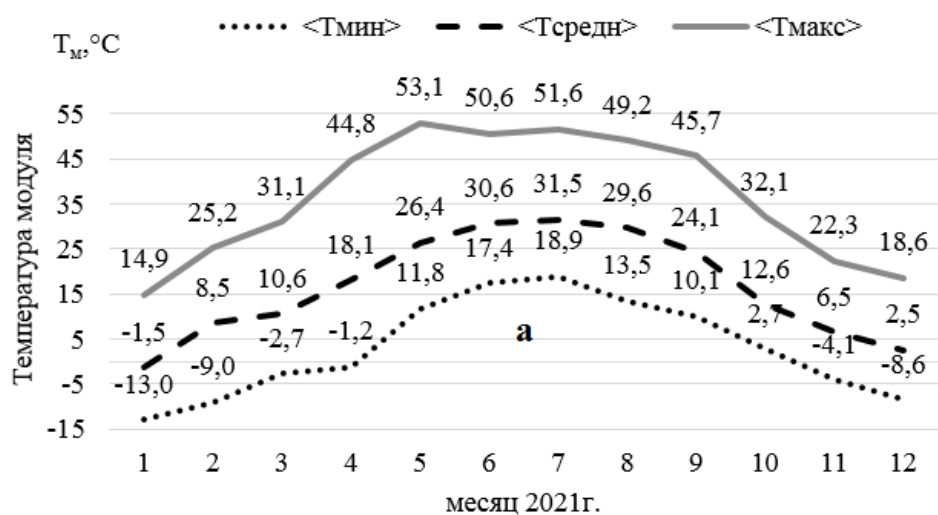


Рис.2. Экстремальные и средние месячные температуры ФЭМ (а), разность максимальной и средней месячной температуры ФЭМ (б).

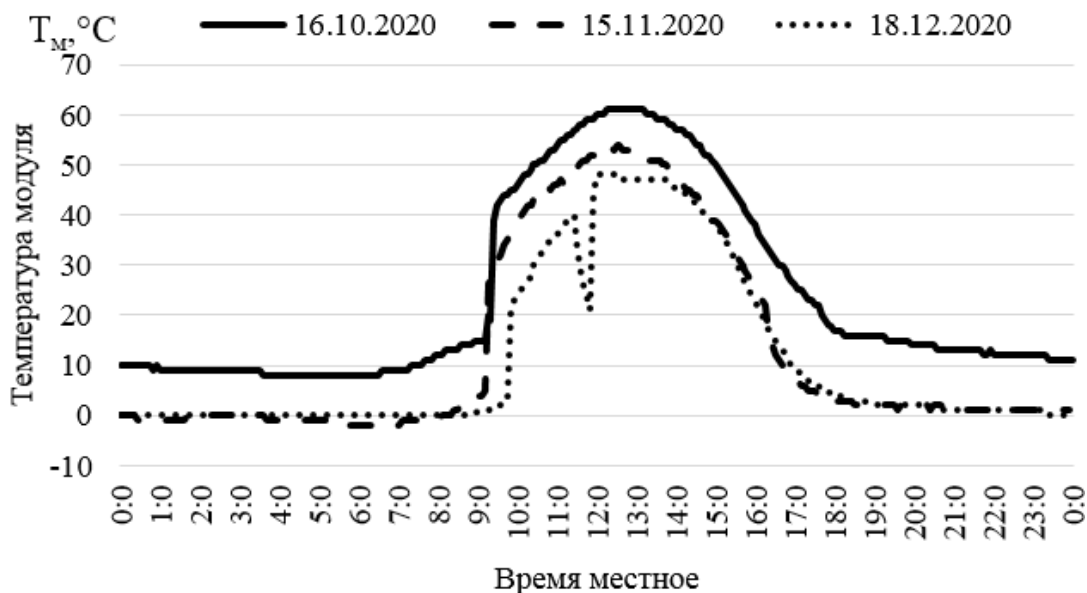


Рис.3. Мониторинг температуры ФЭМ с стеклянным покрытием (СФТУ)

$\Delta W_{\text{акк}}/S$, Втч/м²

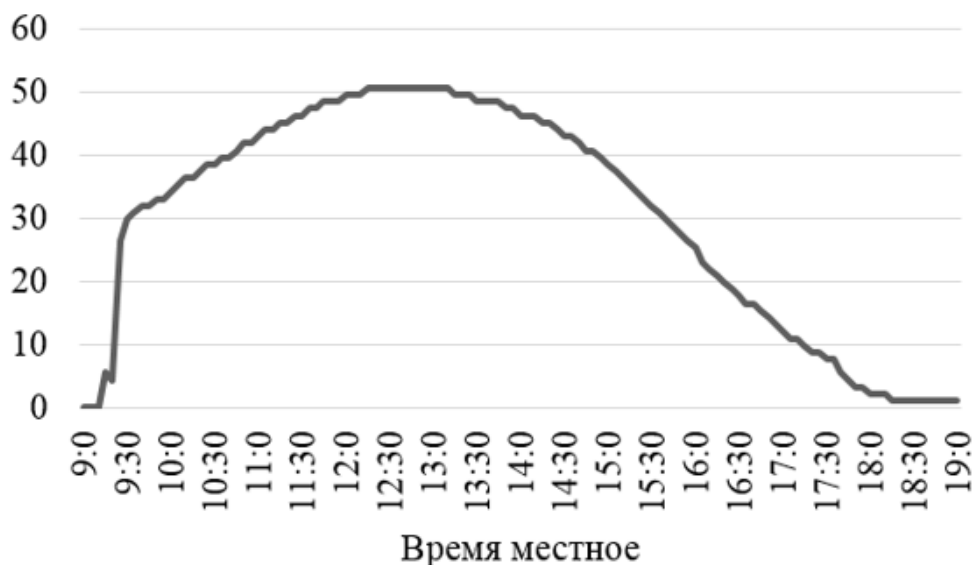


Рис.4. Динамика аккумулированной энергии модуля СФТУ (16.10.2020)

Суточная динамика удельной аккумулированной энергии $\Delta W_{\text{акк}}/S$ в материале ФЭМ показана на рис.4. Временная зависимость $\Delta W_{\text{акк}}$ определяется величиной ΔT_m для заданной времени суток $t = t_{\text{кон}}$, согласно выражению 7. Начальная температура $T_{\text{нач}}$ соответствует к началу поступления солнечного излучения (СИ) на поверхности модуля утром $t = t_{\text{нач}}$. Величины ΔT_m и $\Delta W_{\text{акк}}$ достигают максимального значения в полдень с 12.30 до 13.30 (см. рис.4). Аккумулированная энергия $\Delta W_{\text{акк}}$ СФТУ в полдень достигает 50 Втч/м² или 1,5% от удельной суточной суммы СИ. Суточная сумма СИ E_c составляет около 3,5 кВтч/м² для октября.

Установлено, что аккумулированная тепловая энергия в материале подложки имеет низкий коэффициент корреляции (0,18) с электрической мощностью СФТУ. Уменьшение выработки электроэнергии за счет роста температуры модуля в пределах 1...2% [3], компенсируется выработкой тепловой энергии гибридной солнечной установки.

Суточная выработка электроэнергии СФТУ составляет 280 Втч/м² при электрической эффективности около 8%. Суточная полезная тепловая энергия СФТУ составляет 2 кВт/м² при тепловой эффективности 50%.

Общая электрическая и тепловая эффективность СФТУ составляет 58% [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Теоретически обоснована методика исследования временной зависимости (динамики) полезной электрической и тепловой энергии солнечной фотоэлектрической термальной установки.

2. Выявлены экстремальные и средние месячные значения температуры фотоэлектрического модуля и температуры воздуха местности (г.Худжанд).

3. Исследована суточная и сезонная динамика аккумулированной энергии фотоэлектрического модуля установки с стеклянным покрытием. Установлено, что аккумулированная энергия $\Delta W_{\text{акк}}$ СФТУ в полдень достигает 50 Втч/м² или 1,5% от удельной суточной суммы СИ. Суточная сумма СИ E_c составляет около 3,5 кВтч/м² для октября.

Полученные экспериментальные данные использованы для разработки технологии оптимального режима отбора тепловой энергии солнечного фотоэлектрического модуля на основе поликристаллического кремния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виссарионов В.И. и др. Солнечная энергетика: учеб. пособие/ В.И.Виссарионов; Издательский дом МЭИ, М., 2008, 320 с.
2. Зондаг Х.А. ПВ – Тепловые коллекторы и системы: обзор. Обзоры возобновляемых и устойчивых источников энергии, 12,2008,891-959. (www.sciencedirect.com).

3. Мирзोकбилова Ф.О., Юсупова М.З., Салиев М.А., Назаров Р.Р. Эффективность солнечной фотоэлектрической установки в зимний период. - Ученые записки. Естественные и экономические науки. Изд. ХГУ им. акад. Б.Гафурова – Худжанд, 2018, №2(45), с.38-43.
4. Юсупова М.З., Мирзोकбилова Ф.О., Салиев М.А., Назаров Р.Р. Тепловая энергия солнечной фотоэлектрической установки. - Ученые записки. Естественные и экономические науки. Изд. ХГУ им. акад. Б.Гафурова – Худжанд, 2018, №2(45), с.51-56.
5. Мирзोकбилова Ф.О., М.А.Салиев. Мониторинг выработки электрической и тепловой энергии солнечной фотоэлектрической термальной установки. // XV-ая Международная конференция по электромеханике и робототехнике, 15-18 апреля 2020г. – Уфа, РФ.

АДАБИЁТ

1. Виссарионов В.И. ва дигарон. Энергетикаи офтобӣ: дастури таълимӣ/ В.И.Виссарионов; Нашриёти МЭИ, М., 2008, 320 с.
2. Зондаг Х.А. PV - Коллекторҳо ва системаҳои гармидиҳӣ: Баррасӣ. Баррасии энергияи барқароршаванда ва устувор, 12,2008,891-959. (www.sciencedirect.com).
3. Мирзोकбилова Ф.О., Юсупова М.З., Салиев М.А., Назаров Р.Р. Самаранокии дастгоҳи фотоэлектрикҳои офтобӣ дар фасли зимистон. – Номаи донишгоҳ. Илмҳои табиатшиносӣ ва иқтисодӣ. Нашриёти ДДХ ба номи акад. Б.Гафуров – Хучанд, 2018, №2 (45), с.38-43.
4. Юсупова М.З., Мирзोकбилова Ф.О., Салиев М.А., Назаров Р.Р. Энергияи гармии дастгоҳи фотоэлектрикҳои офтобӣ. - Номаи донишгоҳ. Илмҳои табиатшиносӣ ва иқтисодӣ. Нашриёти ДДХ ба номи акад. Б.Гафуров – Хучанд, 2018, №2 (45), с.51-56.
5. Мирзोकбилова Ф.О., Салиев М.А. Мониторинги истеҳсоли энергияи электрӣ ва гармии дастгоҳи гармидиҳии фотоэлектрикӣ. // Конфронси XV байналмилалӣ оид ба электромеханика ва робототехника, 15-18 апрели 2020. - Уфа, Федератсияи Россия.

LITERATURE

1. Vissarionov V.I. and others. Solar energy: textbook. allowance / V.I. Vissarionov; MPEI Publishing House, M., 2008, 320 p.
2. Zondag H.A. PV – Thermal collectors and systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12,2008,891-959. (www.sciencedirect.com).
3. Mirzokobilova F.O., Yusupova M.Z., Saliev M.A., Nazarov R.R. The efficiency of a solar photovoltaic installation in winter. - Scientific notes. Natural and economic sciences. Ed. KhSU them. acad. B. Gafurova - Khujand, 2018, No. 2 (45), pp. 38-43.
4. Yusupova M.Z., Mirzokobilova F.O., Saliev M.A., Nazarov R.R. Thermal energy of a solar photovoltaic installation. - Scientific notes. Natural and economic sciences. Ed. KhSU them. acad. B. Gafurova - Khujand, 2018, No. 2 (45), pp. 51-56.
5. Mirzokobilova F.O., M.A.Saliev. Monitoring of the generation of electrical and thermal energy of a solar photovoltaic thermal installation. // XV International Conference on Electromechanics and Robotics, April 15-18, 2020. - Ufa, Russian Federation.