



УДК 553.981.2

doi.10.70769/2181-284.ME.2(23).2026.16

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАССИВНОГО ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЛАЖНОГО ТЕКСТИЛЬНОГО СЛОЯ В УСЛОВИЯХ ЖАРКОГО КЛИМАТА

Тураев Фарходжон Шухратжон угли¹ – магистр, ассистент,
<https://orcid.org/0009-0006-1573-2249> e-mail: farxod.turayev@tdtu.uz
 Юлдошев Исроил Абриевич¹ - доктор технических наук, профессор
<https://orcid.org/0000-0003-1335-0862> e-mail: isroil.yuldoshev@tdtu.uz
 Ботиров Бозорбек Мусурмон угли¹ - PhD,
<https://orcid.org/0000-0003-2515-6274> e-mail: bozorbekbotirov@gmail.com
 Жураев Химматали Номозович² - PhD,
<https://orcid.org/0000-0001-8963-3848> e-mail: knjuraev@uzsci.net
 Машарипова Гавхар Абдуллаевна³ - магистр
<https://orcid.org/0009-0004-7187-3893> e-mail: masharipova_g@nuu.uz

¹Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова,
г. Ташкент, Узбекистан

²Физико-технический институт имени С. А. Азимова Академии наук Республики
Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан

³Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, г. Ташкент, Узбекистан

Аннотация. Введение. Повышение температуры фотоэлектрических модулей в условиях интенсивного солнечного излучения приводит к снижению их электрической эффективности и ускорению деградации материалов. В жарком и сухом климате особую актуальность приобретают пассивные методы охлаждения, не требующие дополнительных энергетических затрат.

Методы и материалы. В работе разработана одномерная стационарная математическая модель пассивного испарительного охлаждения фотоэлектрического модуля с использованием влажного текстильного слоя, размещённого на тыльной поверхности панели. Модель основана на совместном рассмотрении теплопроводности в многослойной структуре фотоэлектрического модуля, испарительного массообмена и психрометрических параметров влажного воздуха. В расчётах учитывались температура воздуха, относительная влажность, влагосодержание, барометрическое давление, скорость воздушного потока и температурная зависимость КПД фотоэлектрического преобразования.

Результаты. Для климатических условий города Ташкента при температуре воздуха 40 °С и относительной влажности 20 % получено значение температуры мокрого термометра около 24 °С. На основе уравнений теплопроводности установлено, что температура кремниевого слоя фотоэлектрического модуля снижается примерно до 26 °С, а фактический КПД модуля составляет около 13,6 %, что близко к проектному значению 14 %.

Заключение. Полученные результаты показывают, что применение влажного капиллярно-пористого текстильного слоя является эффективным способом пассивного испарительного охлаждения фотоэлектрических модулей. Предложенный метод позволяет снизить температурные потери фотоэлектрического преобразования без дополнительных энергетических затрат и является перспективным для эксплуатации солнечных панелей в условиях жаркого и сухого климата.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, пассивное охлаждение, испарительное охлаждение, влажный текстильный слой, математическая модель, температура мокрого термометра, теплопроводность, кремниевый слой, энергетическая эффективность.



Дата поступления: 11.05.2026. После обработки: 15.05.2025 Принято печать: 22.06.2026

For citation: Turaev F.Sh., Yuldoshev I.A., Botirov B.M., Juraev Kh.N., Masharipova G.A. *Mathematical Modeling of Passive Evaporative Cooling of a Photovoltaic Module using a Wet Textile Layer Under Hot Climate Conditions. Alternative Energy. 2026. 2(23). pp. 170-182. (In Rus.)*

UDC 553.981.2

MATHEMATICAL MODELING OF PASSIVE EVAPORATIVE COOLING OF A PHOTOVOLTAIC MODULE USING A WET TEXTILE LAYER UNDER HOT CLIMATE CONDITIONS

Turaev Farhodjon Shukhratjon ugli¹ – Master's, Assistant,

<https://orcid.org/0009-0006-1573-2249> e-mail: farxod.turayev@tdtu.uz

Yuldoshev Isroil Abriyevich¹ – Doctor of Technical Sciences, Professor,

<https://orcid.org/0000-0003-1335-0862> e-mail: isroil.yuldoshev@tdtu.uz

Botirov Bozorbek Musurmon ugli¹ – PhD in Technical Sciences,

<https://orcid.org/0000-0003-2515-6274> e-mail: bozorbekbotirov@gmail.com

Juraev Khimmatali Nomozovich² – PhD in Physical and Mathematical Sciences,

<https://orcid.org/0000-0001-8963-3848> e-mail: knjuraev@uzsci.net

Masharipova Gavkhar Abdullayevna³ – Master of Science

<https://orcid.org/0009-0004-7187-3893> e-mail: masharipova_g@nuu.uz

¹Islam Karimov Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

²S.A. Azimov Institute of Physics and Technology, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

³National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, Tashkent, Uzbekistan

Abstract. Introduction. *The increase in the operating temperature of photovoltaic (PV) modules under intense solar radiation leads to a reduction in electrical efficiency and accelerates material degradation. In hot and arid climates, passive cooling techniques that do not require additional energy consumption are of particular interest.*

Methods and Materials. *A one-dimensional steady-state mathematical model of passive evaporative cooling for a photovoltaic module employing a wet textile layer attached to the rear surface of the panel was developed. The model is based on the coupled analysis of heat conduction within the multilayer structure of the photovoltaic module, evaporative mass transfer, and the psychrometric properties of humid air. The calculations take into account ambient air temperature, relative humidity, humidity ratio, barometric pressure, airflow velocity, and the temperature dependence of photovoltaic conversion efficiency.*

Results. *For the climatic conditions of Tashkent, with an ambient air temperature of 40 °C and a relative humidity of 20%, the wet-bulb temperature was determined to be approximately 24 °C. Based on heat-conduction equations, the temperature of the silicon layer of the photovoltaic module was found to decrease to approximately 26 °C. The resulting actual module efficiency was estimated at about 13.6%, which is close to the nominal design efficiency of 14%.*

Conclusion. *The obtained results demonstrate that the application of a wet capillary-porous textile layer is an effective method of passive evaporative cooling for photovoltaic modules. The proposed approach reduces temperature-induced losses in photovoltaic energy conversion without additional energy consumption and is particularly promising for solar energy systems operating in hot and dry climatic conditions.*

Keywords: *photovoltaic module, passive cooling, evaporative cooling, wet textile layer, mathematical modeling, wet-bulb temperature, heat conduction, silicon layer, energy efficiency.*



UO'K 553.981.2

ISSIQ IQLIM SHAROITIDA NAM TO'QIMACHILIK QATLAMI YORDAMIDA FOTOELEKTR MODULNING PASSIV BUG'LATIB SOVITILISHINI MATEMATIK MODELLASHTIRISH

Turayev Farxodjon Shuxratjon o'g'li¹ – magistr, assistant,

<https://orcid.org/0009-0006-1573-2249> e-mail: farxod.turayev@tdtu.uz

Yuldoshev Isroil Abriyevich¹ – texnika fanlari doktori, professor,

<https://orcid.org/0000-0003-1335-0862> e-mail: isroil.yuldoshev@tdtu.uz

Botirov Bozorbek Musurmon o'g'li¹ – texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD),

<https://orcid.org/0000-0003-2515-6274> e-mail: bozorbekbotirov@gmail.com

Jurayev Ximmatali Nomozovich² – fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD),

<https://orcid.org/0000-0001-8963-3848> e-mail: knjuraev@uzsci.net

Masharipova Gavhar Abdullayevna³ – magistr

<https://orcid.org/0009-0004-7187-3893> e-mail: masharipova_g@nuu.uz

¹Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, O'zbekiston

²O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi S. A. Azimov nomidagi Fizika-texnika instituti, Toshkent shahri, O'zbekiston

³Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti, Toshkent shahri, O'zbekiston

Annotatsiya. Kirish. Kuchli quyosh nurlanishi ta'sirida fotoelektr modullarining ishchi haroratining ortishi ularning elektr samaradorligini pasaytiradi hamda konstruksion materiallarning degradatsiya jarayonlarini tezlashtiradi. Issiq va quruq iqlim sharoitlarida qo'shimcha energiya sarfini talab qilmaydigan passiv sovitish usullaridan foydalanish alohida ahamiyat kasb etadi.

Metodlar va materiallar. Mazkur ishda fotoelektr modulning orqa qismiga joylashtirilgan nam to'qimachilik qatlami yordamida amalga oshiriladigan passiv bug'latib sovitishning bir o'lchamli statsionar matematik modeli ishlab chiqildi. Model fotoelektr modulning ko'p qatlamli tuzilmasida issiqlik o'tkazuvchanligi, bug'lanish natijasidagi massa almashinuvi hamda nam havoning psixrometrik parametrlarini kompleks ravishda hisobga olishga asoslangan. Hisoblashlarda havo harorati, nisbiy namlik, namlik miqdori, barometrik bosim, havo oqimi tezligi hamda fotoelektrik energiya konversiyasi foydali ish koeffitsientining haroratga bog'liqligi e'tiborga olindi.

Natijalar. Toshkent shahri iqlim sharoitlari uchun, havo harorati 40 °C va nisbiy namlik 20 % bo'lganda, nam termometr harorati taxminan 24 °C ekanligi aniqlandi. Issiqlik o'tkazuvchanlik tenglamalari asosida fotoelektr modulning kremniy qatlamidagi harorat taxminan 26 °C gacha pasayishi ko'rsatildi. Natijada modulning haqiqiy foydali ish koeffitsienti 13,6 % ni tashkil etib, bu uning 14 % ga teng loyihaviy samaradorligiga yaqin qiymat ekanligi aniqlandi.

Xulosa. Olingan natijalar nam kapillyar-g'ovakli to'qimachilik qatlamidan foydalanish fotoelektr modullarni passiv bug'latib sovitishning samarali usuli ekanligini ko'rsatadi. Taklif etilgan usul qo'shimcha energiya sarfisiz fotoelektrik energiya konversiyasidagi harorat tufayli yuzaga keladigan yo'qotishlarni kamaytiradi hamda issiq va quruq iqlim sharoitlarida ishlovchi quyosh energetikasi tizimlari uchun istiqbolli yechim hisoblanadi.

Kalit so'zlar: fotoelektr modul, passiv sovitish, bug'latib sovitish, nam to'qimachilik qatlami, matematik modelashtirish, nam termometr harorati, issiqlik o'tkazuvchanligi, kremniy qatlami, energetik samaradorlik.

Введение

В последние десятилетия фотоэлектрические системы получили широкое распространение в качестве одного из наиболее перспективных источников возобновляемой энергии. Их применение способствует снижению потребления ископаемого топлива и уменьшению выбросов парниковых газов. Однако эффективность фотоэлектрических



модулей в значительной степени зависит от их температурного режима [1–4]. В условиях интенсивного солнечного излучения значительная часть поглощённой солнечной энергии преобразуется в теплоту, что приводит к повышению температуры фотоэлектрических элементов и снижению электрической эффективности модуля [1, 2].

Известно, что повышение температуры кремниевых фотоэлектрических элементов на каждый градус сверх стандартной рабочей температуры сопровождается уменьшением выходной мощности и коэффициента полезного действия [1, 3]. Кроме того, длительная эксплуатация при повышенных температурах ускоряет процессы старения материалов, снижает срок службы модулей и ухудшает их эксплуатационные характеристики [2, 4]. Поэтому разработка эффективных методов охлаждения фотоэлектрических модулей является одной из актуальных задач современной солнечной энергетики.

Для снижения температуры фотоэлектрических модулей предложены различные методы охлаждения, включая воздушное и жидкостное охлаждение, применение теплообменников, фазопереходных материалов, радиационное охлаждение и гибридные фотоэлектрические тепловые системы [5–7]. Несмотря на высокую эффективность активных методов, их применение связано с дополнительными энергетическими затратами, усложнением конструкции и увеличением эксплуатационных расходов. В связи с этим особый интерес представляют пассивные методы охлаждения, не требующие внешних источников энергии [6, 7].

Одним из наиболее перспективных направлений является испарительное охлаждение, основанное на использовании скрытой теплоты парообразования воды. При испарении влаги с поверхности капиллярно-пористого материала происходит интенсивный отвод теплоты, что обеспечивает снижение температуры охлаждаемого объекта. Использование влажного текстильного слоя на тыльной поверхности фотоэлектрического модуля позволяет реализовать данный механизм без применения насосов и других энергозатратных устройств [8–12].

Анализ опубликованных исследований показывает, что большинство работ посвящено экспериментальному изучению различных способов охлаждения фотоэлектрических модулей, тогда как вопросы математического моделирования процессов теплопередачи и испарительного охлаждения с использованием текстильных материалов остаются недостаточно исследованными [11, 12]. Особенно актуальной является разработка моделей, учитывающих совместное влияние температуры воздуха, относительной влажности, психрометрических параметров влажного воздуха и теплопроводности многослойной структуры фотоэлектрического модуля [13–21].

Целью настоящей работы является разработка математической модели пассивного испарительного охлаждения фотоэлектрического модуля с использованием влажного текстильного слоя, установленного на тыльной поверхности панели, а также оценка влияния климатических условий на температуру кремниевого слоя и энергетическую эффективность фотоэлектрического преобразования [22–28].

Методы и материалы

Использование испарительного охлаждения фотоэлектрических панелей (ФЭП) основывается на эффекте охлаждения смоченных тел на открытом воздухе даже тогда, когда температура окружающего воздуха больше температуры смоченного тела.

Не вызывает сомнений то, что охлаждение смоченного тела происходит за счёт испарения влаги с поверхности тепла.

Научные коллектива многих стран проводят исследования и поиск различных способов охлаждения ФЭП для повышения их эффективности, которые были бы приняты в промышленную многочисленных способ охлаждения ФЭП наиболее простым, дешёвым и эффективным представляется способ пассивного испарительного охлаждения ФЭП, так как при испарении 1 кг воды с нагретой поверхности будет отводиться около 2500 КДж тепла и сопровождаться снижением её температуры – в пределе до температуры мокрого термометра t_m .



Испарение влаги с охлаждаемой поверхности зависит от параметров окружающего влажного воздуха.

Исследование процесса охлаждения влажной ткани за счёт испарения из неё влаги на открытом воздухе требует теоретических и практических изысканий с целью определения возможности и применимости процесса испарения влаги для охлаждения и создания практически приемлемого способа охлаждения ФЭП.

При проектировании и эксплуатации системы испарительного охлаждения необходимо знать:

1. Достижимую температуру охладителя (влажной ткани), т.е. температуру мокрого термометра в зависимости от физических параметров окружающего воздуха;

2. Температуру кремниевого слоя ФЭП, от которой в конечном итоге зависит эффективность ФЭП;

3. Расход вода на охлаждение ФЭП. Охлаждение влажной ткани за счёт испарения влаги происходит в среде окружающего влажного воздуха, поэтому важным является выявление связи между температурой влажного воздуха t , температурой мокрого термометра t_m и влагосодержанием $\bar{d}$ в кг/кг сухого воздуха.

Определение взаимосвязи между параметрами влажного воздуха выполняется на основании математической модели баланса теплом, поступающих на нагрев и испарение влаги и отводимых с паром от охлаждаемой ФЭП.

Термодинамический метод позволяет выявить влияние параметров окружающего воздуха на температуру охладителя (влажной ткани), поз. 2 рис.1, не учитывая процессы тепло и массообмена, происходящие в объёме самого охладителя.

Для создания математической модели охлаждения ФЭП рассмотрим схему теплового баланса охлаждаемой фотоэлектрической панели (ФЭП) на рис. 1.

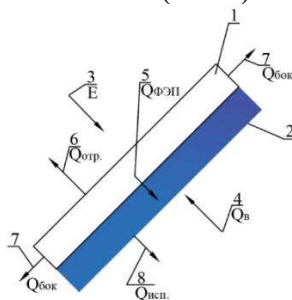


Рис. 1. Схема теплового баланса охлаждаемой фотоэлектрической панели (ФЭП) 1- Фотоэлектрическая панель; 2-Охладитель (влажная ткань); 3-Падающая энергия солнца E , Вт/м²; 4-Тепло от воздуха к охладителю Q_v , Дж.; 5-Тепло от ФЭП к охладителю $Q_{ФЭП}$, Дж; 6- Отражённое тепло $Q_{отр}$, Дж.; 7-Потеря тепла через боковые стенки ФЭП $Q_{бок}$, Дж.; 8-Тепло испарения воды $Q_{исп}$, Дж.; t – Температура влажного воздуха, °С; t_m – Температура мокрого термометра, °С; B – Барометрическое давление, Па (кПа); $\bar{d}$ – Влагосодержание, кг или грамм в 1 кг сухого воздуха; φ – Относительная влажность, %.

Из рис.1 видно, что падающая на ФЭП солнечная энергия E частично отражается от ФЭП в количестве $Q_{отр}$ и частично теряется в виде $Q_{бок}$ с боковых поверхностей ФЭП.

Оставшаяся энергия $Q_{ФЭП} = E - Q_{отр} - Q_{бок}$ в виде тепла идёт на нагрев самой ФЭП и от неё идёт на нагрев и испарение влаги охладителя – влажной ткани. Одновременно на нагрев и испарение влаги поступает тепло Q_v от окружающего влажного воздуха. Сумма теплота $Q_{ФЭП} + Q_v$, затраченная на испарение влаги, полностью переходит в теплосодержание образовавшегося пара $Q_{исп}$ и удаляется в окружающий воздух.

При испарительном охлаждении количество тепла Q , равное сумме теплота воздуха Q_v с теплотой нагретой ФЭП $Q_{ФЭП}$, необходимое для испарения влаги и подогрева $d(\bar{d})$ кг. Воды до температура воздуха, определяется выражением.



$$Q = Q_v + Q_{фЭП} = [z_m + c_{рп}(t - t_m)]d(\bar{d}), \quad (1)$$

где z_m – теплота парообразования при температуре мокрого термометра;

$c_{рп}$ – теплоёмкость водяного пара

c другой стороны, образовавшийся пар с теплосодержанием

$Q_{исп} = Q_{фЭП} + Q_v$ при смешении с воздухом изменяет температуру близлежащих слоёв воздуха на dt , т.е.

$$Q_{исп} = Q_{фЭП} + Q_v = -c_p dt = -(c_{рв} + c_{рп} \cdot \bar{d}) \cdot dt, \quad (2)$$

где c_p – теплоёмкость влажного воздуха;

$c_{рв}$ – теплоёмкость сухого воздуха;

$\bar{d}$ – влагосодержание при температуре воздуха.

Знак минус показывает, что влага удаляется.

Равенство (1) и (2) даёт дифференциальное уравнение процесса адиабатного насыщения

$$[z_m + c_{рп}(t - t_m)]d(\bar{d}) = -(c_{рв} + c_{рп} \cdot \bar{d}) \cdot dt \quad (3)$$

Интегрирование уравнения (3) в пределах от t до t_m и от $\bar{d}$ до $\bar{d}_m$ даёт температуру мокрого термометра

$$t_m = t - \frac{z_m(\bar{d}_m - \bar{d})}{c_{рв} + c_{рп} \cdot \bar{d}}, \quad (4)$$

где t – температура влажного воздуха;

$\bar{d}_m$ – влагосодержание насыщенного воздуха при температуре мокрого термометра.

Выражение (4) так же можно получить из уравнений теплосодержания пара.

$$Q_{исп} = z_m \cdot d(\bar{d}) \quad (5)$$

и

$$Q_{исп} = c_p d(t), \quad (6)$$

где z_m – скрытая теплота парообразования при температуре мокрого термометра t_m ,
 c_p – теплоёмкость влажного воздуха при температуре t .

Приравнявая (5) и (6) получим

$$z_m \cdot d(\bar{d}) = c_p d(t) \quad (7)$$

Интегрирование уравнения (7) в пределах от $\bar{d}_m$ до $\bar{d}$ и от t до t_m

$$\int_{\bar{d}_m}^{\bar{d}} z_m \cdot d(\bar{d}) = \int_t^{t_m} c_p d(t)$$

даёт уравнение

$$z_m(\bar{d}_m - \bar{d}) = c_p(t - t_m) \quad (8)$$

После преобразования (8) относительно t_m получается

$$t_m = \frac{c_p t - z_m(\bar{d}_m - \bar{d})}{c_p} = t - \frac{z_m(\bar{d}_m - \bar{d})}{c_p} \quad (9)$$

Учитывая, что теплоёмкость влажного воздуха c_p равно сумме теплоёмкости 1 кг сухого воздуха $c_{рв}$ и теплоёмкости $\bar{d}$ кг/кг сухого воздуха пара $c_{рп}$, т.е.

$$c_p = c_{рв} \cdot 1 + c_{рп} \cdot \bar{d} \quad (10)$$

Поставив (10) в (9) окончательно получим выражение для температура мокрого термометра

$$t_m = t - \frac{z_m(\bar{d}_m - \bar{d})}{c_{рв} + c_{рп} \cdot \bar{d}} \quad (11)$$

Выражение (4) показывает, что температура мокрого термометра является функцией температуры воздуха и его влагосодержания и что при полном насыщении воздуха $\bar{d}_m = \bar{d}$ температура воздуха t становится равной температуре мокрого термометра t_m , т.е. ($t = t_m$). Однако при безграничном объёме окружающего воздуха влагосодержание воздуха в



регионах с высокой температурой и средним значением относительной влажности (около 40%) всего влагосодержание $\bar{d}$ будет меньше $\bar{d}_m$, т.е. $d < \bar{d}_m$ и $t_m < t$.

Из выражения (11) следует:

1. Теплота, поступающая от ФЭП ($Q_{\text{ФЭП}}$) к влажной ткани не влияет на t_m ;
2. Температура мокрого термометра зависит только от температуры воздуха t и от влагосодержания $\bar{d}$;
3. Движущей силой испарения является разница влагосодержаний ($\bar{d}_m - \bar{d}$) при температуре воздуха t ;
4. Выражение (11) позволяет численно определить t_m , т.е. ту температуру, до которой может быть охлаждена влажная ткань (охладитель);

Выражения (11) можно упростить.

Произведение $C_{\text{рп}} \cdot \bar{d}$ мало и, поэтому, его можно не учитывать, а $C_{\text{рв}}$ принять 1,005 кДж/кг·°С, так как теплоёмкость сухого воздуха $C_{\text{рв}}$ в интервале температур от 0°С до 60°С постоянна.

$$\text{Отсюда } t_m = t - \frac{z_m(\bar{d}_m - \bar{d})}{1,005} \approx t - z_m(\bar{d}_m - \bar{d}) \quad (12)$$

$C_{\text{рв}}$ — Теплота сухого воздуха по таблица физический свойства сухого воздуха

Выполнения расчета t_m по формуле (12) предлагается по следующей схеме.

1. По измерения и справочным данным получить исходные параметры воздуха.

t — температура воздуха, °С (К)

φ — относительная влажность воздуха, %

B — барометрическое давление, Па (кПа).

2. По температуре воздуха t по таблице насыщенного пара определить давление насыщения P_n .

3. Определить парциальное давление пара по формуле

$$P_n = \varphi \cdot P_n. \quad (13)$$

4. Определить влагосодержание $\bar{d}$ по формуле

$$\bar{d} = 623 \frac{P_n}{B - P_n}, \text{ г/кг. Сухого воздуха} \quad (14)$$

5. Температура мокрого термометра t_m по формуле (12) определяется методом последовательных приближений.

Задаётся t_m . По заданной t_m и $\varphi = 100\%$ определяется P_n и по формуле (14) определяется $\bar{d}_m$.

Подставив $\bar{d}$ и $\bar{d}_m$ в формуле (12) получаем расчётную t_m .

Расчёт ведётся до тех пор, пока заданное значение t_m станет с достаточной точностью равной расчётной t_m .

Результаты

Для оценки эффективности испарительного охлаждения был выполнен расчёт основных психрометрических параметров влажного воздуха при климатических условиях города Ташкента.

Полученное значение температуры мокрого термометра t_m принималось в качестве приближённой температуры влажного текстильного охладителя.

Пример численного определения температуры охладителя t_m , температуры стекла t_1 , и температура солнечного элемента t_3 (рис.3)

Расчётные данные для город Ташкента в июле месяце и расчётная схема представлены в таблице 1 и на рис.2 и на рис.3.

Определяем давление насыщения P_n при $t_b = 40^\circ\text{C}$ по таблице насыщенного пара

$$P_n = 0,07520 \text{ кгс/см}^2$$

Значения давления насыщенного водяного пара определялись по стандартным психрометрическим таблицам в зависимости от температуры воздуха [14, 15].

Парциальное давление пара

$$P_{\text{п}} = \varphi \cdot P_{\text{н}} = 0,25 \cdot 0,07520 = 0,0188 \text{ кгс/см}^2$$

Влажосодержание воздуха

$$\bar{d} = 623 \frac{P_{\text{п}}}{B - P_{\text{п}}} = 623 \frac{0,0188}{0,9671 - 0,0188} = 12,35 \text{ г/кг}$$

Для расчёта температура мокрого термометра принимаем $t_{\text{м}} = 23^{\circ}\text{C}$.

Давление насыщения при этой температуре

$$P_{\text{н}} = 0,02863 \text{ кгс/см}^2.$$

Парциальное давление пара при $\varphi = 100\%$

$$P_{\text{п}} = \varphi \cdot P_{\text{н}} = 1 \cdot 0,02863 = 0,02863 \text{ кгс/см}^2.$$

Влажосодержание при $t_{\text{м}} = 23^{\circ}\text{C}$.

$$\bar{d}_{\text{м}} = 623 \frac{P_{\text{п}}}{B - P_{\text{п}}} = 623 \frac{0,02863}{0,9671 - 0,02863} = 19,0 \text{ г/кг}$$

Расчётная температура $t_{\text{мр}}$

$$t_{\text{мр}} = t_{\text{с}} - \frac{z_{\text{м}}(\bar{d}_{\text{м}} - \bar{d})}{C_{\text{рп}}} = 623 \frac{584,3(19,0 - 12,35) \cdot 10^{-3}}{0,24} = 40 - 16,2 = 23,8^{\circ}\text{C}$$

Так как принятое $t_{\text{м}} = 23^{\circ}\text{C}$ близко к расчётной $t_{\text{мр}} = 23,8^{\circ}\text{C}$ принимаем температуру мокрого термометра (охладителя) равной 24°C .

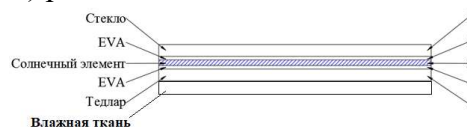


Рис. 2. Схема многослойной структуры фотоэлектрического модуля с влажным текстильным охладителем.

В таблице 2 приведены исходные параметры многослойной структуры фотоэлектрического модуля и расчётные климатические условия, использованные при моделировании процесса испарительного охлаждения.

Таблица 1

№ п/п	Наименование	Толщина δ , мм	Коэффициент Теплопроводность λ , Вт/м.К
1	Стекло	4	1,0
2	EVA	0,2	0,35
3	Солнечный элемент	0,2	14,0
4	EVA	0,2	0,35
5	Тедлар	3	1,7
6	Температура воздуха, $t_{\text{в}} = 40^{\circ}\text{C}$		
7	Влажность воздуха, $\varphi = 20\%$		
8	Плотность лучистого потока, $E = 1000 \text{ Вт/м}^2$		
9	Площадь ФЭП F, м ²		1,94
10	Барометрическое давление B, Па/ кгс/см ² .		98000/09671

На рисунок 3 представлена расчётная схема распределения температуры в многослойной структуре фотоэлектрического модуля при испарительном охлаждении.

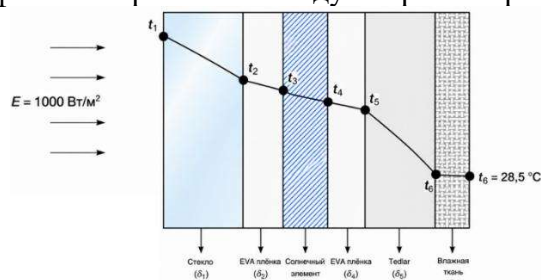


Рис. 3. Схема теплопередачи и распределения температур в фотоэлектрическом модуле с влажным текстильным охладителем.



Из рис. 3 видно, что минимальная температура достигается в области влажного текстильного слоя, температура которого ограничивается температурой мокрого термометра окружающего воздуха.

В расчётах принималось значение скрытой теплоты парообразования воды: $z_m = 584,3$ ккал/кг – скрытая теплота парообразования по таблице насыщенного пара

Значение z_m определялось по табличным данным свойств насыщенного водяного пара [14,15].

$C_{рп} = 0,24$ ккал/кг·°C (1,005 кДж/ кг·°C) – теплоёмкость пара.

Далее, используя формулу передачи тепла теплопроводностью через многослойную стенку (рис. 2)

$$t_1 - t_b = q \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{\delta_5}{\lambda_5} \right) \quad (15)$$

можно рассчитать температуру любого слоя.

Толщины слоёв δ и коэффициент теплопроводность λ материалов приведены в таблице 1, а плотность теплового потока q принимается равной плотности лучистого потока $E = 800$ Вт/м².

Температуру первого слоя (стекла) получим подставляя указанные данные в выражение (15).

$$t_1 - t_b = 800 \left(\frac{0,004}{1} + \frac{0,0002}{0,35} + \frac{0,0002}{14} + \frac{0,0002}{0,35} + \frac{0,003}{1,7} \right) =$$

$$= 800(0,004 + 0,000571 + 0,000014 + 0,000571 + 0,00176) = 5,5^\circ\text{C}$$

Отсюда температура стекла

$$t_1 = 5,5 + t_b = 5,5 + 24 = 29,5^\circ\text{C}.$$

Представляющий практический интерес температура солнечного элемента (кремниевого слоя) будет равна

$$t_3 = t_6 + 800 \left(\frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{\delta_5}{\lambda_5} \right) = 24 + 800 (0,000014 + 0,000571 + 0,00176) = 24 + 2$$

$$= 26^\circ\text{C}$$

По температуре солнечного элемента t_3 рассчитывается фактический КПД ФЭП.

Если принять по литературным данным среднее значение коэффициента снижения КПД ФЭП при увеличении температуры панели на 1 °C сверх проектной (стандартной) температуры $t_{ст} = 26^\circ\text{C}$ $b_y = 0,45\%/^\circ\text{C}$, что уменьшение проектного КПД, равного 14% для кремниевых ФЭП, составит

$$\Delta\eta = \eta_{пр} \frac{b_y}{100} (t_3 - t_{ст}) = 14 \cdot \frac{0,45}{100} (26 - 20) \approx 0,4\%,$$

т.е. фактический КПД будет равен

$$\eta_{ф} = \eta_{пр} - \Delta\eta = 14 - 0,4 = 13,6\%.$$

Отсюда видно, что испарительное охлаждение является очень эффективным способом эксплуатации ФЭП с фактическим КПД, близким к проектному значению.

Обсуждение

Результаты математического моделирования показали, что при температуре окружающего воздуха 40 °C и относительной влажности 20 % температура мокрого термометра составляет около 24 °C. Следовательно, максимально возможное снижение температуры влажного текстильного охладителя достигает 16 °C относительно температуры окружающего воздуха. Полученное значение подтверждает высокий потенциал испарительного охлаждения в условиях жаркого и сухого климата.

Расчёты распределения температуры в многослойной структуре фотоэлектрического модуля показали, что температура наружного стеклянного слоя составляет 29,5 °C, тогда как температура кремниевого фотоэлектрического элемента достигает 26 °C. Таким образом, температура кремниевого слоя оказывается на 14 °C ниже температуры окружающего воздуха и лишь на 2 °C выше температуры влажного текстильного охладителя. Это свидетельствует о высокой эффективности передачи теплоты через многослойную структуру модуля к испаряющей поверхности.



Полученное значение температуры кремниевого элемента имеет важное практическое значение. Согласно литературным данным, для кремниевых фотоэлектрических модулей снижение КПД составляет в среднем 0,4–0,5 % на каждый градус повышения температуры сверх стандартных условий эксплуатации. При температуре кремниевого слоя 26 °С уменьшение КПД составило около 0,4 %, вследствие чего фактическая эффективность фотоэлектрического модуля оказалась равной 13,6 % при проектном значении 14 %. Следовательно, относительная потеря эффективности не превышает 2,9 %.

Особенностью разработанной модели является совместный учёт психрометрических параметров влажного воздуха и теплопроводности многослойной конструкции фотоэлектрического модуля. Выполненные расчёты показывают, что именно температура мокрого термометра определяет нижний предел охлаждения влажного текстильного слоя. В рассматриваемом примере разность между температурой воздуха и температурой мокрого термометра составляет 16 °С, что обеспечивает значительный охлаждающий эффект.

Полученные результаты согласуются с общими закономерностями испарительного охлаждения, установленными в ранее опубликованных исследованиях. Однако в отличие от работ, основанных на активной циркуляции воды или её распылении, предложенная система не требует насосов, вентиляторов и дополнительного энергопотребления. Охлаждение осуществляется исключительно за счёт естественного испарения влаги из капиллярно-пористого текстильного слоя.

Следует отметить, что эффективность предложенного способа охлаждения существенно зависит от влажности окружающего воздуха. При увеличении относительной влажности разность влагосодержаний между насыщенным воздухом у поверхности ткани и окружающей средой уменьшается, что приводит к снижению интенсивности испарения. Поэтому наиболее благоприятными условиями для применения разработанной системы являются регионы с высокой солнечной радиацией, температурой воздуха выше 35 °С и относительной влажностью менее 30 %, характерные для летнего периода в Узбекистане и других странах Центральной Азии.

Несмотря на значительное количество исследований, посвящённых охлаждению фотоэлектрических модулей, большинство существующих работ рассматривает либо тепловые процессы в ФЭП, либо процессы испарительного охлаждения отдельно. При этом влияние психрометрических параметров влажного воздуха, многослойной теплопроводности фотоэлектрического модуля и температурной зависимости его энергетической эффективности в рамках единой математической модели изучено недостаточно.

Для выявления отличительных особенностей разработанной модели и оценки её места среди существующих исследований выполнен сравнительный анализ опубликованных работ, результаты которого представлены в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение существующих математических моделей охлаждения фотоэлектрических модулей с предлагаемой моделью

Исследование	Особенности модели	Учитываемые параметры	Ограничения существующих моделей
Skoplaki & Palyvos (2009) [1]	Температурная модель ФЭП	Температура модуля, электрический КПД	Не учитываются процессы испарения и психрометрические параметры воздуха
Faiman (2008) [3]	Инженерная тепловая модель ФЭП	Температура окружающего воздуха, солнечная радиация	Отсутствует модель испарительного охлаждения
Krauter (2004) [8]	Водяное охлаждение	Температура панели,	Не рассматриваются температура мокрого



	фронтальной поверхности	электрическая мощность	термометра и влагосодержание воздуха
Abdolzadeh & Ameri (2009) [9]	Охлаждение распылением воды	Температура панели, эффективность ФЭП	Не учитываются теплопроводность многослойной структуры и капиллярный перенос влаги
Bahaidarah et al. (2013) [10]	Водяное охлаждение тыльной поверхности	Температура панели, расход воды	Отсутствует анализ психрометрических параметров влажного воздуха
Peng et al. (2020) [12]	Испарительное охлаждение текстильных структур	Капиллярность, пористость, испарение влаги	Не рассматриваются фотоэлектрические процессы и КПД ФЭП
Предлагаемая модель (настоящее исследование)	Пассивное испарительное охлаждение ФЭП влажным текстильным слоем	Температура воздуха, относительная влажность, влагосодержание, температура мокрого термометра, скорость воздуха, многослойная теплопроводность, испарительный массообмен, температура кремниевого слоя и КПД ФЭП	Требует дальнейшей экспериментальной верификации для различных климатических условий и типов текстильных материалов

Анализ данных таблицы 1 показывает, что большинство опубликованных исследований рассматривают либо тепловой режим фотоэлектрических модулей, либо процессы испарительного охлаждения отдельно. В отличие от существующих работ, в предлагаемой модели впервые объединены психрометрические параметры влажного воздуха, испарительный массообмен, теплопроводность многослойной структуры фотоэлектрического модуля и температурная зависимость его энергетической эффективности. Это позволяет более полно описать процессы пассивного испарительного охлаждения в условиях жаркого и сухого климата.

Выводы

Разработана одномерная стационарная математическая модель пассивного испарительного охлаждения фотоэлектрического модуля с использованием влажного текстильного слоя. Модель объединяет теплопроводность многослойной структуры ФЭП, процессы испарительного массообмена и психрометрические параметры влажного воздуха.

Расчёты показали, что при климатических условиях города Ташкента ($t=40^\circ\text{C}$), ($\varphi=20\%$) температура мокрого термометра составляет около ($t_m = ^\circ\text{C}$), что определяет предельно достижимую температуру влажного охладителя.

На основе уравнения теплопроводности установлено, что температура кремниевого слоя снижается до ($t_3 = ^\circ\text{C}$), то есть приближается к стандартной рабочей температуре фотоэлектрических элементов. При этом фактическая энергетическая эффективность фотоэлектрического модуля составляет около (13,6%), что близко к проектному значению (14%).



Полученные результаты показывают, что применение пассивного испарительного охлаждения позволяет уменьшить температурные потери фотоэлектрического преобразования и повысить эффективность работы модуля без дополнительных энергетических затрат.

Литература

- [1]. Skoplaki E., Palyvos J.A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations // *Solar Energy*. – 2009. – Vol. 83, No. 5. – P. 614–624. – DOI: 10.1016/j.solener.2008.10.008.
- [2]. Dubey S., Sarvaiya J.N., Seshadri B. Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world – A review // *Energy Procedia*. – 2013. – Vol. 33. – P. 311–321. – DOI: 10.1016/j.egypro.2013.05.072.
- [3]. Faiman D. Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules // *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. – 2008. – Vol. 16, No. 4. – P. 307–315. – DOI: 10.1002/pip.813.
- [4]. King D.L., Boyson W.E., Kratochvil J.A. Photovoltaic Array Performance Model. Report No. SAND2004-3535. – Albuquerque; Livermore: Sandia National Laboratories, 2004. – 41 p.
- [5]. Nižetić S., Čoko D., Yadav A., Grubišić-Čabo F. Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels. Part I. Active cooling techniques // *Energy Conversion and Management*. – 2017. – Vol. 149. – P. 334–354.
- [6]. Nižetić S., Čoko D., Yadav A., Grubišić-Čabo F. Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels. Part II. Passive cooling techniques // *Energy Conversion and Management*. – 2018. – Vol. 155. – P. 301–323.
- [7]. Sun X., Silverman T.J., Zhou Z., Khan M.R., Bermel P., Alam M.A. An optics-based approach to thermal management of photovoltaics: Selective-spectral and radiative cooling // *arXiv*. – 2017. – arXiv:1701.01678.
- [8]. Krauter S. Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2004. – Vol. 82, No. 1–2. – P. 131–137.
- [9]. Abdolzadeh M., Ameri M. Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells // *Renewable Energy*. – 2009. – Vol. 34, No. 1. – P. 91–96. – DOI: 10.1016/j.renene.2008.03.024.
- [10]. Bahaidarah H.M.S., Subhan A., Gandhidasan P., Rehman S. Performance evaluation of a PV module by back surface water cooling for hot climatic conditions // *Renewable Energy*. – 2013. – Vol. 59. – P. 445–453. – DOI: 10.1016/j.renene.2013.03.050.
- [11]. Šuklje T., Arkar C., Medved S. A hydro-thermal study of the bionic leaf – A basic structural element of the bionic façade inspired by vertical greenery // *Energy Procedia*. – 2015. – Vol. 78. – P. 1195–1200. – DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.108.
- [12]. Peng Y., Li W., Liu B., et al. Integrated cooling (i-Cool) textile of heat conduction and sweat transportation for personal perspiration management // *arXiv*. – 2020. – arXiv:2009.05918.
- [13]. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. 7th ed. WMO-No. 8. – Geneva: World Meteorological Organization, 2008.
- [14]. ASHRAE Handbook – Fundamentals: Psychrometrics. – Atlanta: ASHRAE, 2021.
- [15]. Stull R. Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. – 2011. – Vol. 50, No. 11. – P. 2267–2269. – DOI: 10.1175/JAMC-D-11-0143.1.
- [16]. Davies-Jones R. An efficient and accurate method for computing the wet-bulb temperature along pseudoadiabats // *Monthly Weather Review*. – 2008. – Vol. 136, No. 7. – P. 2764–2785. – DOI: 10.1175/2007MWR2224.1.
- [17]. Corpart M., Restagno F., Boulogne F. Measuring relative humidity from evaporation with a wet-bulb thermometer: The psychrometer // *arXiv*. – 2023. – arXiv:2309.06001.



- [18]. Lewis W.K. The evaporation of a liquid into a gas // Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. – 1922. – Vol. 44. – P. 325–340.
- [19]. Chilton T.H., Colburn A.P. Mass transfer (absorption) coefficients: Prediction from data on heat transfer and fluid friction // Industrial & Engineering Chemistry. – 1934. – Vol. 26, No. 11. – P. 1183–1187. – DOI: 10.1021/ie50299a012.
- [20]. Lawrence M.G. The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2005. – Vol. 86, No. 2. – P. 225–233. – DOI: 10.1175/BAMS-86-2-225.
- [21]. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
- [22]. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – 4-е изд. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
- [23]. Ojo S.O., Grivet-Talocia S., Paggi M. Model order reduction applied to heat conduction in photovoltaic modules // arXiv. – 2015. – arXiv:1505.05361.
- [24]. Poudel S., Zou A., Maroo S.C. Thermal management of photovoltaics using porous nanochannels // arXiv. – 2021. – arXiv:2105.04745.
- [25]. Kumar M., Bhardwaj R. A combined computational and experimental investigation on evaporation of a sessile water droplet on a heated hydrophilic substrate // arXiv. – 2019. – arXiv:1907.05486.
- [26]. Zhao H., Poole R., Zhou Z. Rate-limiting factors in thin-film evaporative heat transfer processes // arXiv. – 2024. – arXiv:2401.14843.
- [27]. Babb P.I., Ahmadi S.F., Brent F., et al. Salt-rejecting continuous passive solar thermal desalination via convective flow and thin-film condensation // arXiv. – 2023. – arXiv:2305.09853.