



Magistral suv kanallari bilan integrallashgan turli xil fotoelektrik modullar parametrlari tadqiqi

Isroil A. Yuldoshev¹, Islom R. Jurayev^{1, a}, Obid Sh. Jurayev^{1, b},
Bozorbek M. Botirov^{1, d}

¹⁾ DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; yuldashev.i2004@gmail.com <http://orcid.org/0000-0003-1335-0862>

^{1a)} PhD, Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; nauka-jir@mail.ru <https://orcid.org/0009-0003-6321-695X>

^{1b)} Tayanch doktorant, Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; qirozbekaka@gmail.com <https://orcid.org/0009-0001-3910-4523>

^{1d)} PhD, Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston bbozorbek@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2515-6274>

Dolzarbliigi: fotoelektrik modullarning quyosh energiyasini elektr energiyaga o'zgartirilishida ularning samaradorligi issiq iqlim sharoitlarida ishchi yuzasi haroratiga sezilarli bog'liq bo'lib, 80–95°C gacha qizishi foydali ish koeffitsiyentini 30–35% gacha pasaytiradi. Ilmiy ishlanmalarda fotoelektrik modullarni suv, antifriz, propilenglikol yoki havo orqali sovitish, termosifonli yoki mikro-chuqur kanalli issiqlik almashtirgichlar asosida haroratni barqarorlashtirish usullari ishlab chiqilgan bo'lib, bunday yechimlar ularning tannaxini oshiradi. Quruqlikda o'rnatiladigan fotoelektrik stansiyalar loyihalarida ham yer maydonini ijaraga olish katta mablag' talab etadi. Issiq iqlim mintaqalarida quruqlik yer maydoniga nisbatan arzon bo'lgan mavjud suv yuzalari va suv oqimining bug'lanishli sovitish jarayonidan samarali foydalanish dolzarb ahamiyatga ega

Maqsad: Oqsuv-Yakkabog' magistral suv kanali ustida va quruqlikda ustidan joylashgan har xil turdagi fotoelektrik modullarning elektrofizik va issiqlik parametrlari qiymatlarini aniqlash va tadqiq etish.

Usullar: turli xil turdagi fotoelektrik modullarning elektrofizik parametrlarini aniqlash uchun quyidagi usullar qo'llanilgan: fotoelektrik modullarning ishchi parametrlari va tok-kychlanish (volt-amper), kuchlanish-quvvat (volt-vatt) xarakteristikalarini aniqlash usullari, fotoelektrik modullari optik yuzalari issiq nuqtalari infraqizil tasvirlar, termografik tahlil usuli, ko'p sonli ekperimentlarni qayta ishlash usullari.

Natijalar: Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, fotoelektrik modullarni suv yuzasi ustida joylashtirish ularning ishchi haroratini tabiiy sovitish hisobiga pasaytiradi, bu esa haroratga bog'liq quvvat yo'qotishlarini kamaytiradi va ish samaradorligini oshiradi. Aniqlanishicha, kanal ustida o'rnatilgan monokristalli va polikristalli modullarning chiqish quvvati quruq yerda joylashtirilgan shunga o'xshash modullarga nisbatan o'rtacha 5–6% ga yuqori bo'ladi. Shu bilan birga, ikki tomonlama (bifacial) modullar yerda suv yuzasiga nisbatan gruntning yuqori albedosi tufayli ko'proq energiya hosil qiladi. Olingan natijalar fotoelektr tizimlarni suv kanallari bilan integratsiya qilishning istiqbolli yo'nalish ekanligini tasdiqlaydi va shunday turdagi qurilmalarni loyihalash hamda mintaqaning energetika tizimiga keng joriy etishda qo'llanilishi mumkin.

Kalit so'zlar: Suv oqimi, qayta tiklanuvchi energiya manbalari, fotoelektrik modullar, quyosh elementlari, quvvat yo'qotishlari, harorat koeffitsiyenti, magistral suv kanali, shamol tezligi, suv tezligi, harorat, tok, quvvat, kuchlanish.

Исследование параметров различных типов фотоэлектрических модулей, интегрированной с магистральными водоканалами

Исроил А. Юлдошев¹, Ислон Р. Жураев^{1, a}, Обид Ш. Жураев^{1, b},
Бозорбек М. Ботиров^{1, d}

¹⁾ DSc, профессор, Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; yuldashev.i2004@gmail.com [orcid: http://orcid.org/0000-0003-1335-0862](http://orcid.org/0000-0003-1335-0862)

^{1a)} PhD, Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; nauka-jir@mail.ru [orcid: https://orcid.org/0009-0003-6321-695X](https://orcid.org/0009-0003-6321-695X)

^{1b)} Базовой докторантуры, Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; qirozbekaka@gmail.com [orcid: https://orcid.org/0009-0001-3910-4523](https://orcid.org/0009-0001-3910-4523)

^{1d)} PhD, Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; bbozorbek@bk.ru [orcid: http://orcid.org/0000-0003-2515-6274](http://orcid.org/0000-0003-2515-6274)

Актуальность: эффективность фотоэлектрических модулей при преобразовании солнечной энергии в электрическую в условиях жаркого климата существенно зависит от рабочей температуры их поверхности: нагрев до 80–95 °C снижает коэффициент полезного действия на 30–35%. В научных разработках предложены методы стабилизации температуры фотоэлектрических модулей путём их охлаждения водой, антифризом, пропиленгликолем или воздухом, а также с использованием термосифонных и микроканальных теплообменников. Однако подобные технические решения повышают себестоимость установок. Кроме того, при проектировании наземных фотоэлектрических станций значительные расходы связаны с арендой земельных участков. Поэтому в условиях жаркого климата актуальным является эффективное использование существующих водных поверхностей, которые дешевле земельных площадей, и использование процессов испарительного охлаждения водных потоков.

For citation: I.A. Yuldoshev, I.R. Jurayev, O.Sh. Jurayev, B.M. Botirov. Investigation of the Parameters of Various Types of Photovoltaic Modules Integrated with Main Water Canals. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2025, no. 4, pp. 168-178.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18526117>

Received: 05.04.2025
Revised: 19.04.2025
Accepted: 10.07.2025
Published: 27.12.2025

Copyright: © Isroil A. Yuldoshev, Islom R. Jurayev, Obid Sh. Jurayev, Bozorbek M. Botirov, 2025. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Цель: определение и исследование электрофизических и тепловых параметров различных типов фотоэлектрических модулей, установленных над поверхностью воды (на примере магистрального водного канала Оксув–Яккабаг) и на суше.

Методы: для определения электрофизических параметров различных типов фотоэлектрических модулей применялись следующие методы: измерение рабочих параметров и вольт-амперных (ток–напряжение) и вольт-ваттных (мощность–напряжение) характеристик; инфракрасная термография и термографический анализ горячих точек оптических поверхностей модулей; методы статистической обработки и анализа многочисленных экспериментальных данных.

Результаты: исследования показали, что размещение фотоэлектрических модулей над водной поверхностью способствует снижению их рабочей температуры за счёт естественного охлаждения, что уменьшает температурные потери мощности и повышает эффективность работы. Установлено, что выходная мощность монокристаллических и поликристаллических модулей, установленных над каналом, в среднем на 5–6 % выше по сравнению с аналогичными модулями, размещёнными на суше. В то же время двухсторонние (бифасиальные) модули демонстрируют более высокую генерацию на суше вследствие большего альбедо грунта по сравнению с водной поверхностью. Полученные результаты подтверждают перспективность интеграции фотоэлектрических систем с водоканалами и могут быть использованы при проектировании и широком внедрении подобных установок в энергетическую систему региона.

Ключевые слова: водный поток, возобновляемые источники энергии, фотоэлектрические модули, солнечные элементы, потери мощности, температурный коэффициент, магистральный водный канал, скорость ветра, скорость воды, температура, ток, мощность, напряжение.

Investigation of the Parameters of Various Types of Photovoltaic Modules Integrated with Main Water Canals

Isroil A. Yuldoshev¹, Islom R. Jurayev^{1,a}, Obid Sh. Jurayev^{1,b}, Bozorbek M. Botirov^{1,d}

¹⁾ DSc, prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; yuldashev.i2004@gmail.com <http://orcid.org/0000-0003-1335-0862>

^{1, a)} PhD., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; nauka-jir@mail.ru orcid: <https://orcid.org/0009-0003-6321-695X>

^{1, b)} Doctoral student, Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; qirolbekaka@gmail.com <https://orcid.org/0009-0001-3910-4523>

^{1, d)} PhD, Tashkent State Technical University, Tashkent; bbozorbek@bk.ru. <http://orcid.org/0000-0003-2515-6274>

Relevance: the efficiency of photovoltaic (PV) modules in converting solar energy into electrical energy in hot climate conditions strongly depends on their surface operating temperature: heating up to 80–95 °C reduces the efficiency by 30–35%. Scientific research has proposed several temperature stabilization methods for PV modules, such as cooling by water, antifreeze, propylene glycol, or air, as well as through thermosiphon or micro-channel heat exchangers. However, such solutions increase the overall cost of the systems. Furthermore, the installation of ground-mounted photovoltaic power plants requires substantial investment for land leasing. Therefore, in hot climate regions, the effective use of existing water surfaces—cheaper than land areas—and the utilization of natural evaporative cooling from water flows are of significant practical and scientific importance.

Aim: to determine and analyze the electrophysical and thermal parameters of various types of photovoltaic modules installed above the Oqsuv–Yakkabog main water canal and on land.

Methods: to identify the electrophysical parameters of different types of photovoltaic modules, the following methods were applied: measurement of operating parameters and current–voltage (I–V) and voltage–power (V–P) characteristics; infrared imaging and thermographic analysis of hot spots on the optical surfaces of modules; and statistical processing of multiple experimental datasets.

Results: the study revealed that installing photovoltaic modules above the water surface reduces their operating temperature due to natural cooling, which decreases temperature-related power losses and enhances performance efficiency. It was found that the output power of monocrystalline and polycrystalline modules placed above the canal exceeds that of similar ground-mounted modules by an average of 5–6%. At the same time, bifacial modules demonstrate higher energy generation on land due to the greater ground albedo compared to water surfaces. The obtained results confirm the high potential of integrating photovoltaic systems with water canals and can be applied in the design and large-scale implementation of such systems within the regional power grid.

Keywords: water flow, renewable energy sources, photovoltaic modules, solar cells, power losses, temperature coefficient, main water canal, wind speed, water velocity, temperature, current, power, voltage.

1. Введение (Introduction)

В настоящее время солнечные фотоэлектрические системы, установленные над каналами, функционируют в условиях, отличающихся от условий наземных систем, что может влиять на их эксплуатационную эффективность и скорость деградации (снижения пригодности).

Технология плавучих фотоэлектрических станций (ПФЭС) была впервые внедрена в период с 2008 по 2014 год в Европе, Японии, Южной Корее и США в научно-исследовательских целях. На начальном этапе приоритетной задачей было изучение потенциала этой технологии для



крупномасштабной выработки электроэнергии. После 2014 года внедрение плавучих фотоэлектрических станций (FPV) - систем на глобальном уровне стало стремительно нарастать. Согласно отчету Всемирного банка, этот рост приобрёл почти экспоненциальный характер. Основной причиной данного роста является широкомасштабное применение технологии в Южной Азии, Европе и США. К концу 2018 года суммарная установленная мощность плавучих фотоэлектрических станций и систем в мире достигла 1097 МВт [1].

В настоящее время лидирующее положение по внедрению данной технологии занимает азиатский регион. В частности, Япония, обладая установленной мощностью 130,59 МВт, считается страной с крупнейшими в мире ПФЭС. Другими важными участниками в этом регионе являются Китай, Южная Корея, Тайвань и Индия.

В последнее время такие страны, как Сингапур, Малайзия, Индонезия, Вьетнам и Бангладеш, также разрабатывают планы по строительству плавучих фотоэлектрических станций. В Европе ведущими странами по внедрению технологии ПФЭС являются Великобритания, Франция, Италия, Нидерланды, Бельгия и Португалия.

В настоящее время крупнейшая в мире плавучая солнечная электростанция расположена в Китае: она построена на водоеме площадью 86 гектаров и обладает установленной мощностью 40 МВт [2]. Эта станция была введена в эксплуатацию в 2017 году. В октябре 2019 года во Франции была введена в эксплуатацию ПФЭС -станция мощностью 17 МВт, построенная на водоеме площадью 17 гектаров, обеспечивающая электроэнергией 4733 домохозяйства [3]. Это крупнейшая плавучая солнечная электростанция в Европе. В то же время в США, в городе Сейрвилл (штат Нью-Джерси), была введена в эксплуатацию ПФЭС -станция мощностью 4,4 МВт - крупнейший проект такого рода в Северной Америке [4].

Ветровая [5], солнечная [6], волновая [7] и другие возобновляемые источники энергии являются экологически чистыми и экономически эффективными альтернативами традиционным энергоресурсам. В настоящее время они играют важную роль в удовлетворении растущего мирового спроса на энергию. Согласно аналитическим прогнозам, к 2040 году доля таких источников достигнет ведущего уровня [8]. В последние годы технологии фотоэлектрических станций и систем стремительно развиваются и обеспечивают значительную часть электроэнергии, производимой из возобновляемых источников. К концу 2019 года общая установленная мощность солнечных фотоэлектрических станций в мире достигла 518,2 ГВт, а в Европе — 138 ГВт-пик [9]. Согласно ежегодному анализу Европейской ассоциации солнечной энергетики Solar Power Europe, в ближайшие годы после 2020 года этот показатель может достичь одного тераватта-пик (TWp) [10].

В последние годы реализованы несколько крупных проектов ПФЭС, которые оказали существенное влияние на текущую рыночную ситуацию. Большинство этих проектов было реализовано в Китае. По данным [11], опубликованным SERIS, приведено распределение установленной мощности ПФЭС по странам и максимальной пиковой мощности. Согласно этим данным, Китай занимает лидирующую позицию с долей 73% (950 МВт-пик), далее следуют Япония - 16% (180 МВт-пик), Южная Корея - 6%, Тайвань - 2%, Великобритания - 1% и другие страны - всего 2%.

Ряд учёных провели исследования по повышению эффективности работы фотоэлектрических модулей, интегрированных с магистральными водоканалами и водоёмами, за счёт естественного охлаждения. Рост объёма выработки энергии объясняется в основном охлаждающим эффектом, возникающим при испарении воды, а также благоприятным микроклиматом вокруг модулей.

В исследовании, проведённом G.M. Tina и соавторами [12], зафиксировано увеличение годового объёма выработки энергии в диапазоне от 3,3% до 7,3% в зависимости от расположения, геометрической конфигурации установки и технологии модулей (monofacial или bifacial).

В исследовании Y.K. Choi и соавторов [13] сравнивалась энергетическая эффективность систем, установленных на поверхности воды и на суше. Результаты показали, что панели, установленные над водой, обеспечивают на 10% большее производство энергии по сравнению с панелями, расположенными на земле.

L. Liu и соавторы [14] с помощью весьма сложного метода конечных элементов (finite element method) рассчитали температуру фотоэлектрических модулей. В расчетах было принято, что температура воздуха вблизи водной поверхности на 5 °C ниже, чем над сушей. Результаты показали температурную разницу в 3,5 °C между модулями, размещёнными на воде и установленными на суше, что, в свою очередь, обеспечило увеличение эффективности модулей примерно на 1,58–2%.

В работе [15] были проведены эксперименты 15.09. 2024 г. в дневное время суток более 2 часов при ясной погоде в магистральном водяном канале (МВК) Оксуб Яккабаг в Кашкадарьинской области Республики Узбекистан. Предварительно изготовлены опорные конструкции, обеспечивающие ориентацию углов ФЭБ к горизонту и их высоту над поверхностью водного потока в канале. Проведены измерения значений температуры окружающей среды, температуры воздуха на разных высотах от поверхности воды МВК, плотность потока солнечного излучения,

скорость ветра на поверхности земли и МВК, относительную влажность и т.д.

Результаты показывают, что усреднённые значения температуры воздушного потока на высоте (20 см, 40 см и 60 см) от поверхности воды соответственно ниже (1,54 раз, 1,4 раз, 1,28 раз), чем усреднённые значения температуры окружающей среды на земной поверхности. А усреднённые значения скорости ветра на высоте 60 см от поверхности воды МВК превышает значения на земной поверхности в 2,3 раза [16].

Одним из основных факторов потерь мощности в фотоэлектрических (PV) модулях является перегрев, вызванный избыточной солнечной радиацией и высокой температурой окружающей среды. При повышении температуры монокристаллических (с-Si) и поликристаллических (p-Si) солнечных элементов на каждый градус эффективность снижается примерно на 0,45% и 0,25% соответственно [17].

Для снижения температуры солнечных панелей применяются различные разработки [18,19], одним из которых является фотоэлектрическая тепловая система (PV-T), использующая воду в качестве охлаждающего агента [20].

На сегодняшний день еще не опубликованы в широком масштабе данные, касающиеся анализа длительной эксплуатации фотоэлектрических станций, размещенных над каналами и их сравнительного анализа с традиционными наземными системами. Основной целью данного исследования является оценка возможностей масштабного внедрения и надежной эксплуатации фотоэлектрических станций и систем, размещенных над каналами.

Цель настоящей работы является выявление и сравнение значений электрофизических и тепловых параметров различных типов ФЭМ, расположенных над МВК Оксув Яккабаг и над сушей.

2. Материалы и методы (Methods and materials)

Для определения электрофизических параметров различных типов ФЭМ применяются следующие методы:

- измеряются и рассчитываются рабочие параметры: ток короткого замыкания (I_{sc}), напряжение холостого хода (V_{oc}), ток ($I_{P_{max}}$) и напряжение ($U_{P_{max}}$), и максимальная выходная мощность (P_{max}), коэффициента заполнения (FF) и КПД, а также их вольтамперные, вольт-ваттные характеристики различного типа ФЭМ. Были использованы современные измерительные приборы Eurotest PV MI3108 которые имеют сертификаты;
- для тепловизионной съемки используются инфракрасные камеры для выявления горячих точек и температуры поверхностей ФЭМ;
- многочисленные экспериментальные исследования, которые позволяют получению более адекватного значения электрофизических параметров различных типов ФЭМ.



А. Над МВК Оксув Яккабаг



Б. Над сушей рядом с МВК Оксув Яккабаг

Рис.1. ФЭМ различного типа, расположенные над МВК Оксув Яккабаг и над сушей в районе Шахрисабзе.

Fig. 1. Photovoltaic modules of various types located above the Oqsuv Yakkabog main water canal and on land in the Shakhrisabz area.

Объектом исследования являются различные типы ФЭМ (поликристаллический кремниевый ФЭМ (p-Si), односторонние ФЭМ монокристаллического кремния (m-Si), двухстороннего ФЭМ (bifacial)) находящихся над МВК Оксув Яккабаг в Кашкардарьинской области и над сушей рядом с МВК (рис.1 А и Б).

Электрофизические и температурные характеристики изучаемых типов ФЭМ заданы в таблице 1, полученные производителями в STC условиях.

Таблица 1. Паспортные данные разных типов ФЭМ

**Table 1.** Passport data of different types of FEM

Характеристики ФЭМ	Типы ФЭМ		
	mc-Si p- тип (half-cell)	pc-Si	Bifacial, монокристаллический, (half-cell)
Размеры ФЭМ, мм	2278×1134	1487×666	2278×1134
Площадь ФЭМ, S _м , м ²	2,58	0,99	2,58
<i>Электрические характеристики</i>			
Максимальная мощность, P _{max} , Вт	550	170	535
Напряжение холостого хода, U _{xx} , В	49,63±3%	23,35 V	49,35
Ток короткого замыкания, I _{кз} , А	14,05±4%	9.45 A	13,78
Напряжение при номинальной мощности, U _{mp} , В	40,9	19,57 V	41,5
Ток при номинальной мощности, I _{mp} , А	13,45	8,68 A	12,9
Эффективность ФЭМ, %	21,33	17	20,6
<i>Температурные коэффициенты:</i>			
по I _{кз} , α, %/°C	+0.048 % / °C	+0.05 % / °C	+0.048 % / °C
по U _{xx} , β, %/°C	-0.28 % / °C	-0.32 % / °C	-0.28 % / °C
по P _{max} , γ, %/°C	-0.35 % / °C	-0.41 % / °C	-0.36 % / °C

Как правило, производители в паспорте ФЭМ дают характеристики модулей, полученные тестированием в лабораторных условиях, согласно соответствующим стандартам тестирования. Регламент тестирования ФЭМ в различных климатических и географических условиях был опубликован Международной Электротехнической Комиссией (International Electrotechnical Commission) в стандарте IEC 61853 “Photovoltaic Module. Power Rating”, предусмотрены тесты НТС, ЛИС, НОСТ и STC [21].

В основном, производители в паспорте ФЭМ указывают значения, полученные стандартом тестирования STC и НОСТ, остальные тесты наблюдаются редко, поэтому в таблице 1 приведены паспортные данные разных типов ФЭМ, полученные в STC условиях. Лабораторные тестовые условия STC осуществляются в следующих условиях: Плотность потока солнечного излучения - 1000 Вт/м², температура модуля – 25 °С, оптическая атмосферная масса AM-1,5, спектр света – ASTM G173-03, а остальные скорость ветра, температура окружающей среды, высота над уровнем земли не учитываются.

Стандартные условия испытаний (STC) проводится при температуре ФЭМ 25°С. Для кремния, при повышении температуры на 25°С, ток короткого замыкания увеличивается примерно на 0,06% на каждый градус Цельсия, напряжение холостого хода примерно на 0,3% на каждый градус Цельсия. Это выражается следующими уравнениями [22].

$$\frac{dI_{SC}}{dT} = I_{SC}^{STC} \times 0,0006 \left[\frac{A}{^{\circ}C} \right] \quad (1)$$

$$\frac{dU_{OC}}{dT} = U_{OC}^{STC} \times -0,03 \left[\frac{V}{^{\circ}C} \right] \quad (2)$$

В данном исследовании были изучены параметры и характеристики ФЭМ (поликристаллический кремниевый ФЭМ (p-Si), односторонние ФЭМ монокристаллического кремния (mc-Si p-тип, (half-cell)), двухстороннего ФЭМ (Bifacial, монокристаллический, (half-cell))) установленных над МВК Оксус Яккабаг и ещё над сушией рядом с МВК.

1. Результаты и обсуждения (Results)

Многочисленные эксперименты проводились на МВК Оксус Яккабаг и над сушией в мае, июне и августе 2025 г., в районе Шахрисабза в течение дневного времени суток. Авторами представляются экспериментальные результаты полученные 25.06.2025г. Все ФЭМ расположенные над МВК и над сушией были ориентированы на юг, опорная конструкция фиксированная, угол наклона к горизонту составлял 37 градусов. Высота нижней и верхние части ФЭМ от поверхности водяного потока в МВК соответственно составили 20 см и 80 см.

Измерялись следующие метеопараметры: температура окружающей среды, скорость ветра, относительная влажность, плотность потока солнечного излучения над сушией и над поверхностью МВК. Показания метеопараметров записывались в портативный компьютер через USB порт от измерительных приборов. Обработка, вывод данных и хранение осуществлялись с помощью программных обеспечений в Microsoft Excel и Origin 9.0.



Скорость воды на МВК Оксув Яккабаг измерялись с помощью измерителя скорости водяного потока ИСП-1М (гидрометрическая вертушка) и при этом значения скорости водяного потока составляли $1.6 \div 1.8$ м/с, а также температура воды составляла $15.9 \div 19.1$ °С.

На рис. 2 приведены зависимости скорости ветра от дневного времени суток над МВК Оксув Яккабаг и над сушей.

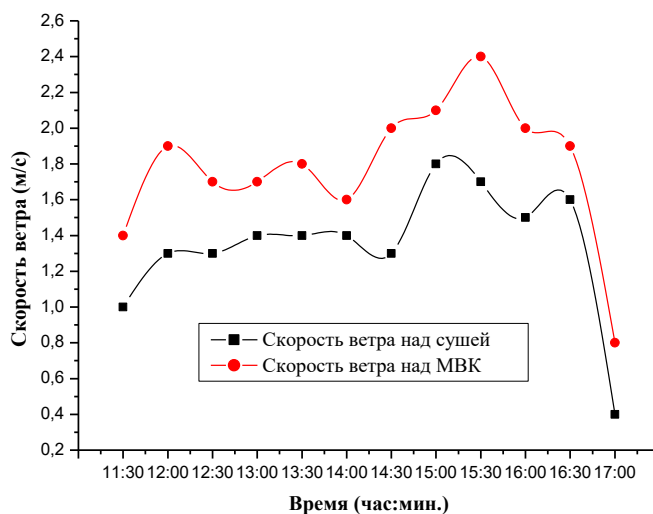


Рис.2. Зависимости скорости ветра от дневного времени суток

Fig. 2. Dependence of wind speed on the time of day.

Проанализировав рис.2 можно сказать, что усредненные значения скорости ветра над МВК Оксув Яккабаг 1,2 раз больше, чем значения скорости ветра над сушей. Значения скорости воздушного потока измерялись цифровым термоанемометром UNI-T UT362. Она измеряет не только скорости и ещё температуры воздушного потока.

Оценить температуры ФЭМ при различных уровнях плотности потока солнечного излучения и температуры окружающей среды можно с помощью уравнения (3). На рис. 3 приведены графики, которые показывают температурные данные по расчету и полученные в эксперименте.

$$T_{\text{ФЭМ}} = T_{\text{о.с}} + \frac{\text{НОСТ}-20}{800} \times G \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3)$$

где,

$T_{\text{ФЭМ}}$ — температура ФЭМ, °С,

$T_{\text{о.с}}$ — температура окружающей среды, °С,

НОСТ — оперативная рабочая температура ФЭМ, °С,

G — солнечная радиация, W/m^2 .

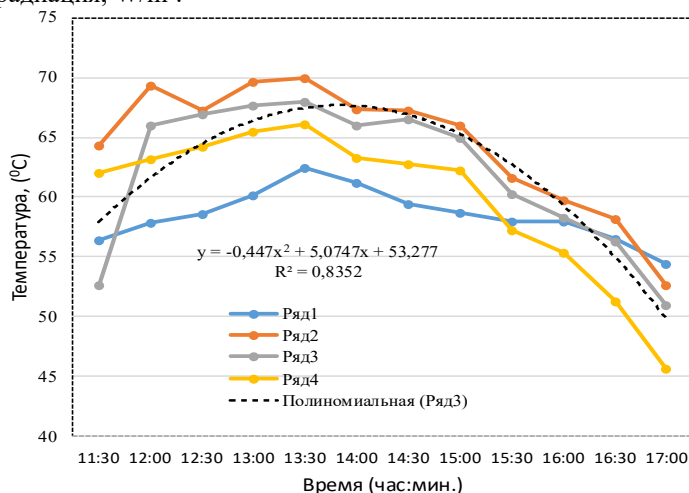


Рис.3. Динамика изменения температуры различных типов ФЭМ от дневного времени суток

Fig. 3. Dynamics of temperature changes of various types of photovoltaic modules throughout the day.

Ряд 1 - расчет, Ряд 2 – Bifacial ФЭМ, Ряд 3 – monofacial ФЭМ, Ряд 4 - поликристаллический ФЭМ, ----- – полиномиальная функция 2 степени

Выбрана полиномиальная функция 2 степени по изменению температуры ФЭМ в течение дня. Анализируя, что в функции $R^2 \sim 0.84$ и приближение коэффициента аппроксимации к 1 означает, что они связаны с высокой точностью.

На рис. 3 приведена динамика изменения температура окружающей среды над МВК и над сушей, а также температура рабочих поверхностей различных типов ФЭМ в течение дня. Измерения значения температуры окружающей среды над МВК и над сушей, а также температура рабочих поверхностей различных типов ФЭМ осуществлялись с использованием цифрового термометра с выносным датчиком DS18B20, разработанного в США. Диапазон измеряемой температуры – от -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$.

Промежуточные значения температуры окружающей среды над МВК вдоль поверхности ФЭМ составляли $18 \div 26^{\circ}\text{C}$ и значения температуры воздуха над сушей колебались $22 \div 38^{\circ}\text{C}$.

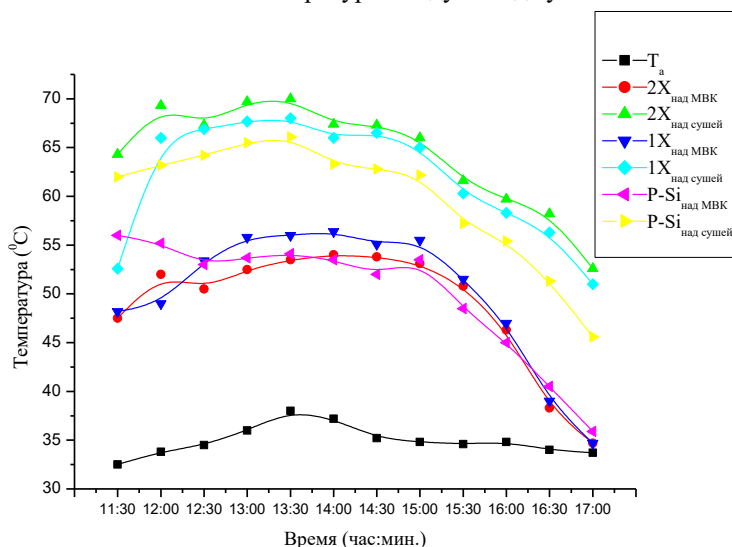


Рис.4. Динамика изменения температуры окружающей среды, различных типов ФЭМ в течение дня (25.06.2025)

Fig. 4. Dynamics of ambient temperature and temperatures of various types of photovoltaic modules during the day (25.06.2025).

Из рис. 4 можно видеть, что зависимости температуры рабочих поверхностей различных типов ФЭМ в течение дня изменяются. В основном среднеарифметические значения температуры у ФЭМ (поликристаллический кремниевый ФЭМ (p-Si), односторонние ФЭМ монокристаллического кремния (mc-Si p-тип, half-cell), двухстороннего ФЭМ (Bifacial, монокристаллический, (half-cell), которые находится над сушей соответственно больше (на 1,2 раз, на 1,24 раз, на 1,32 раз), чем у ФЭМ расположенных над МВК. На рис. 5 приведена динамика изменения выходного тока различных типов ФЭМ в течение дня.

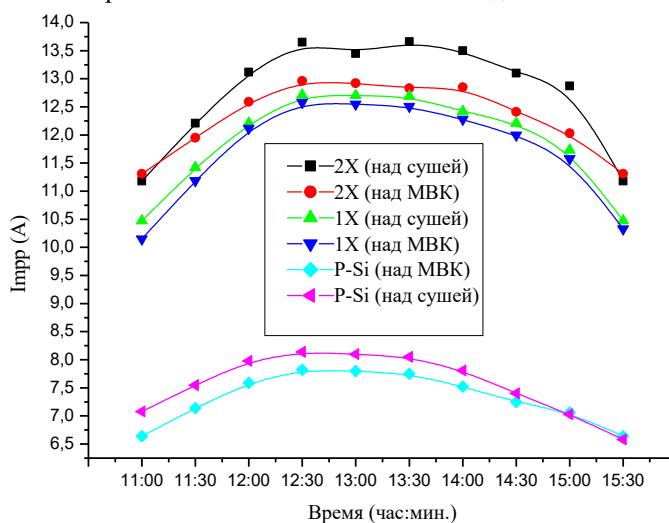


Рис.5. Динамика изменения выходного тока различных типов ФЭМ в течение дня (25.08.2025)

Fig. 5. Dynamics of output current changes of various types of photovoltaic modules during the day (25.08.2025).

Исследование зависимости выходного тока различных типов ФЭМ от температуры показало, что средние значения тока при максимальной мощности двухстороннего ФЭМ над сушей больше на 3,7% чем ток двухстороннего ФЭМ которые находится над МВК. Это объясняется

тем, что при нагреве рабочей поверхности ФЭМ по уравнению (1), генерируемый ток увеличивается, и ещё за счет альbedo поверхности, причем альbedo грунта (сухая почва, $\rho \sim 0,32$) в среднем в 6,4 раз больше, чем альbedo воды ($\rho \sim 0,05$). Исходя из данных рис. 5 можно сделать вывод о том, что для одностороннего и поликристаллического ФЭМ над сушей генерируемый ток соответственно больше на 1,6% и на 3,4% больше, чем ФЭМ, которые находятся над МВК.

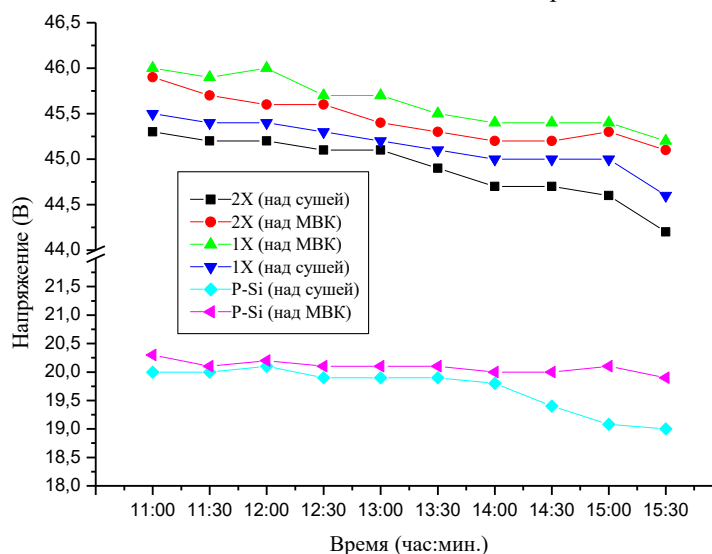


Рис.6. Динамика изменения напряжения различных типов ФЭМ в течение дня (25.06.2025)
Fig. 6. Dynamics of voltage changes of various types of photovoltaic modules during the day (25.06.2025).

На рис. 6 и 7 приведены динамика изменения напряжения и мощности различных типов ФЭМ в течение дня, которые были получены 25.06.2025 г.

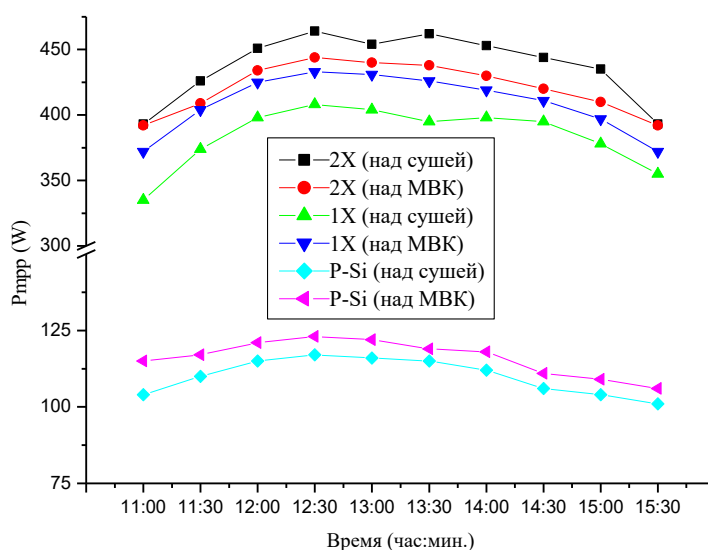


Рис.7. Зависимости максимальной мощности различных типов ФЭМ от дневного времени суток
Fig. 7. Dependence of the maximum power of various types of photovoltaic modules on the time of day.

Как следует из указанного выше графиков рис. 6, напряжения при максимальной мощности различных типов ФЭМ от температуры показало, что водяной поток за счет охлаждения естественным путем различных типов ФЭМ, которые находятся над МВК напряжение ФЭМ больше на $0,1 \div 1$ В, чем напряжения ФЭМ, которые расположены над сушей.

Из рис.7 можно сделать вывод о том, что максимальная мощность двухстороннего ФЭМ над сушей больше на 3,8% чем мощность аналогичного ФЭМ, который расположен над МВК. Как упомянули выше, отражающая способность воды меньше (в основном), чем других поверхностей, поэтому не рекомендуется проектировать и эксплуатировать ФЭС из двухстороннего ФЭМ над МВК. Из экспериментальных данных по мощности одностороннего и



поликристаллического ФЭМ представленных на рис. 7 следует, что за счет естественного охлаждения модулей которые находится над МВК, больше соответственно на 6,2% и на 5,3 %, чем мощностей ФЭМ измерялись на суше.

4. Заключение (Conclusions)

Проведённые исследования параметров различных типов фотоэлектрических модулей (mc-Si, pc-Si и bifacial), установленных над магистральным водоканалом Оксв Яккабаг и на суше, показали, что условия размещения оказывают существенное влияние на их электрофизические и тепловые характеристики. Установлено, что за счёт естественного охлаждения воздушными потоками и водной поверхности температура модулей, расположенных над каналом, значительно ниже по сравнению с аналогичными модулями на суше. Это приводит к уменьшению температурных потерь мощности и повышению их эффективности в эксплуатации.

В частности, для монокристаллических и поликристаллических ФЭМ, размещённых над МВК, зафиксирован прирост выходной мощности в среднем на 5–6 % по сравнению с наземными установками. При этом двухсторонние модули, установленные на суше, демонстрируют более высокие показатели генерации за счёт большего альбеда почвы по сравнению с водной поверхностью.

Следует отметить, что эксплуатация ФЭМ над водными каналами требует дополнительного анализа, связанного с воздействием водных капель, возможной коррозией конструкций и особенностями технического обслуживания. Эти факторы должны быть учтены при долгосрочном планировании и внедрении подобных проектов.

В целом проведённое исследование подтверждает перспективность размещения фотоэлектрических станций над водными каналами как одного из экологически безопасных и ресурсосберегающих направлений повышения энергетической эффективности. Такой подход позволяет одновременно экономить земельные ресурсы, сокращать испарение воды и получать дополнительную электроэнергию. Для дальнейшего развития данного направления необходимы комплексные исследования, охватывающие экономическую целесообразность, техническую надёжность и показатели долговременной эксплуатации.

Работа выполнена в рамках проекта Ф-ОТ-2021-497 «Разработка научных основ создания солнечных когенерационных установок на основе фотоэлектрических тепловых батарей».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Energy Agency. The Future of Hydrogen, Seizing Today's Opportunities // *International Energy Agency*: Paris, France. – 2019.
2. World Bank Group, ESMAP, and SERIS (2018) *Where sun meets water: floating solar market report—executive summary*. Washington, DC: World Bank. Available at: <http://documents.worldbank.org/curated/en/579941540407455831/pdf/Floating-Solar-Market-Report-Executive-Summary.pdf>
3. PV Magazine (2017) 40 MW floating PV plant in China connected with sungrow's inverters (Online). Available at: <https://www.pv-magazine.com/2017/05/19/floating-pv-plant-in-china-connected-with-sungrows-inverters/>
4. PV-Tech (2018) Akuo energy starts construction on 17 MW floating solar plant in France [Online]. Available at: <https://www.pv-tech.org/news/akuo-energy-starts-construction-on-17MW-floating-solar-plant-in-france>
5. PV Magazine (2019) America's largest floating solar project completed (Online). Available at: <https://pv-magazine-usa.com/2019/10/23/americas-largest-floating-solar-project-completed/>
6. G. Ciulla, A. D'Amico, V. Di Dio, V. Lo Brano, Modelling and analysis of real-world wind turbine power curves: assessing deviations from nominal curve by neural networks, *Renew. Energy* (2019), <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.075>.
7. C. Marino, A. Nucara, M.F. Panzera, M. Pietrafesa, V. Varano, Energetic and economic analysis of a stand-alone photovoltaic system with hydrogen storage, *Renew. Energy* (2019), <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.079>.
8. L. Rusu, The wave and wind power potential in the western Black Sea, *Renew. Energy* (2019), <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.017>.
9. BP, *BP Energy Outlook 2019 Edition*, 2019.
10. International Renewable Energy Agency, *Renewable Capacity Statistics*, 2020.
11. Solar Power Europe, *Global Market Outlook for Solar Power/2019 - 2023*, 2020.
12. S. Gorjian, H. Sharon, H. Ebadi, K. Kant, F.B. Scavo, G.M. Tina, Recent technical



- advancements, economics and environmental impacts of floating photovoltaic solar energy conversion systems, *J. Clean. Prod.* (2020) 124285, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124285>.
13. G.M. Tina, F. Bontempo Scavo, L. Merlo, F. Bizzarri, Comparative analysis of monofacial and bifacial photovoltaic modules for floating power plants, *Appl. Energy* (2021), <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116084>.
 14. Y.K. Choi, W.S. Choi, J.H. Lee, Empirical research on the efficiency of floating PV systems, *Sci. Adv. Mater.* (2016), <https://doi.org/10.1166/sam.2016.2529>.
 15. L. Liu, Q. Wang, H. Lin, H. Li, Q. Sun, R. Wennersten, Power Generation Efficiency and Prospects of Floating Photovoltaic Systems, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.483>.
 16. И.А. Юлдошев, О. Жураев, Б.М. Ботиров, Ю.М. Курбанов. Краткий анализ современного состояния проекта фотоэлектрических станций, интегрированных с водяным бассейном // Международная научно-практическая конференция «Инновационная энергетика: фундаментальные основы энергетики и инновационные инженерные решения» 9-10 апреля, 2025 г. ургенч, узбекистан сборник тезисов докладов Ургенч 2025. – С. 105-108.
 17. И.А.Юлдошев, О.Ш.Жураев, Б.М.Ботиров, Ю.М.Курбанов. Первоначальные исследования для проекта фотоэлектрической станции интегрированной с водяным магистральным каналом в регионе Кашкадарья // Сборник научных трудов в международный научно-технической конференции «инновационные решения: устойчивое развитие в сельском хозяйстве и пищевой промышленности» 25-26 апреля, Ташкент – 2025. – С. 540-542.
 18. F. Grubišić, S. Nižetić, T.G. Marco, Photovoltaic panels: a review of the cooling techniques, *Trans. FAMENA* (2016).
 19. S. Nižetić, A.M. Papadopoulos, E. Giama, Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, Part I: passive cooling techniques, *Energy Convers. Manag.* 149 (2017) 334e354, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.022>.
 20. S. Nižetić, E. Giama, A.M. Papadopoulos, Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, Part II: active cooling techniques, *Energy Convers. Manag.* 155 (July 2017) (2018) 301e323, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.071>.
 21. A. Gagliano, G.M. Tina, F. Nocera, A.D. Grasso, S. Aneli, Description and performance analysis of a flexible photovoltaic/thermal (PV/T) solar system, *Renew. Energy* (2019), <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.057>.
 22. IEC International Standard 60904-1. Photovoltaic devices – Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics. – Second edition; intr.2006-09. – *International Electrotechnical Commission*. 2006. – P.1-23
 23. Nikolas Jenkins, Janaka Ekanayake **Renewable Energy Engineering Second Edition**, Cambridge University Press, 2024. P.529

REFERENCES

1. International Energy Agency. *The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities*. International Energy Agency, Paris, France, 2019.
2. World Bank Group, ESMAP, and SERIS. *Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report — Executive Summary*. World Bank, Washington, DC, 2018. Available at: <https://documents.worldbank.org/curated/en/579941540407455831/pdf/Floating-Solar-Market-Report-Executive-Summary.pdf> (accessed 15 September 2025).
3. PV Magazine. *40 MW Floating PV Plant in China Connected with Sungrow's Inverters*. 2017. Available at: <https://www.pv-magazine.com/2017/05/19/floating-pv-plant-in-china-connected-with-sungrows-inverters/> (accessed 15 September 2025).
4. PV-Tech. *Akuo Energy Starts Construction on 17 MW Floating Solar Plant in France*. 2018. Available at: <https://www.pv-tech.org/news/akuo-energy-starts-construction-on-17MW-floating-solar-plant-in-france> (accessed 15 September 2025).
5. PV Magazine. *America's Largest Floating Solar Project Completed*. 2019. Available at: <https://pv-magazine-usa.com/2019/10/23/americas-largest-floating-solar-project-completed/> (accessed 15 September 2025).
6. Ciulla G., D'Amico A., Di Dio V., Lo Brano V. Modelling and analysis of real-world wind turbine power curves: assessing deviations from nominal curve by neural networks. *Renewable Energy*, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.075> (accessed 15 September 2025).
7. Marino C., Nucara A., Panzera M.F., Pietrafesa M., Varano V. Energetic and economic analysis of a stand-alone photovoltaic system with hydrogen storage. *Renewable Energy*, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.079> (accessed 15 September 2025).



8. Rusu L. The wave and wind power potential in the western Black Sea. *Renewable Energy*, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.017> (accessed 15 September 2025).
9. BP. *BP Energy Outlook 2019 Edition*. BP, 2019.
10. International Renewable Energy Agency. *Renewable Capacity Statistics 2020*. IRENA, 2020.
11. Solar Power Europe. *Global Market Outlook for Solar Power 2019–2023*. SolarPower Europe, 2020.
12. Gorjian S., Sharon H., Ebadi H., Kant K., Scavo F.B., Tina G.M. Recent technical advancements, economics and environmental impacts of floating photovoltaic solar energy conversion systems. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 124285. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124285> (accessed 15 September 2025).
13. Tina G.M., Bontempo Scavo F., Merlo L., Bizzarri F. Comparative analysis of monofacial and bifacial photovoltaic modules for floating power plants. *Applied Energy*, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116084> (accessed 15 September 2025).
14. Choi Y.K., Choi W.S., Lee J.H. Empirical research on the efficiency of floating PV systems. *Science of Advanced Materials*, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1166/sam.2016.2529> (accessed 15 September 2025).
15. Liu L., Wang Q., Lin H., Li H., Sun Q., Wennersten R. Power generation efficiency and prospects of floating photovoltaic systems. *Energy Procedia*, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.483> (accessed 15 September 2025).
16. Yuldoshev I.A., Zhuraev O., Botirov B.M., Kurbanov Yu.M. Brief analysis of the current state of photovoltaic station projects integrated with water reservoirs. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Innovative Energy: Fundamental Foundations of Energy and Innovative Engineering Solutions"*, Urgench, Uzbekistan, April 9–10, 2025, pp. 105–108.
17. Yuldoshev I.A., Zhuraev O.Sh., Botirov B.M., Kurbanov Yu.M. Initial research for the project of a photovoltaic station integrated with a water main canal in the Kashkadarya region. *Proceedings of the 5th International Scientific and Technical Conference "Innovative Solutions: Sustainable Development in Agriculture and Food Industry"*, Tashkent, April 25–26, 2025, pp. 540–542.
18. Grubišić-Čabo F., Nižetić S., Marco T.G. Photovoltaic panels: a review of the cooling techniques. *Transactions of FAMENA*, 2016.
19. Nižetić S., Papadopoulos A.M., Giama E. Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, Part I: passive cooling techniques. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 149, pp. 334–354. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.022> (accessed 15 September 2025).
20. Nižetić S., Giama E., Papadopoulos A.M. Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, Part II: active cooling techniques. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 155, pp. 301–323. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.071> (accessed 15 September 2025).
21. Gagliano A., Tina G.M., Nocera F., Grasso A.D., Aneli S. Description and performance analysis of a flexible photovoltaic/thermal (PV/T) solar system. *Renewable Energy*, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.057> (accessed 15 September 2025).
22. IEC International Standard 60904-1. *Photovoltaic Devices – Part 1: Measurement of Photovoltaic Current-Voltage Characteristics*. 2nd ed., International Electrotechnical Commission, 2006, pp. 1–23.
23. Jenkins N., Ekanayake J. *Renewable Energy Engineering*. 2nd ed., Cambridge University Press, 2024, p. 529.