

Энергетические системы и комплексы

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

- **Махсумов И.Б.**, канд. техн. наук, Таджикский энергетический институт, р-н. Кушониён, Республика Таджикистан

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE EFFICIENCY OF SOLAR CELLS

- **Makhsumov I.B.**, Ph.D. of Engineering Sciences, Tajik Power Engineering Institute, Kushoniyon District, Republic of Tajikistan

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения энергетической эффективности солнечных элементов в условиях воздействия климатических и эксплуатационных факторов. Несмотря на то, что технические решения и методы, применяемые в работе, являются известными в науке и практике, их систематизация и адаптация к реальным условиям эксплуатации представляют практическую ценность.

Целью исследования является комплексный анализ влияния факторов окружающей среды на эффективность работы солнечных модулей и разработка рекомендаций по минимизации негативных эффектов. Для достижения цели решались задачи оценки влияния запыленности, температуры, влажности и затенения на характеристики фотоэлектрических систем.

Методы исследования включали натурные испытания солнечных модулей, моделирование вольт-амперных характеристик при различных климатических условиях, а также сравнительный анализ данных, полученных в ходе исследований, с результатами, представленными в научной литературе.

Полученные результаты подтвердили соответствие выявленных закономерностей ранее известным научным данным. Работа демонстрирует, что загрязнение поверхности панелей снижает эффективность до 25%, повышение температуры приводит к снижению мощности на 0,4% на каждый градус Цельсия, а высокая влажность ускоряет деградиационные процессы. Сопоставление результатов исследования с литературными источниками свидетельствует о корректности выбранных методов и обоснованности практических рекомендаций, направленных на повышение надёжности и энергетической производительности фотоэлектрических систем в неблагоприятных климатических условиях.

Ключевые слова: солнечные элементы, фотоэлектрические модули, эффективность, запыленность, температура, влажность, эксплуатация.

The relevance of the study is due to the need to improve the energy efficiency of solar cells under the influence of climatic and operational factors. Despite the fact that technical solutions and methods used in the work are known in science and practice, their systematisation and adaptation to real operating conditions are of practical value. The aim of the study is a comprehensive analysis of the influence of environmental factors on the efficiency of solar modules and the development of recommendations to minimise negative effects.

To achieve the goal, the tasks of assessing the influence of dust, temperature, humidity and shading on the characteristics of photovoltaic systems were solved.

The research methods included field tests of solar modules, modelling of volt-ampere characteristics under different climatic conditions, as well as comparative analysis of the data obtained during the research with the results presented in the scientific literature.

The obtained results confirmed the conformity of the revealed regularities with previously known scientific data. The work demonstrates that contamination of the panel surface reduces efficiency by up to 25%, temperature increase leads to power reduction by 0.4% for each degree Celsius, and high humidity accelerates degradation processes. Comparison of the research results with literature sources indicates the correctness of the selected methods and validity of practical recommendations aimed at improving the reliability and energy performance of photovoltaic systems in unfavourable climatic conditions.

Key words: solar cells, photovoltaic modules, efficiency, dust, temperature, humidity, operation.

Введение

В современных условиях стремительного развития возобновляемой энергетики солнечные элементы играют ключевую роль в обеспечении устойчивого энергоснабжения. Однако их эффективность во многом зависит от воздействия факторов окружающей среды, которые могут существенно снижать выходную мощность и долговечность фотоэлектрических систем.

Постановка задачи исследования обусловлена необходимостью комплексного учёта климатических, эксплуатационных и конструктивных условий, особенно в регионах с высокой солнечной активностью и экстремальными погодными параметрами. В таких условиях эффективность работы солнечных модулей может значительно снижаться, что требует научного анализа и разработки практических рекомендаций [1-2].

Наиболее значимыми факторами являются накопление пыли на поверхности панелей, температурные колебания, уровень влажности, а также эксплуатационные параметры, такие как конфигурация установки и техническое состояние модулей. Оседание пылевых частиц снижает проникновение солнечного излучения, температура влияет на электрические характеристики элементов, а влажность способствует деградации материалов [3].

Целью настоящей работы является комплексное исследование воздействия указанных факторов на эффективность работы солнечных элементов и выработка рекомендаций по минимизации их негативного влияния. В рамках исследования решаются задачи анализа влияния отдельных

климатических параметров, конструктивных особенностей и эксплуатационных условий на выходную мощность солнечных панелей.

Обзор технологии солнечных элементов

Существует три основных класса солнечных элементов, среди которых наиболее распространены кремниевые фотоэлементы. Они подразделяются на два типа: монокристаллические и поликристаллические.

Монокристаллические фотоэлементы обладают наибольшей эффективностью, достигающей 26,7 % в лабораторных условиях [1]. Однако их производство требует сложных технологических процессов, что увеличивает стоимость и ограничивает массовое распространение.

Поликристаллические фотоэлементы, напротив, изготавливаются с использованием нескольких кристаллических зерен, что приводит к снижению эффективности по сравнению с монокристаллическими аналогами. Несмотря на это, благодаря более простой технологии производства их себестоимость ниже.

Несмотря на более высокие производственные затраты, монокристаллические фотоэлементы остаются доминирующим продуктом на рынке солнечных технологий. Их популярность обусловлена высокой эффективностью преобразования энергии, продолжительным сроком службы и качеством изготовления. Хотя их производство составляет лишь около 30 % от общей стоимости модуля, они про-

должают оставаться наиболее востребованными среди фотоэлектрических элементов [2-3].

Факторы, не связанные с окружающей средой, но влияющие на солнечные элементы, включают технические характеристики солнечных панелей. Качество материалов, таких как полупроводники, металлы и покрытия, напрямую влияет на эффективность преобразования солнечной энергии. Важным аспектом является также процесс производства: точность и технологические особенности при изготовлении солнечных панелей могут существенно повлиять на их производительность и долговечность. Конструкция и дизайн панелей, включая геометрию и форму, а также толщину слоев и тип соединений, определяют их общую эффективность.

Электрическая нагрузка и схемы подключения солнечных панелей также играют роль. Конфигурация системы, будь то сетевые или автономные установки, а также параллельное или последовательное подключение панелей, может влиять на общую производительность. Важным моментом являются местные потери энергии, вызванные сопротивлением проводников и неэффективностью инверторов.

Со временем солнечные элементы подвергаются старению, что снижает их эффективность. Долговечность материалов и физическое старение, включая деградацию тонких пленок

и других компонентов, могут существенно повлиять на производительность. Отсутствие регулярного обслуживания или неправильная настройка системы также приводит к снижению эффективности. Механические повреждения, такие как трещины или дефекты покрытия, могут уменьшить работоспособность солнечных панелей. Эти факторы важно учитывать при оптимизации работы солнечных элементов наряду с экологическими условиями [5].

На рисунке 1 показано сравнение коэффициентов производительности различных фотоэлектрических технологий.

Факторы окружающей среды

Пыль на фотоэлектрических панелях снижает их выходную мощность, препятствуя проникновению солнечного излучения, вызывая неравномерное затенение и коррозию, а также увеличивает диффузное отражение света.

Температура окружающей среды влияет на рабочие параметры модулей: при ее повышении снижается рабочее напряжение и выходная мощность. Влажность уменьшает количество прямого солнечного излучения, а длительное воздействие влажного воздуха может привести к коррозии, увеличению проводимости материалов и росту токов утечки, что ухудшает характеристики модулей.

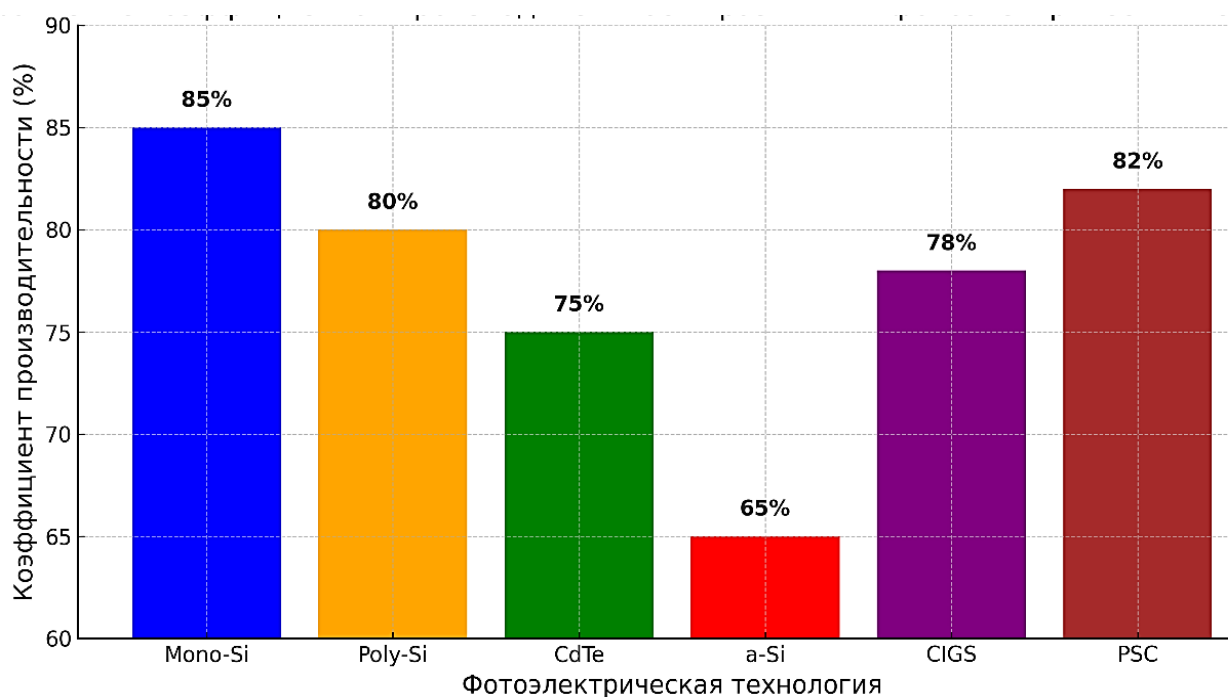


Рис. 1. Сравнение коэффициентов производительности различных фотоэлектрических технологий

Угол наклона панелей играет ключевую роль в оптимизации поглощения солнечной радиации, а затенение от конструкций или природных объектов снижает их эффективность. Для максимальной выработки энергии фотоэлектрические модули должны быть точно ориентированы на солнце.

Влияние пыли на эффективность и производительность солнечных элементов

Пыль представляет собой мельчайшие твердые частицы диаметром менее 500 мкм, которые могут образовываться из различных источников, включая ветер, движение людей и транспорта, вулканические извержения и загрязнение окружающей среды. Осаждение пыли на поверхностях, в том числе на фотоэлектрических модулях, зависит от множества факторов и может либо быстро удаляться, либо накапливаться со временем под воздействием скорости ветра [6].

Исследования, проведенные в аэродинамической трубе, показали, что направление ветра оказывает большее влияние на осаждение пыли, чем скорость воздушного потока [7]. Кроме того, количество накопленной пыли зависит от ориентации поверхности и направления ветра. Выявлено, что мелкие частицы пыли оказывают более значительное негативное влияние на эффективность фотоэлектрических модулей, чем крупные частицы. Мелкие частицы пыли образуют плотный слой на модулях, снижая пропускание света и выработку энергии на 10–20%. Они труднее удаляются, особенно при высокой влажности. Для минимизации используются очистка, гидрофобные покрытия и мониторинг загрязненности.

На рисунке 2 представлено сравнение вольт-амперных характеристик солнечных модулей в чистом и запыленном состоянии, демонстрирующее заметное снижение выходной мощности при наличии загрязнения. В частности, исследование [3] показало, что наиболее критическое воздействие на эффективность солнечных элементов оказывают пылевые частицы диаметром менее 50 мкм. Эти мелкодисперсные частицы обладают высокой адгезией к поверхности модулей и устойчивостью к ветровым нагрузкам, что значительно затрудняет их удаление естественными путями, например, под действием дождя или ветра. Они образуют плотный, равномерно распределенный слой, который снижает степень пропускания солнечного

излучения к фоточувствительным слоям модуля. В результате происходит падение тока короткого замыкания и, как следствие, общей вырабатываемой мощности. Это подчёркивает необходимость регулярной очистки панелей и разработки защитных покрытий, препятствующих оседанию и прилипанию мелких частиц пыли [3, 8].

Влияние температуры на эффективность и производительность солнечных элементов

Температура существенно влияет на эффективность солнечных элементов. С повышением температуры эффективность панелей снижается из-за увеличения сопротивления материалов, что приводит к уменьшению выходной мощности. Для кремниевых панелей температурный коэффициент мощности обычно составляет $-0.4\%/^{\circ}\text{C}$, что означает снижение мощности на 0.4% при каждом увеличении температуры на 1°C .

В жарких климатах панели могут нагреваться до 70°C и выше, что снижает их КПД. Кремниевые панели более чувствительны к температуре, в то время как материалы, такие как перовскит, могут демонстрировать меньшую зависимость от температуры. Резкие температурные колебания могут вызвать механическое напряжение, приводящее к повреждениям и сокращению срока службы панелей.

Для повышения эффективности солнечных панелей в жарком климате используются различные системы охлаждения. Технологии, такие как теплоотводящие покрытия, активное охлаждение, а также пассивные системы с вентиляционными каналами и теплообменниками, помогают снизить температуру панелей, предотвратить перегрев и улучшить их производительность. Эти решения не только повышают эффективность, но и продлевают срок службы панелей, что особенно важно в условиях высоких температур [9]. На рис. 3 приложена вольт-амперная характеристика солнечного модуля при различных температурах среды.

Влияние влажности на эффективность и производительность солнечных элементов

Влажность оказывает определенное влияние на эффективность и производительность солнечных элементов. При повышенной влажности, особенно в сочетании с высокими тем-

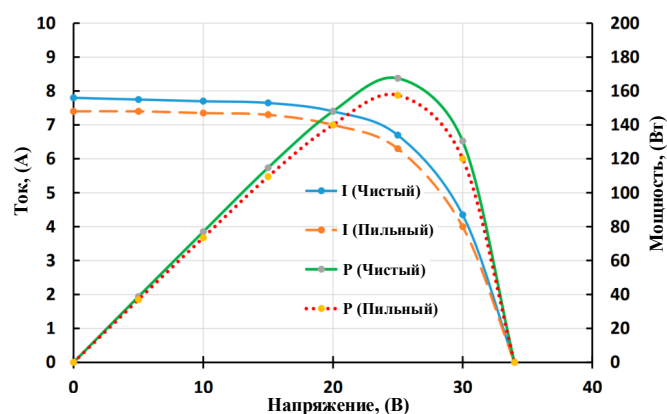


Рис. 2. Сравнение изменения тока и выходной мощности между чистыми и запыленными панелями [8].

пературами, могут возникать проблемы с производительностью. Влага может воздействовать на солнечные панели, снижая их эффективность по нескольким причинам.

Во-первых, высокая влажность может привести к образованию конденсата на поверхности панели, что снижает её способность поглощать солнечное излучение. Влажная среда также способствует накоплению грязи и пыли, что ухудшает светопоглощение и снижает КПД солнечного модуля.

Кроме того, влажность может влиять на долговечность материалов, из которых изготовлены солнечные элементы. Вода может проникать в панели, особенно если они имеют повреждения или дефекты герметичности, что может привести к коррозии металлических частей и ухудшению проводимости. Это может привести к поломкам и снижению производительности солнечных элементов.

Тем не менее, солнечные элементы обычно проектируются с учетом воздействия внешней среды, и многие панели имеют защитные покрытия или герметичные корпуса, которые минимизируют влияние влаги. Однако в условиях высокой влажности необходимо регулярно проводить техническое обслуживание и проверку герметичности солнечных панелей для поддержания их долговечности, и эффективности [10].

Эффект от расположения поверхностей фотоэлектрических модулей

Эффективность работы фотоэлектрических модулей зависит от их правильного расположения. Оптимальный угол наклона и ориентация

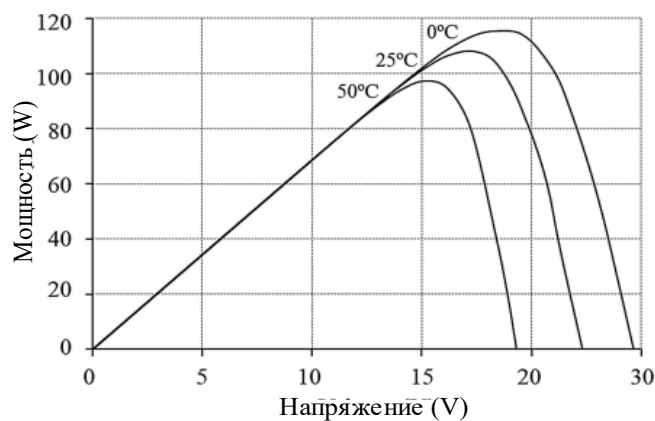


Рис. 3. Влияние температуры на эффективность и производительность солнечного модуля

относительно солнца обеспечивают максимальное поглощение солнечной энергии, что способствует высокой выработке электроэнергии. Панели, установленные под углом, могут более эффективно улавливать солнечное излучение, особенно если они следуют за движением солнца. Помимо этого, важными факторами, влияющими на эффективность, являются климатические условия, время года и затенение, которые могут снижать производительность модулей. Правильное размещение помогает минимизировать потери энергии и повысить общую эффективность солнечных систем [11].

Размещение фотоэлектрических модулей на крыше в несколько параллельных рядов помогает снизить влияние температурных факторов и других воздействий, повышая эксплуатационную эффективность.

Для максимизации эффективности работы фотоэлектрических модулей важно систематически изучать (рис. 4 и 5) тени и тщательно оценивать влияние их расположения.

Это поможет найти оптимальное размещение рядов, предотвращая взаимное блокирование модулей и обеспечивая более высокую выработку энергии.

На рис. 5 представлена характеристика влияния затенения солнечного модуля на его эффективность.

График иллюстрирует влияние частично затенения одной ячейки солнечного модуля (СМ) на его вольт-амперную характеристику (ВАХ). По оси абсцисс отложено напряжение (В), а по оси ординат сила тока (А). Сплошная линия отображает ВАХ незатенённого модуля, где максимальная мощность достигается в



Рис. 4. Влияние затенения на работу фотоэлектрического элемента

определённой точке. Пунктирные линии показывают изменение характеристики при затенении одной ячейки на 25%, 50%, 75% и 110%.

По мере увеличения степени затенения наблюдается, существенное снижение выходного тока солнечного модуля, уменьшение напряжения на выходе, особенно в области точки максимальной мощности и резкий спад характеристики, связанный с переходом ячейки в режим шунтирования.

Эти изменения объясняются тем, что затенённая ячейка становится зоной с повышенным сопротивлением, ограничивающей работу всего модуля. В условиях сильного затенения могут возникать локальные перегревы (hot spots), что приводит к деградации фотоэлементов.

Данный график наглядно демонстрирует важность предотвращения затенения солнечных модулей, так как даже частичное перекрытие одной ячейки существенно снижает общую производительность системы.

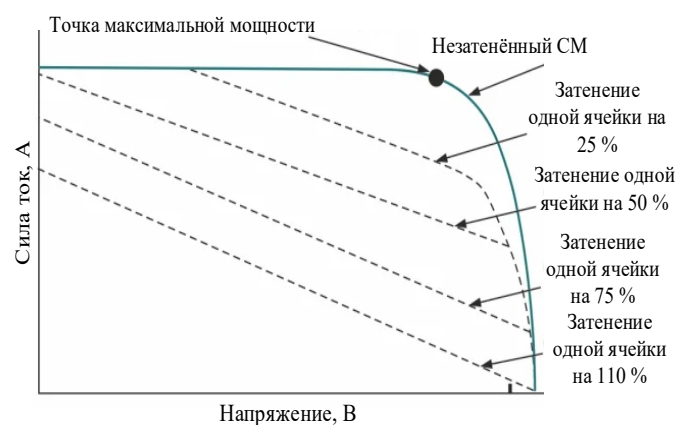


Рис. 5. Влияние частичного затенения солнечного модуля на его вольт-амперную характеристику

Научная новизна исследования

В рамках проведённого комплексного анализа уточнены количественные зависимости влияния климатических факторов (запыленности, температуры, влажности, затенения) на энергетическую эффективность солнечных модулей.

Особенность работы заключается в сопоставлении экспериментальных данных с теоретическими моделями и результатами, представленными в современной научной литературе, с последующей адаптацией известных методов оптимизации к специфическим климатическим условиям.

Для характерных условий высокоаридных регионов проанализировано интегральное влияние мелкодисперсной пыли с размером частиц менее 50 мкм на снижение выходной мощности солнечных модулей, что позволило уточнить требования к мерам очистки и защите поверхностей.

Разработаны практические рекомендации по повышению эффективности фотоэлектрических систем за счёт применения пассивных и активных технологий охлаждения и методов минимизации запыления.

Практическая значимость работы

Результаты исследования обладают высокой практической ценностью для эксплуатации фотоэлектрических систем в регионах с экстремальными климатическими условиями. Проведённый анализ позволяет разработать эффективные меры по минимизации влияния запыленности, высоких температур и влажности на выходную мощность солнечных модулей.

Рекомендации по оптимизации угла наклона панелей, использованию теплоотводящих покрытий, организации систем очистки и выбору методов защиты от влаги могут быть внедрены в эксплуатационную практику солнечных электростанций для повышения их надёжности, энергоэффективности и продления срока службы.

Полученные выводы могут быть использованы при проектировании новых солнечных энергоустановок, а также при модернизации действующих объектов в условиях повышенной запыленности и температурных нагрузок.

Выводы

По результатам комплексного анализа факторов окружающей среды, влияющих на работу солнечных элементов, можно сделать следующие выводы:

1. Накопление пыли на поверхности солнечных элементов снижает выходную мощность до 25%, что подтверждается графическими данными. Рекомендуется регулярная очистка панелей для поддержания их эффективности.

2. Повышение температуры снижает КПД солнечных модулей на 0,4 %/°C, особенно в жарком климате. Предлагается использование пассивных (теплоотводящие покрытия) и активных (воздушное или водяное охлаждение) систем охлаждения.

3. Высокая влажность может вызывать деградацию материалов и коррозию токопроводящих контактов. Для предотвращения этих процессов рекомендуется применение защитных покрытий, герметизация соединений и контроль условий эксплуатации.

4. Оптимизация угла наклона панелей может снизить оседание пыли и увеличить эффективность поглощения солнечной энергии. Рекомендуется учитывать ориентацию и сезонные изменения угла наклона для повышения генерации.

5. Комплексное применение предложенных мер позволит повысить надежность и эффективность фотоэлектрических систем в различных климатических условиях.

Список литературы

1. Rahman M.M., Hasanuzzaman M., Rahim N.A. Effects of operational conditions on the energy efficiency of photovoltaic modules operating in Malaysia // *Journal of Cleaner Production*. 2017. vol. 143. P. 912–924.

2. Кирпичникова, И.М. Сравнительный анализ генерации электрической энергии фотоэлектрическими модулями в различных температурных условиях / И.М. Кирпичникова, Д.А. Эвок, И.Б. Махсумов // *Электричество*. 2023. № 11. С. 34-41. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-11-34-41.

3. Махсумов, И.Б. Анализ производительности автономных солнечных электростанций с учётом экологических аспектов с применением программного пакета PVsyst в условиях южных регионов Республики Таджикистан / И.Б. Махсумов, А.Н. Давлатзода, М.Б. Холназаров // *Окружающая среда и энергосбережение*. – 2025. – № 1(25). – С. 106-128. – DOI 10.24412/2658-6703-2025-1-106-128.

4. Махсумов, И.Б. Оценка эффективности использования солнечной энергии на территории Хатлонской области Республики Таджикистан / И.Б. Махсумов // *Окружающая среда и энергосбережение*. 2024. № 1(21). С. 62-74. DOI: 10.24412/2658-6703-2024-1-62-74.

5. Udayakumar M.D., Subramaniam U., Rajesh A., Kumar A. The impact of advanced technological developments on solar PV value chain // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 45. P. 2053-2058.

6. Srivastava R., Tiwari A.N., Giri V.K. An overview on performance of PV plants commissioned at different places in the world // *Energy for Sustainable Development*. 2020. Vol. 54. P. 51-59.

7. Кирпичникова, И.М. Снижение генерации электрической энергии солнечными модулями в условиях запыленности местности / И.М. Кирпичникова, И.Б. Махсумов, В.В. Шестакова // *iPolytech Journal*. 2023. Т. 27, № 1. С. 83-93. DOI: 10.21285/1814-3520-2023-1-83-93.

8. Yang Z. A comprehensive analysis of environmental factors affecting solar cells: Dust accumulation, ambient temperature, and humidity // *Applied and Computational Engineering*. – 2023. – Т. 23. – С. 216-222.

9. Махсумов, И.Б. Влияние деградации и высокой температуры воздуха на энергетической эффективности солнечных модулей (литературный анализ) / И. Б. Махсумов // *Политехниче-*

ский вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2023. – № 3(63). – С. 22-28.

10. Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б., Сологубов А.Ю., Шестакова В.В. Особенности эксплуатации солнечных энергоустановок в различных климатических условиях // Энергоэффективность. Ценология. Экология и энергобезопасность: материалы научной конференции / под науч. ред. Л.Х. Зайнутдиновой, М.Г. Тягунова. Астрахань, 2020. С. 46-55.

11. Влияние тени на работу солнечных батарей [Электронный ресурс]. URL: <https://solarsoul.net/vliyanie-teni-na-rabotu-solnechnyx-batarej/> (дата обращения: 14.03.2025).

References

1. Rahman M.M., Hasanuzzaman M., Rahim N. A. Effects of operational conditions on the energy efficiency of photovoltaic modules operating in Malaysia // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 143. P. 912-924.

2. Kirpichnikova I.M., Evok D.A., Makhsumov I.B. [Comparative analysis of electric power generation by photovoltaic modules under different temperature conditions]. Electricity, 2023, no. 11, pp. 34-41. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-11-34-41. (in Russ.)

3. Makhsumov I.B., Davlatzoda A.N., Kholnazarov M.B. [Analysis of the Performance of Autonomous Solar Power Plants Taking into Account Environmental Aspects Using the Pvsyst Software Package in the Conditions of the Southern Regions of the Republic of Tajikistan]. Journal of Environmental Earth and Energy Study, 2025, no. 1(25), pp. 106-128. DOI 10.24412/2658-6703-2025-1-106-128. (in Russ.)

4. Makhsumov I.B. [Assessment of solar energy utilisation efficiency in Khatlon Oblast of the

Republic of Tajikistan]. Journal of Environmental Earth and Energy Study, 2024, no. 1(21), pp. 62-74. DOI: 10.24412/2658-6703-2024-1-62-74. (in Russ.)

5. Udayakumar M.D., Subramaniam U., Rajesh A., Kumar A. The impact of advanced technological developments on solar PV value chain // Materials Today: Proceedings, 2021, vol. 45, pp. 2053-2058.

6. Srivastava R., Tiwari A.N., Giri V.K. An overview on performance of PV plants commissioned at different places in the world // Energy for Sustainable Development, 2020, vol. 54, pp. 51-59.

7. Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B., Shestakova V.V. [Reduced power generation efficiency of solar panels in dusty locations]. iPolytech Journal, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 83-93. DOI: 10.21285/1814-3520-2023-1-83-93. (in Russ.)

8. Yang Z. A comprehensive analysis of environmental factors affecting solar cells: Dust accumulation, ambient temperature, and humidity // Applied and Computational Engineering, 2023, vol. 23, pp. 216-222.

9. Makhsumov I.B. [Effect of degradation and high air temperature on the energy efficiency of solar modules (literature analysis)]. Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research, 2023, no. 3(63), pp. 22-28. (in Russ.)

10. Kirpichnikova, I.M., Makhsumov I.B., Sologubov A.Y., Shestakova V.V. [Peculiarities of operation of solar power plants in different climatic conditions]. Energy efficiency. Cenology. Ecology and energy security: materials of the scientific conference / under the scientific editorship of L.H. Zainutdinova, M.G. Tyagunov. Astrakhan, 2020, pp. 46-55. (in Russ.)

11. Effect of shade on solar cell performance. – URL: <https://solarsoul.net/vliyanie-teni-na-rabotu-solnechnyx-batarej/> Available at: <http://www.utmn.ru/frgf/journal/htm> (accessed 14.03.2025).

Сведения об авторе

Махсумов Илхом Бурхонович - кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой альтернативных источников энергии Таджикского энергетического института, messi.neymar.suares@bk.ru.