

Терентьев Павел Валерьевич

к.т.н., доцент кафедры «ПМФиВМ»

Нижегородский государственный агротехнологический университет

им. Флорентьева Л.Я.

Terentyev Pavel Valerievich

Лупов Андрей Константинович, магистрант

Нижегородский государственный агротехнологический университет

им. Флорентьева Л.Я.

Lupov Andrey Konstantinovich

**ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ:
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОНО- И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР
ПРИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ
THERMOELECTRIC STABILITY OF PHOTOVOLTAIC MODULES:
COMPARATIVE ANALYSIS OF MONO- AND POLYCRYSTALLINE STRUCTURES
UNDER TEMPERATURE INFLUENCES**

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования влияния температурного нагрева на выходные электрические характеристики монокристаллических и поликристаллических фотоэлектрических солнечных модулей номинальной мощностью 30 Вт. Установлено, что монокристаллические модули демонстрируют положительную корреляцию между температурой нагрева и генерируемой мощностью в диапазоне 28–50°C, тогда как поликристаллические структуры характеризуются монотонным снижением эффективности при повышении температуры. Полученные данные свидетельствуют о более высокой термической стабильности монокристаллических фотоэлементов и позволяют оптимизировать выбор типа модулей для различных климатических условий эксплуатации

Abstract. This article presents the results of an experimental study of the effect of thermal heating on the output electrical characteristics of monocrystalline and polycrystalline photovoltaic solar modules with a nominal power of 30 W. It was found that monocrystalline modules demonstrate a positive correlation between heating temperature and generated power in the range of 28–50°C, while polycrystalline structures are characterized by a monotonic decrease in efficiency with increasing temperature. The obtained data indicate the higher thermal stability of monocrystalline solar cells and allow for the optimization of module type selection for various climatic operating conditions

Ключевые слова: Фотоэлектрический солнечный модуль, монокристаллический кремний, поликристаллический кремний, температурный коэффициент, вольт-амперные характеристики, эффективность преобразования

Keywords: Photovoltaic solar module, monocrystalline silicon, polycrystalline silicon, temperature coefficient, current-voltage characteristics, conversion efficiency

Введение

Стремительное развитие возобновляемой энергетики и повышение требований к энергоэффективности автономных систем электроснабжения обуславливают необходимость детального исследования рабочих характеристик фотоэлектрических преобразователей в различных эксплуатационных условиях. Согласно прогнозам Международного энергетического агентства, к 2030 году доля солнечной генерации в мировом энергобалансе достигнет 15-20%, что требует глубокого понимания факторов, влияющих на производительность солнечных модулей [1, 2].



Ключевым дестабилизирующим фактором, ограничивающим эффективность работы фотоэлектрических станций, является температурный нагрев элементов. Известно, что повышение температуры фотопреобразователей приводит к изменению ширины запрещенной зоны полупроводника, увеличению скорости рекомбинации носителей заряда и, как следствие, снижению выходной мощности [3, 4]. Однако количественные характеристики данного эффекта существенно различаются для разных типов кристаллических структур.

Особый научный и практический интерес представляет сравнительный анализ термической стабильности монокристаллических и поликристаллических кремниевых фотоэлементов.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение характера зависимости выходных электрических параметров (тока, напряжения, мощности) монокристаллического и поликристаллического солнечных модулей от температуры нагрева в контролируемых лабораторных условиях.

В задачи исследования входило:

Создание воспроизводимых условий нагрева фотоэлектрических модулей с использованием искусственного источника излучения;

Регистрация температурных полей на поверхности модулей и электрических параметров в процессе нагрева;

Построение и анализ регрессионных моделей зависимости выходных характеристик от температуры;

Сравнительная оценка термической стабильности исследуемых типов модулей.

Методика экспериментальных исследований

Объекты исследования

В качестве объектов исследования выбраны серийно выпускаемые фотоэлектрические солнечные модули (ФСМ) производства Delta мощностью 30 Вт с номинальным напряжением 12 В:

Delta SM 30-12-M – монокристаллический модуль с КПД элементов ФСМ 17,66%. Температурные коэффициенты, заявленные производителем: для максимальной мощности – 0,47%/°C, напряжения холостого хода –0,38%/°C, тока короткого замыкания +0,04%/°C.

Delta SM 30-12-P – поликристаллический модуль с КПД элементов ФСМ 15,57%. Температурные коэффициенты: для максимальной мощности –0,45%/°C, напряжения холостого хода –0,35%/°C, тока короткого замыкания +0,04%/°C.

Оба модуля относятся к категории качества Grade A, имеют положительный толеранс мощности +3% и одинаковую рабочую температуру NOCT 47±2°C.

Экспериментальный стенд

Исследования проводились на специализированном лабораторном стенде, включающем следующие функциональные группы оборудования [5-7]:

Источник излучения: галогенный прожектор IEK мощностью 500 Вт с регулировкой светового потока посредством диммера TDM SQ-1804-0016, что позволяло поддерживать постоянный уровень облученности на протяжении всего эксперимента.

Измерительный комплекс:

Мультиметр A830AL – измерение тока и напряжения в цепи нагрузки;

Ваттметр DC – регистрация мгновенной мощности;

Пирометр Vastar GM320 – бесконтактное измерение температуры в шести контрольных точках поверхности модуля;

Измеритель солнечной энергии SM206 – контроль интенсивности излучения;

Электронный уровень Kaisi – контроль угла наклона модулей.

Система позиционирования: электрический линейный привод SKU580510, обеспечивающий возможность изменения угла наклона модулей (в данном эксперименте модули располагались под фиксированным углом 45°).



Процедура измерений

Эксперимент проводился в следующей последовательности:

Модуль устанавливался в рабочее положение, подключался к нагрузке через контроллер заряда PWM «SOLAR SNATERM».

Регистрировались начальные значения тока, напряжения, мощности и температуры в шести точках поверхности (Т1–Т6).

Включался источник излучения, и в течение 15 минут с интервалами 0, 2, 4, 6, 8, 10, 15 минут производилась фиксация параметров.

Рассчитывалась средняя температура модуля как среднее арифметическое значений в шести контрольных точках.

Аналогичная процедура повторялась для модуля второго типа.

Все измерения проводились в условиях стабильной температуры окружающей среды ($23 \pm 1^\circ\text{C}$) и отсутствия внешних воздушных потоков.

Результаты исследований (табл. 1-2)

Динамика температурного нагрева

Анализ температурных полей исследуемых модулей выявил существенную неравномерность распределения температуры по поверхности. Для монокристаллического модуля максимальный градиент температуры между контрольными точками достигал $12,8^\circ\text{C}$ (при максимальной температуре 61°C в точке Т3 и минимальной 45°C в точке Т6), что обусловлено конструктивными особенностями токосъемных шин и неравномерностью освещенности.

Средняя температура монокристаллического модуля за 15 минут эксперимента повысилась с $28,52^\circ\text{C}$ до $54,25^\circ\text{C}$, что соответствует средней скорости нагрева $1,72^\circ\text{C}/\text{мин}$. Поликристаллический модуль продемонстрировал более интенсивный нагрев: средняя температура увеличилась с $44,50^\circ\text{C}$ до $58,30^\circ\text{C}$ при скорости нагрева $0,92^\circ\text{C}/\text{мин}$. Принципиально важно отметить, что начальная температура поликристаллического модуля была на 16°C выше, что указывает на его более низкую тепловую инерционность и, вероятно, большее поглощение ИК-составляющей излучения.

В обоих случаях зависимость средней температуры от времени нагрева с высокой точностью ($R^2 > 0,95$) аппроксимируется линейной функцией, что позволяет прогнозировать температурный режим модулей при длительной эксплуатации (рис. 1-2).

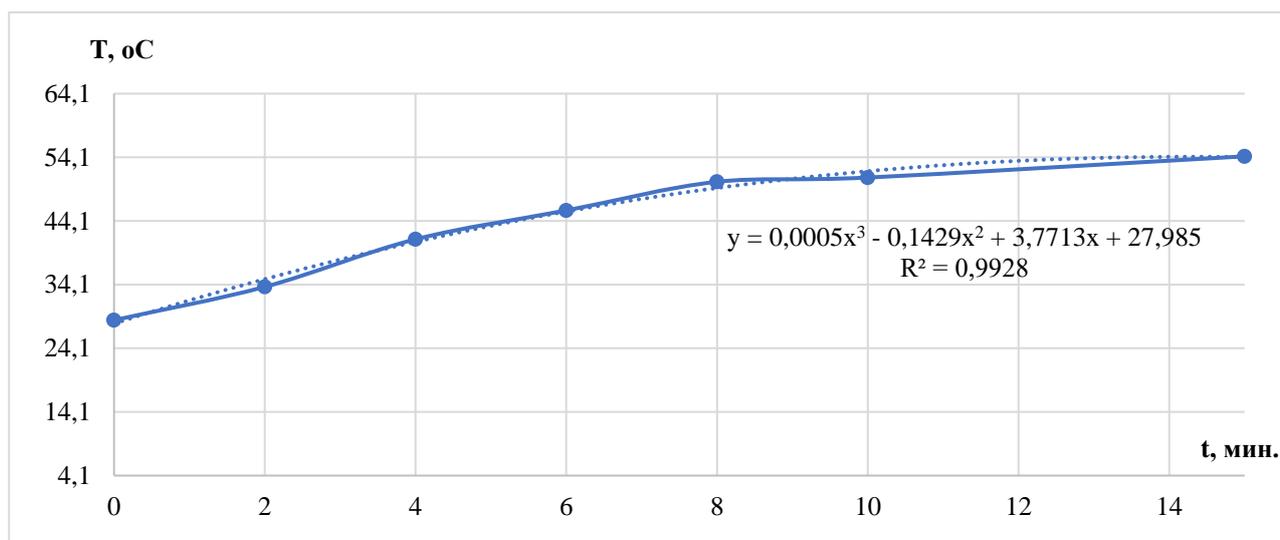


Рис. 1 – График зависимости значения средней температуры ячеек от времени работы лабораторной установки – ФСМ Монокристаллического типа

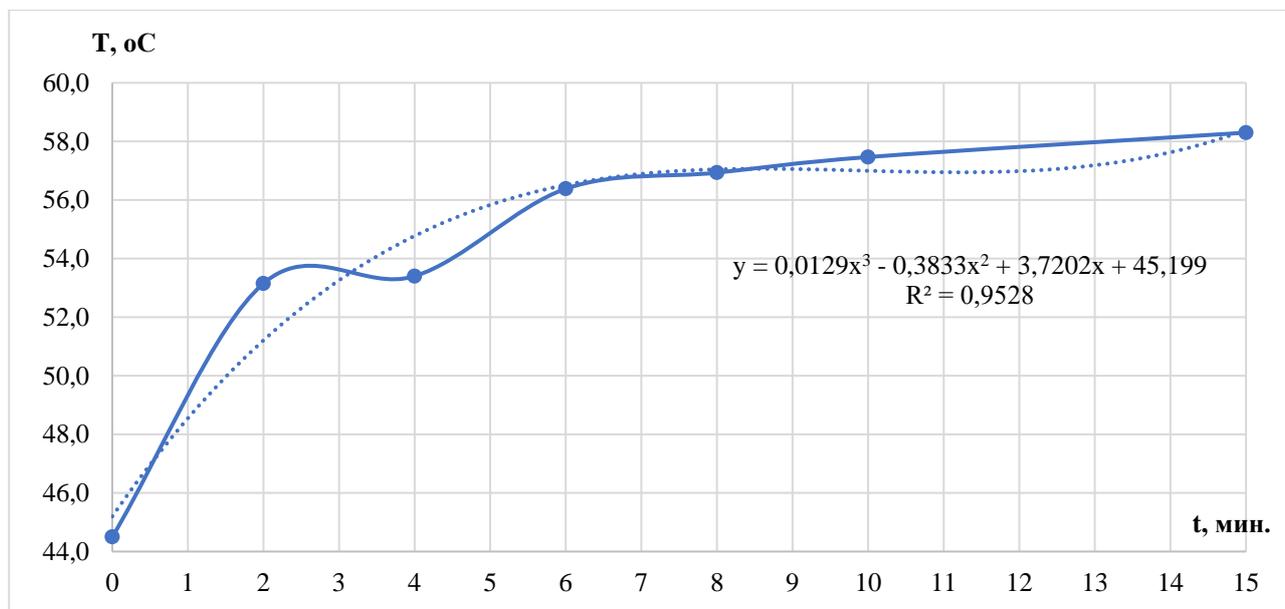


Рис. 2 – График зависимости значения средней температуры ячеек от времени работы лабораторной установки – ФСМ Поликристаллического типа

Токковые характеристики

Принципиально различный характер зависимости тока от температуры зафиксирован для исследуемых типов модулей.

Монокристаллический модуль: в диапазоне температур 28–50°C наблюдается устойчивый рост тока от 1,33 А до 1,35 А. Максимальное значение тока (1,35 А) зарегистрировано при температуре 50,25°C, после чего при дальнейшем нагреве до 54,25°C ток снижается до 1,34 А. Такое поведение можно объяснить доминированием двух конкурирующих процессов: с одной стороны, увеличение температуры приводит к снижению ширины запрещенной зоны и росту неосновных носителей, с другой – усиливаются рекомбинационные потери. В исследованном диапазоне первая составляющая преобладает до температуры ~50°C.

Поликристаллический модуль: зафиксировано монотонное снижение тока с 1,25 А при 44,5°C до 1,23 А при 58,3°C. Снижение тока составило 2%, что превышает паспортные значения температурного коэффициента для тока короткого замыкания (+0,04%/°C). Данное расхождение объясняется тем, что в эксперименте регистрировался рабочий ток в цепи с контроллером заряда, а не ток короткого замыкания.

Вольтовые характеристики

Напряжение исследуемых модулей демонстрирует значительно меньшую чувствительность к температурным воздействиям по сравнению с током.

Для монокристаллического модуля зафиксировано монотонное увеличение напряжения с 12,55 В до 12,69 В в процессе нагрева, что противоречит общепринятым представлениям об отрицательном температурном коэффициенте напряжения холостого хода (-0,38%/°C). Данный эффект может быть обусловлен особенностями работы контроллера заряда, который поддерживает рабочее напряжение в узком диапазоне в зависимости от степени заряда аккумуляторной батареи. Таким образом, зафиксированные значения отражают не столько собственную температурную зависимость напряжения модуля, сколько алгоритм работы системы электропитания в целом.

Поликристаллический модуль демонстрирует стабилизацию напряжения на уровне 12,69–12,70 В после достижения температуры 53°C. Абсолютное изменение напряжения за весь период эксперимента не превысило 0,03 В (0,24%).

Мощностные характеристики

Интегральным показателем эффективности работы фотоэлектрического модуля является выходная электрическая мощность.

Монокристаллический модуль: мощность увеличивается с 16,69 Вт при 28,5°C до максимального значения 17,05 Вт при 50,25°C. Прирост мощности составляет 2,2% относительно начального уровня. Дальнейший нагрев до 54,25°C сопровождается снижением мощности до 17,0 Вт. Форма кривой мощности повторяет форму токовой зависимости, что указывает на доминирующий вклад тока в формирование результирующей мощности в условиях стабилизированного напряжения.

Поликристаллический модуль: мощность монотонно снижается с 15,84 Вт при начальной температуре до 15,62 Вт при максимальном нагреве. Общее снижение мощности составляет 1,4%, причем наиболее интенсивное падение происходит в первые 4 минуты эксперимента при нагреве от 44,5°C до 53,4°C.

Сопоставление абсолютных значений мощности показывает, что при сопоставимых температурах (54–58°C) монокристаллический модуль генерирует мощность 17,0 Вт, что на 8,1% превышает мощность поликристаллического модуля (15,62 Вт). Данное различие обусловлено как более высоким КПД монокристаллических элементов, так и различным характером температурной зависимости выходных параметров.

Таблица 1

Результаты исследования №1 – ФСМ Монокристаллического типа

t, мин.	T, °C							I, А	U, В	P, Вт
	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6	T _{ср.}			
0	32,4	27,1	29,2	28,4	26,7	27,3	28,52	1,33	12,55	16,69
2	35,3	33,3	35,9	35,5	31,1	31,4	33,75	1,33	12,6	16,76
4	45,2	40,2	45,2	43,8	36,2	36,7	41,22	1,33	12,61	16,77
6	45	46	50,8	50,7	41	41	45,75	1,34	12,62	16,91
8	53,6	50,7	54,4	55	43,6	44,2	50,25	1,35	12,63	17,05
10	54,2	53	57,4	55,9	41,7	43,3	50,92	1,34	12,65	16,95
15	57	57	61	59,8	45,7	45	54,25	1,34	12,69	17,00

Таблица 2

Результаты исследования №2 – ФСМ Поликристаллического типа

t, мин.	T, °C							I, А	U, В	P, Вт
	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6	T _{ср.}			
0	39,3	38,9	54,2	53,9	41,5	39,2	44,50	1,25	12,67	15,84
2	44	43,6	81,3	59,8	44,6	45,6	53,15	1,25	12,69	15,86
4	45,9	46,8	69,3	63	47,5	47,9	53,40	1,24	12,69	15,74
6	51,5	52,2	70,4	64,9	49	50,3	56,38	1,24	12,69	15,74
8	53,1	53,5	68,7	66,3	49,1	50,9	56,93	1,24	12,7	15,75
10	53,8	54,8	67,1	67,7	49,9	51,5	57,47	1,23	12,7	15,62
15	55,7	54	69,7	68,7	50,2	51,5	58,30	1,23	12,7	15,62

Обсуждение результатов

Интерпретация выявленных зависимостей

Полученные экспериментальные данные демонстрируют статистически значимые различия в термическом поведении монокристаллических и поликристаллических фотоэлектрических модулей. Ключевым результатом является обнаружение положительной



температурной зависимости мощности для монокристаллического модуля в диапазоне температур 28–50°C, что не согласуется с паспортными данными производителя (отрицательный температурный коэффициент мощности).

Возможные причины наблюдаемого явления:

Эффект «термического отжига» – при умеренном нагреве происходит активация примесных центров и улучшение кристаллической структуры в приповерхностных областях, что снижает скорость поверхностной рекомбинации. Данный эффект характерен именно для высококачественных монокристаллических структур с низкой плотностью дислокаций.

Оптические эффекты – нагрев модуля приводит к изменению показателя преломления защитного покрытия и просветляющих слоев, что может улучшить оптическое согласование и увеличить долю поглощаемого излучения в определенном спектральном диапазоне.

Особенности работы контроллера заряда – PWM-контроллер изменяет скважность подключения нагрузки, стремясь удерживать рабочую точку вблизи точки максимальной мощности. В условиях изменяющейся температуры происходит автоматическая подстройка режима работы.

Для поликристаллического модуля отрицательная температурная зависимость мощности выражена более отчетливо и соответствует теоретическим представлениям. Повышенная скорость деградации выходных параметров поликристаллического модуля объясняется наличием большого количества границ зерен, выступающих центрами рекомбинации, активность которых экспоненциально возрастает с температурой.

Практические рекомендации

Основываясь на полученных результатах, можно сформулировать следующие практические рекомендации:

Для регионов с умеренным и холодным климатом (среднегодовая температура ниже 15°C) предпочтительным является использование монокристаллических модулей, демонстрирующих повышение эффективности при нагреве до 50°C.

Для жарких климатических зон с продолжительным периодом температур выше 40°C выбор типа модуля требует дополнительного экономического анализа, учитывающего как термическую стабильность, так и стоимостные показатели.

При проектировании фотоэлектрических станций в условиях высоких температур целесообразно применение систем активного охлаждения или размещение модулей с обеспечением естественной вентиляции тыльной поверхности.

Приведенные температурные коэффициенты в паспортных данных производителей требуют экспериментальной верификации для конкретных режимов эксплуатации, поскольку реальная температурная зависимость мощности может существенно отличаться от полученной в стандартных тестовых условиях (STC).

Ограничения исследования

При интерпретации полученных результатов необходимо учитывать следующие ограничения:

Использование искусственного источника излучения с иным спектральным составом по сравнению с солнечным излучением (галогенные лампы имеют повышенную долю ИК-составляющей).

Фиксированный угол наклона модулей без учета оптимальной ориентации относительно источника излучения.

Ограниченный временной интервал наблюдения (15 минут), не позволяющий оценить долговременные эффекты термической деградации.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение совместного влияния температуры и интенсивности облучения, а также на анализ эффективности различных типов контроллеров заряда (PWM и MPPT) в условиях переменных температур.



Заключение

В результате проведенного экспериментального исследования установлены следующие закономерности:

Монокристаллические фотоэлектрические модули Delta SM 30-12-M в диапазоне температур нагрева 28–50°C демонстрируют увеличение выходной мощности на 2,2% относительно начального уровня, что свидетельствует о наличии аномального положительного температурного коэффициента мощности в данном диапазоне. Максимальная мощность 17,05 Вт достигается при температуре 50,25°C.

Поликристаллические модули Delta SM 30-12-P характеризуются монотонным снижением выходной мощности при повышении температуры: уменьшение на 1,4% в диапазоне 44,5–58,3°C. Скорость деградации мощности максимальна в начальный период нагрева.

Сравнительный анализ абсолютных значений мощности при максимальных температурах нагрева показывает 8,1% преимущество монокристаллического модуля (17,0 Вт против 15,62 Вт), что обусловлено как более высоким начальным КПД, так и лучшей термической стабильностью.

Высокие значения коэффициентов аппроксимации ($R^2 > 0,95$ для всех регрессионных моделей) подтверждают достоверность полученных зависимостей и возможность их использования для прогнозирования рабочих характеристик фотоэлектрических модулей.

Таким образом, гипотеза о более высокой термической стабильности монокристаллических фотоэлектрических преобразователей в сравнении с поликристаллическими нашла экспериментальное подтверждение. Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации состава фотоэлектрических станций, работающих в различных климатических условиях

Список литературы:

1. International Energy Agency. World Energy Outlook 2023. – Paris: IEA Publications, 2023. – 353 p.
2. Терентьев П.В., Чертилов Д.А., Абрамов Н.В., Кибонги А.П., Перспективы развития солнечной энергетики в Российской Федерации // Флагман науки: научный журнал. Ноябрь 2025.-СПб., Изд.ГНИИ "Нацразвитие"-2025. №11 (34).
3. Литвин Н.В. Моделирование физических процессов работы солнечных фотоэлектрических батарей // Мониторинг. Наука и технологии. – 2020. – № 1 (43). – С. 46-53. – DOI: <https://doi.org/10.25714/MNT.2020.43.007>.
4. Влияние температуры на характеристики полупроводниковых фотоэлектрических приборов // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. Абдукаххарова М.А [и др.]. 2024. 7 (124). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17931>.
5. Терентьев, П. В. Исследование лабораторного стенда по тестированию фотоэлектрических солнечных модулей / П. В. Терентьев, С. В. Шильников // Неделя науки 2023: материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции студентов и молодых ученых, Нижний Новгород, 13–16 июня 2023 г. – Нижний Новгород: НГТУ, 2023. – С. 76–80.
6. Шильников, С.В. Разработка лабораторного стенда по исследованию ФСМ / С.В. Шильников, П.В. Терентьев // XXVII Нижегородская сессия молодых ученых: технические, естественные, математические науки: материалы сессии, Нижний Новгород, 24–27 мая 2022 г. – Москва: Перо, 2022. – С. 130–135.
7. IEC 61215–1:2021. Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 1: Test requirements. – Geneva: IEC, 2021. – 55 p

