

Труды МАИ. 2025. № 141
Trudy MAI. 2025. No. 141. (In Russ.)

Научная статья

УДК 620.92

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184510>

EDN: <https://www.elibrary.ru/TBBOSJ>

УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ

**Абдали Лаит Мохаммед Абдали^{1✉}, Владимир Владиславович Кувшинов²,
Елена Виктарьевна Гусева³, Светлана Андреевна Конева⁴,
Владимир Муратович Цалоев⁵**

¹Университет Куфы, Президентский университет Куфы,
Эн-Наджаф, Ирак

^{2,3,4,5}Севастопольский государственный университет,
Севастополь, Российская Федерация

¹laith_2210@yahoo.com✉

²kuvshinov.vladimir@gmail.com

³alenaalena73@mail.ru

⁴sakoneva@mail.sevsu.ru

⁵ymtsaloev@mail.sevsu.ru

Аннотация. Кремниевые фотоэлектрические преобразователи используются во многих отраслях промышленности и производства. Снижение их эффективности за счёт перегрева является большой проблемой для обеспечения надёжной работы высокотехнологического оборудования. Поскольку рабочая температура влияет на

электрическую эффективность солнечного элемента, для его хорошей работы необходимо адекватное и эффективное охлаждение. Устройства с высокоэффективными тепловыми характеристиками, в которых тепло передается от элемента во внешнюю среду через пульсирующие тепловые трубки, могут использоваться для обеспечения подходящей рабочей среды для фотоэлектрического элемента при низкой температуре. Этот процесс генерирует значительное количество энергии и максимизирует эффективность фотоэлектрического блока. В этом исследовании мы используем медные ребристые пульсирующие тепловые трубки для достаточного охлаждения элемента и работы его при оптимальной температуре, что повышает эффективность солнечного элемента. Медь используется для пульсирующих тепловых трубок из-за ее высокой проводимости, что улучшает производительность. Согласно исследованию, пульсирующие тепловые трубки являются лучшим выбором для охлаждения солнечного элемента, что повышает как его эффективность, так и количество вырабатываемой им энергии. Следовательно, использование систем охлаждения для регулирования их рабочей температуры имеет решающее значение. Пассивные технологии охлаждения без потребления дополнительной энергии и с небольшими затратами на обслуживание могут быть практичным вариантом. В этом исследовании собрана и сравнена обширная работа исследователей, применяющих пассивные методы охлаждения. Кроме того, исследование прольет свет на поиск подходящей техники охлаждения с учетом географических или экологических условий. Обсуждаются статьи, связанные с каждым конкретным пассивным методом, и отмечаются проблемы, которые остались нерешенными.

Ключевые слова: фотоэлектрическая панель, солнечная электростанция, тепловые трубки

Для цитирования: Абдали Л.М., Кувшинов В.В., Гусева Е.В., Конева С.А., Цалоев В.М. Увеличение производительности фотоэлектрических преобразователей при использовании высокотехнологичных систем охлаждения // Труды МАИ. 2025. № 141. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184510>

Original article

INCREASING THE PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC CONVERTERS USING HIGH-TECH COOLING SYSTEMS

Abdali Layth Mohammed Abdali^{1✉}, Vladimir V. Kuvshinov², Elena V. Guseva³, Svetlana A. Koneva⁴, Vladimir M. Tsaloiev⁵

¹University of Kufa, Presidency University of Kufa

Najaf, Iraq

^{2,3,4,5}Sevastopol State Technical University,

Sevastopol, Russian Federation

¹laith_2210@yahoo.com✉

²kuvshinov.vladimir@gmail.com

³alenaalena73@mail.ru

⁴sakoneva@mail.sevsu.ru

⁵vmtsaloiev@mail.sevsu.ru

Abstract: Silicon photovoltaic converters are used in many industries and manufacturing. Reduction in their efficiency due to overheating is a big problem for ensuring reliable operation of high-tech equipment. Since the operating temperature affects the electrical efficiency of the solar cell, adequate and effective cooling is necessary for its good operation. Devices with high thermal efficiency, in which heat is transferred from the cell to the external environment through pulsating heat pipes, can be used to provide a suitable operating environment for the photovoltaic cell at low temperature. This process generates a significant amount of energy and maximizes the efficiency of the photovoltaic unit. In this study, we use copper finned pulsating heat pipes to sufficiently cool the cell and operate it at an optimal temperature, which improves the efficiency of the solar cell. Copper is used for pulsating heat pipes due to its high conductivity, which improves the performance. According to the study, pulsating heat pipes are the best choice for cooling the solar cell, which improves both its efficiency and the amount

of energy it generates. Therefore, it is essential to use cooling systems to control their operating temperature. Technologies for passive cooling that require less maintenance and don't use extra electricity can be a good choice. This paper compiles and compares the substantial work of researchers using passive cooling strategies. Finding a suitable cooling method in light of environmental or geographic factors will also be clarified by the investigation. The issues that have not yet been resolved are mentioned, and papers pertaining to each particular passive approach are examined.

Keywords: photovoltaic panel, solar power plant, heat pipes

For citation: AbdAli L.M., Kuvshinov V.V., Guseva E.V., Koneva S.A., Tsaloiev V.M. Increasing the performance of photovoltaic converters using high-tech cooling systems. *Trudy MAI*. 2025. No. 141. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184510>

Введение

Полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи стали использоваться практически во всех областях техники, связанных с генерацией электрической энергии и питанием различных систем управления, в частности как для энергетики, так и для микроэлектроники, высокоточных измерительных устройств [1], систем питания космического оборудования, для стационарных наземных установок энергообеспечения авиационных комплексов и др. Так как требования к эксплуатации генерирующих систем постоянно повышаются, использование кремниевых (полупроводниковых) фотоэлектрических преобразователей в различных отраслях промышленности (энергетики, космической техники, транспорте, авиации, и др.) требует постоянного повышения качества их работы и улучшения выходных характеристик. Полупроводниковый фотоэлектрический элемент — это устройство, преобразующее поток солнечной радиации в электрическую энергию посредством фотовольтаического эффекта [2-4]. Для качественной работы кремниевых солнечных элементов температурное состояние их кристаллической решетки имеет очень важное значение, т. к. при перегреве происходят необратимые процессы. Например, значительное падение

коэффициента преобразования, разрушение р-п перехода приемной поверхности солнечных панелей, и соответственно падение выработки электрической энергии и уменьшение надёжности работы оборудования всей генерирующей системы [5]. Для увеличения выходных характеристик и улучшения эффективности работы авторами представленной работы были предложена высококачественная система охлаждения кремниевых фотоэлектрических преобразователей [6]. Такая система требует для солнечных элементов высокой производительности охлаждения для обеспечения соответствующей рабочей температуры (около 25° С) и достижения высокой эффективности работы. В ходе работы было необходимо обеспечить рабочую среду для солнечного элемента, которая достигается при низкой температуре [7], т. к. избыточное тепло может отрицательно повлиять на эффективность работы солнечного элемента. Эффективность солнечного элемента падает с повышением температуры, поскольку повышенное тепло увеличивает электрическое сопротивление компонентов элемента, что, в свою очередь, снижает количество электрического тока, протекающего через них [8]. Кроме того, экстремальное тепло может нанести непоправимый вред элементу, вызывая трещины или деформацию. Система солнечных элементов требует высокой производительности охлаждения для обеспечения соответствующей рабочей температуры для достижения эффективности и хорошей производительности [9]. Необходимо обеспечить рабочую среду для солнечного элемента при низкой температуре, что может быть достигнуто с помощью устройств с высокоэффективными тепловыми характеристиками, в которых тепло передается от солнечного элемента во внешнюю среду, что может происходить с использованием пульсирующих тепловых трубок [10]. В этой работе были предложены пульсирующие тепловые трубы с медными ребрами для адекватного охлаждения солнечных элементов [11]. Исследование показало, что пульсирующие тепловые трубы являются наиболее подходящим вариантом для охлаждения фотоэлектрического элемента, что приводит к повышению эффективности элемента и, таким образом, увеличивает выработку электроэнергии [12-14]. Охлаждение фотоэлектрического элемента может быть достигнуто многими

методами, первый тип – это пассивное охлаждение, которое повышает эффективность фотоэлектрического элемента, несмотря на множество недостатков, включая отсутствие рассеивания тепла при высоких температурах [15]. Второй тип технологии охлаждения — активное охлаждение, которое считается более эффективным методом. Он наиболее подходит с практической точки зрения и хорошо используется в системах охлаждения для фотоэлектрических элементов [16]. Пульсирующие тепловые трубы и системы с высоким тепловым потоком считаются более ценными в небольших устройствах, например, в электронных системах, где пульсирующие тепловые трубы (РНР) используются из-за их способности рассеивать тепло, и во многих системах, которые включают в себя сложную капиллярную трубку с минимальным внутренним диаметром. Они бывают двух основных типов: замкнутый контур и открытый контур. Конец капиллярной трубки с открытым контуром представляет собой трубку с открытым контуром, в то время как он соединен линиями с капиллярной трубкой с закрытым контуром [17].

Материалы и методы

В этом исследовании используется пульсирующая тепловая трубка, согласно данным [18]. Материализованная из кварца, внутренняя диаметр трубки составляет 4 мм. Состоящая из конденсатора (30 см), адиабатического (60 см) и испарителя (50 см), импульсная тепловая трубка имеет общую длину 150 сантиметров. Необходимо расположить панели в правильной ориентации, чтобы добиться равномерного солнечного облучения. [19] и другие исследователи отметили, что оптимальная производительность достигается при угле наклона от 20 до 40 градусов. Пиковый выход излучения наблюдался в диапазоне углов наклона 30 градусов [20]. Более того, пульсирующий теплопровод демонстрирует превосходные тепловые характеристики при коэффициенте заполнения 40%. В результате проведения работы были проведены исследования теплового сопротивления. В этом исследовании фотоэлектрические панели были смоделированы при угле наклона 30 градусов и коэффициенте заполнения 40% [21]. Помимо моделирования пульсирующего теплопровода на основе его

геометрии, крайне важно вычислить его эффективную теплопроводность. Таким образом, следующее уравнение представляет его эффективную теплопроводность:

$$G = A_C \times g_{PHP} = \frac{\Delta T}{\Delta V} = \frac{\Delta T}{\frac{L_{eff}}{K_{eff} A_C}} \quad (1)$$

Где эффективная длина РНР равна:

$$l_{eff} = \frac{\int_{L_e}^x (\int_0^x g' dx) dx + L_{ad} g_{c,max} + \int_{LC}^x (\int_{L_e+L_{ad}}^x g' dx) dx}{g_{c,max}} \quad (2)$$

Тепловое сопротивление пульсирующей тепловой трубы определяется разницей температур между конденсатором и испарителем. Была выявлена значимая корреляция, демонстрирующая связь между двумя частями. Эта корреляция используется для определения эффективности численного моделирования и теплопроводности в уравнении № 3. Тепловое сопротивление зависит от разности температур [22].

$$V = -0.0000053990(\Delta T)^3 + 0.001124605(\Delta T)^2 - 0.07636998(\Delta T) + 2.102284 \quad (3)$$

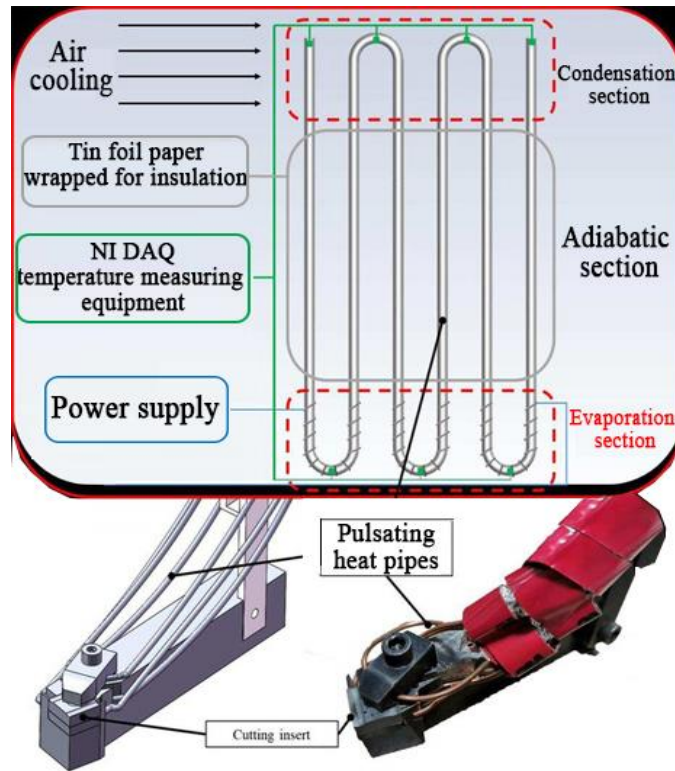
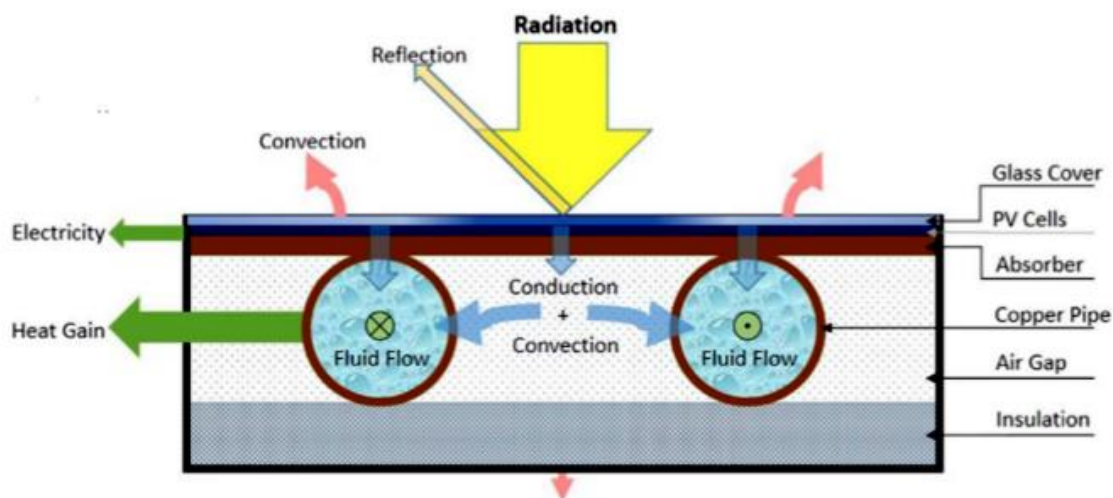
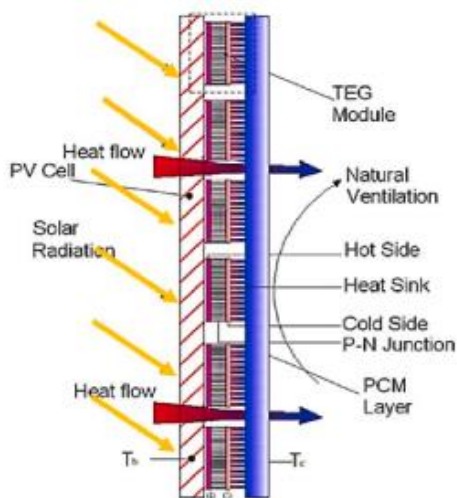


Рисунок 1. Представлена схема экспериментальной установки РНР.

Для определения температуры поверхности фотоэлектрических ячеек используется энергетический баланс [23]. Часть поглощенной энергии переносится посредством конвективного и лучистого теплообмена, как показано на рисунке 2. Напротив, оставшаяся часть работает на увеличение внутренней энергии фотоэлектрических ячеек и выработки электроэнергии [24,29].



(A)



(B)



(C)

Рисунок 2. Энергосбережение фотоэлектрических панелей.

Равновесная энергия фотоэлектрических панелей:

$$\rho C_P \delta \frac{dT_S}{dt} = g_s - g_{el} - g_h - g_r - g_{PNP} \quad (4)$$

где g_s , представляет собой количество полученной солнечной радиации, и определяется как:

$$g_s = \varepsilon_0 G_S \quad (5)$$

g_s представляет собой произведение солнечной интенсивности ε_0 и скорости поглощения энергии фотоэлектрической ячейкой. Энергия, вырабатываемая фотоэлектрической панелью за счет солнечного излучения, представлена символом g_{el} . в уравнении энергии (4). Используя уравнение (6), можно получить вырабатываемую электроэнергию [25].

$$g_{el} = \beta G_S \quad (6)$$

Эффективность фотоэлектрической панели обозначена как переменная g_{el} в приведенном выше уравнении, и ее эффективность зависит от температуры рабочей фотоэлектрической ячейки [26]. Связь между эффективностью и температурой поверхности солнечного элемента можно выразить следующим уравнением:

$$\beta = -0.1757 T_S + 21.737 \quad (7)$$

g_h и g_r обозначают перенос тепла в результате конвекции и излучения соответственно. g_h и g_r вычисляются с использованием уравнений (8) и (9) соответственно.

$$g_h = h_h(T_S - T_a) \quad (8)$$

$$g_r = 2\varepsilon_1 G_{sb}(T_S^4 - T_a^4) \quad (9)$$

В таблице 1 приведены технические характеристики фотоэлектрических панелей.

Мощность	6 W	Возможные отклонения	$\pm 5 \%$
Рабочее напряжение	18 V	Напряжение холостого хода	21,7 V
Рабочий ток	278 mA	Ток короткого замыкания	301 mA

Кремниевые монокристаллические фотоэлектрические элементы являются основным элементом фотоэлектрической панели, номинальные параметры: интенсивность излучения 1000 (Вт/м²), AM= 1,5, рабочая температура 298 К.

ε_1 представляет собой излучательную способность поверхностей фотоэлектрических панелей. Коэффициент конвективного теплообмена в уравнении (8) вычисляется с использованием уравнения (10)

$$\overline{Nu_L} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1.6}}{\left[1.0 + (0.4920 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (10)$$

Коэффициент конвективной теплопередачи на задней стороне фотоэлектрической панели был рассчитан по уравнению (10). Напротив, используя уравнение (11), вычисляется коэффициент конвективной теплопередачи в верхней части панели.

$$h_h = 2.8 + 3.8 u_{wind} \quad (11)$$

Как показано ниже, уравнение (4) можно переформулировать как дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial}{\partial t}(Ph) + \nabla \cdot (\vec{v}Ph) = \nabla \cdot (K\nabla T) + S_h \quad (12)$$

Температурная переменная определяется для каждого контрольного объема в этом исследовании посредством процесса разделения и интегрирования вышеупомянутого уравнения. При различных солнечных излучениях на первом этапе изучается температура фотоэлектрических панелей.

При моделировании была выбрана трехслойная фотоэлектрическая панель, включая стеклянное покрытие.

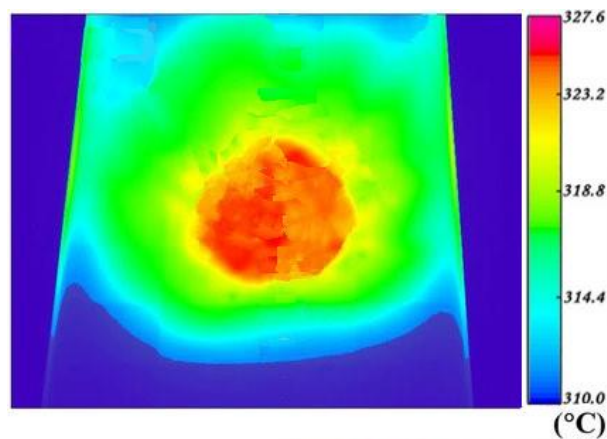


Рисунок 3. Иллюстрирует температурные контуры фотоэлектрических (PV) панелей, подверженных различным уровням солнечного излучения.

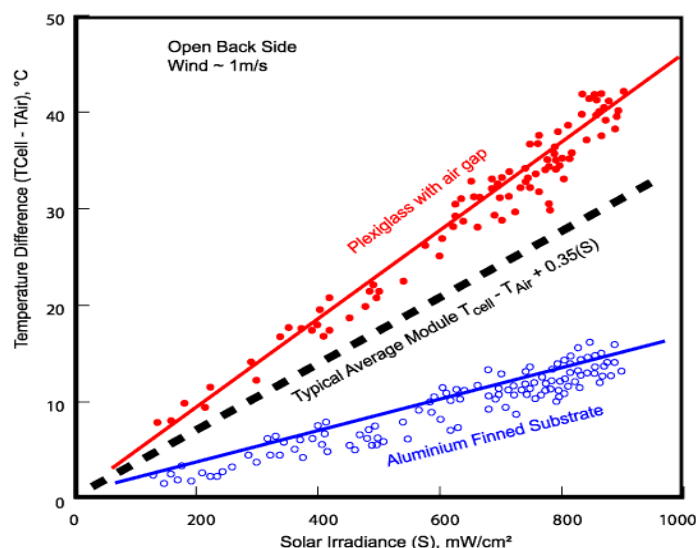


Рисунок 4. Представлен комплексный сравнительный анализ, сопоставляющий результаты настоящего исследования с результатами, полученными в ходе предыдущих исследований.

Фотоэлектрическая панель отличается толщиной 3,2 мм и наличием проводящих слоев на обеих поверхностях. Кроме того, панель имеет слой PVF, который выполняет функцию изоляции в ее основании. Величина толщины слоя PVF составляет 2 мм. В таблице 1 представлены размеры, электрические характеристики и рабочая температура панели.

Рисунок 3 иллюстрирует ожидаемые температурные контуры в области фотоэлектрической панели, соответствующие пяти различным уровням излучения [27]. В этой статье используется заданная температура окружающей среды 291 К. Данные представленные на рисунке 3 наглядно демонстрируют положительную корреляцию между повышенными температурами и повышенными уровнями солнечного излучения. Как показано на рисунке 4, смоделированные результаты проверяются путем сравнения с аналитическими и экспериментальными тестами. После проведения всестороннего анализа данных рисунка 4 становится очевидным, что ожидаемые результаты благоприятно согласуются с ранее установленными выводами, полученными как из аналитической модели [28], так и из экспериментального исследования [29,30]. Чтобы

изучить эффекты внедрения РНР (Phase Change Material Heat Pipe) в фотоэлектрических (PV) системах охлаждения, было создано геометрическое представление фотоэлектрической ячейки, интегрированной с пульсирующей тепловой трубой, которое впоследствии было разделено на сетчатую структуру. Рисунок 5 иллюстрирует трехмерные типы фотоэлектрической ячейки и конфигурацию сетки численного домена.

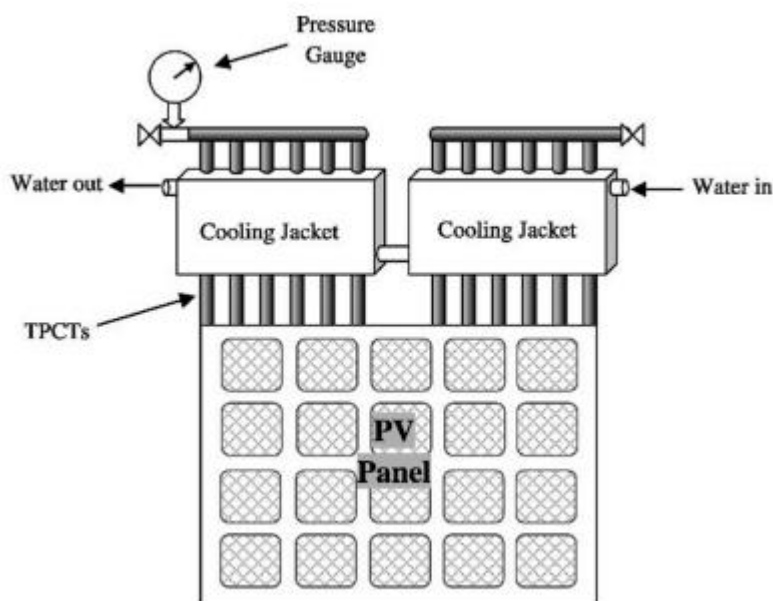


Рисунок 5. Показана трехмерная конфигурация и структура сетки фотоэлектрического элемента, включающего в себя систему теплового охлаждения

Целью данного исследования было исследование независимости сетки как средства оценки точности численного моделирования [31]. Исследование включало анализ температуры поверхности фотоэлектрических элементов с учетом различных размеров ячеек и уровней облучения. Исследование структуры сетки проводилось с использованием сетки, состоящей приблизительно из 2.300.000 элементов. Целью данного исследования является сравнение результатов или выводов исследования численного моделирования с наблюдаемой нечувствительностью к температуре фотоэлектрических панелей при различной плотности ячеек.

Результаты и обсуждение

Для оценки эффективности пульсирующей тепловой трубы в фотоэлектрическом охлаждении проводилось численное моделирование для переходных процессов. Тепловой поток учитывается в моделировании как 1×10^3 Вт/м², в то время как температура окружающей среды поддерживается на уровне 294 К. Предполагается, что температура конденсаторной секции пульсирующего теплопровода эквивалентна температуре окружающей среды. Кроме того, для облегчения сравнения выполняется дополнительное моделирование, в котором медная трубка используется в качестве ребра для увеличения охлаждающих возможностей фотоэлектрической панели. Сравнительный анализ ожидаемых результатов, полученных из упомянутых выше симуляций, показан на рис. 6. Результаты, представленные на этом рисунке, иллюстрируют, что применение фотоэлектрического охлаждения через пульсирующую тепловую трубку приводит к соответствующему снижению температуры пластины на 16,1 К, в отличие от медной трубки-ребра, где значения составляли 4,9 К. Результаты показывают, что внедрение пульсирующего теплопровода ПК в процессе охлаждения вызывает значительное снижение температуры, вызванное его повышенной тепловой эффективностью. Худший результат показывается в солнечных панелях с медным трубчатым ребром без использования метода охлаждения. Кроме того, исследования показали, что использование пульсирующего теплопровода вместо медного трубчатого ребра приводит к более короткому периоду, необходимому для достижения постоянной рабочей температуры, когда речь идет об охлаждении, например персональных компьютеров. На рисунке 7 показаны температурные ограничения, связанные с использованием пульсирующего теплопровода для охлаждения панелей. Самая высокая зарегистрированная температура на поверхности пластины составляет приблизительно 309,4 Кельвина, особенно вблизи краев пластины.

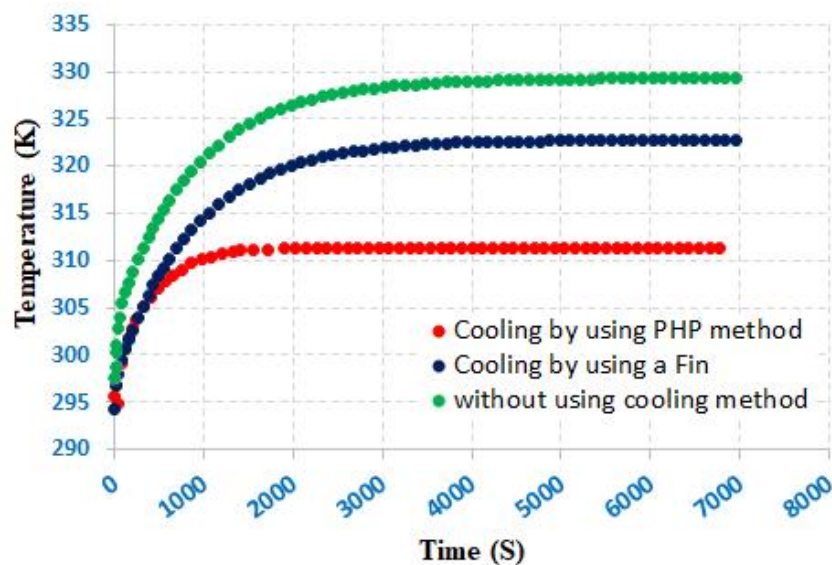


Рисунок 6. Показаны переходные средние температуры фотоэлектрических модулей при охлаждении медными ребрами и пульсирующей тепловой трубкой.

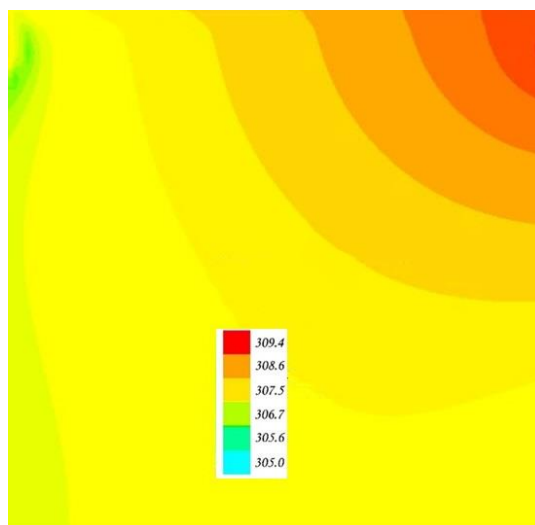


Рисунок 7. Асимметричное распределение фотоэлектрического элемента по отношению к солнечному излучению 1×10^3 (Вт/м²).

Вблизи пульсирующего теплопровода (теплового насоса Пельтье) минимальная температура пластины около 307,3 К учитывается при оценке эффективности системы охлаждения с пульсирующей тепловой трубкой в диапазоне условий окружающей среды. Для моделирования процесса охлаждения фотоэлектрических панелей к стенкам панелей применяются определенные граничные условия. Переходные вычисления выполняются для двух методов охлаждения, пульсирующей тепловой трубкой и

медными ребрами, для оценки их охлаждающей способности. Результаты моделирования для данного условия показаны на рисунке 8. Вертикальная ось на левой стороне отображает температуру на поверхности фотоэлектрического элемента, когда пластина подвергается охлаждению через пульсирующий теплопровод. Напротив, правая ось индикатора температуры фотоэлектрической пластины охлаждается медными ребрами.

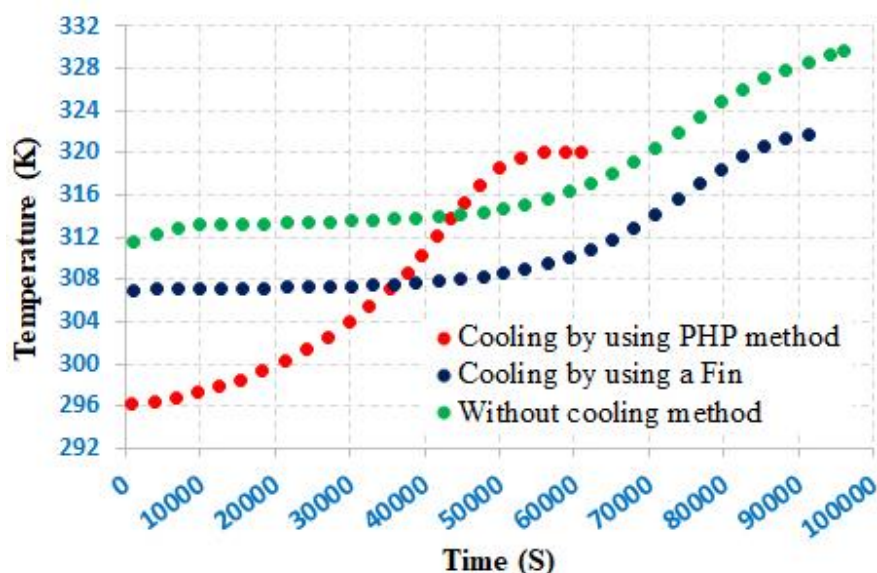


Рисунок 8. Показана переходная адиабатическая температура фотоэлектрической панели, когда медные ребра и пульсирующая тепловая трубка охлаждают ее.

Как показано на рис. 8, результаты показывают, что внедрение материала с изменяющейся фазой (PCM) во время процедуры охлаждения приводит к повышению эффективности охлаждения фотоэлектрической панели. Более того, эмпирические данные свидетельствуют о том, что температура фотоэлектрической панели не повышается значительно со временем, когда реализовано охлаждение пассивной тепловой трубкой (пульсирующая тепловая трубка). В области охлаждения медными ребрами имеет место очевидная тенденция к повышению температуры с течением времени. Результаты этого исследования показывают, что внедрение охлаждения пульсирующим теплопроводом более эффективно для облегчения передачи тепла, вырабатываемого через фотоэлектрический элемент, в жидкость. Чтобы оценить эффективность охлаждения пульсирующей тепловой трубкой (пульсирующей тепловой

трубкой) в различных сценариях, была проведена последовательность моделирования, включающая пять различных типов солнечного излучения. Различия в температуре, наблюдаемые в контексте солнечного охлаждения, в частности при использовании теплового насоса Пельтье (пульсирующий теплопровод) по сравнению с медной трубкой с эквивалентными диаметрами, показаны на рисунке 9. Рисунок 10 описывает повышение электрической эффективности за счет использования метода РНР.

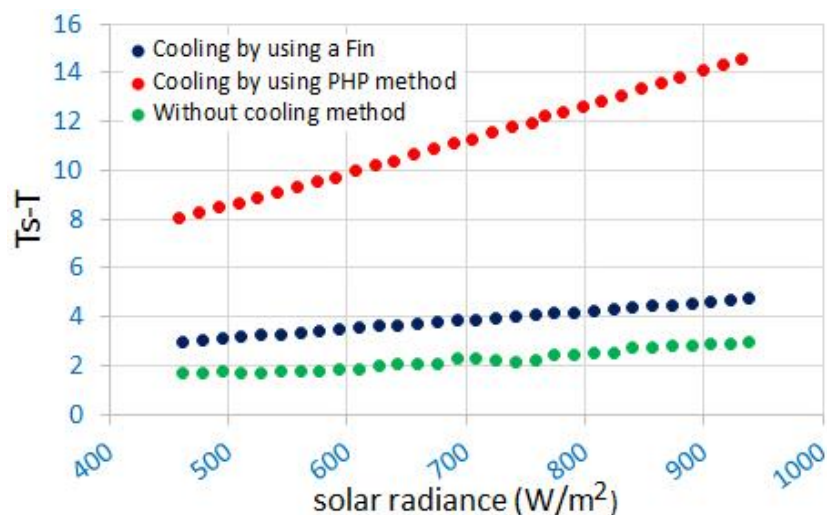


Рисунок 9. Перепад температур фотоэлектрической панели при изменении солнечного излучения, охлаждаемой пульсирующей тепловой трубкой и медным ребром

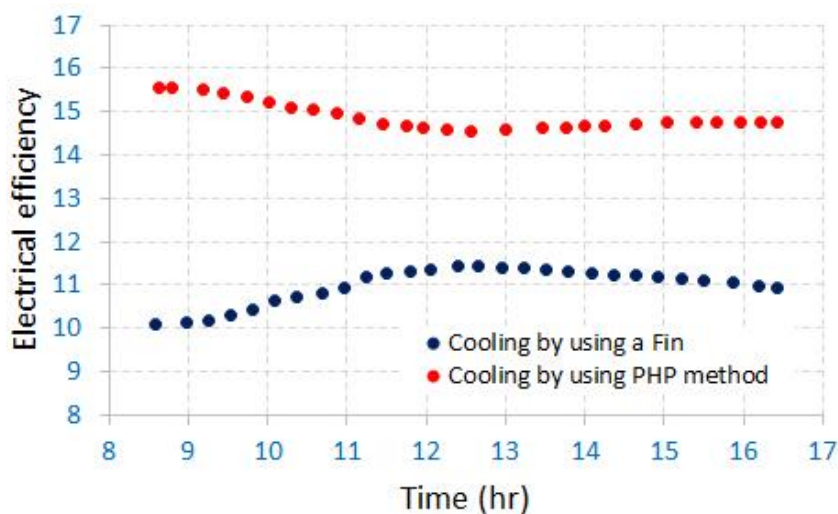


Рисунок 10. Сравнение электрической эффективности двух методов охлаждения фотоэлектрических систем.

Как видно на рисунке 11, кривая фототок-напряжение (I - V) может использоваться для описания производительности солнечных элементов.

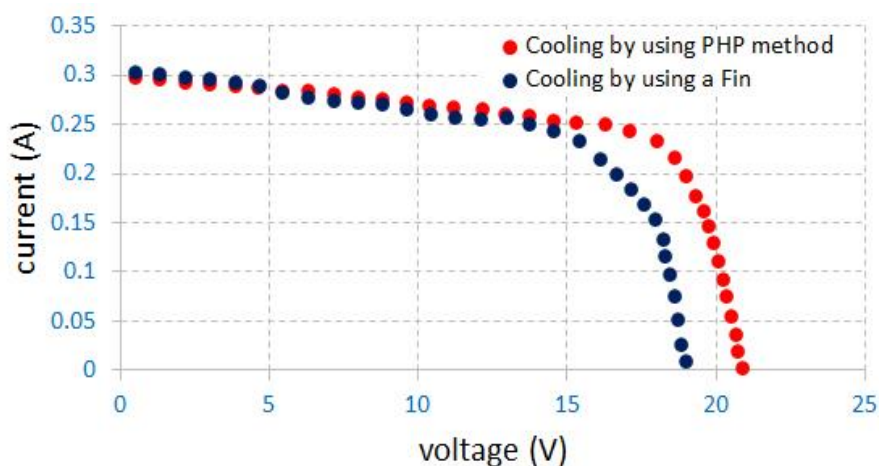


Рисунок 11. Сравнение кривых фототок-напряжение между двумя методами охлаждения фотоэлектрических систем.

При сравнении использования медной трубки с результатом охлаждения становится очевидным, что последнее создает значительно большую разницу температур. Кроме того, было продемонстрировано, что по мере увеличения уровней солнечного излучения отклонение разницы температур для обоих методов охлаждения увеличивается. Более высокие тепловые подводы, согласно данным, привели к повышению тепловой эффективности пульсирующей тепловой трубы. Коэффициент повышения температуры увеличивается за счет увеличения тепловой энергии, подаваемой в испарительную часть РНР через усиленную частоту мощности парового сплава. Кроме того, увеличение тепловой энергии может привести к образованию вихрей, которые быстро расширяются в режиме потока, тем самым вызывая повышение коэффициента теплопередачи. Корреляция между количеством вырабатываемой электроэнергии и температурой фотоэлектрической панели очевидна из уравнения (7), предполагая, что более низкие температуры соответствуют более значительной выработке электроэнергии. Таким образом, рисунок 12 иллюстрирует сравнительную

величину вырабатываемой электроэнергии в рассматриваемом случае. На основании данных, изображенных на рисунке 12, очевидно, что охлаждение пульсирующей тепловой трубы приводит к увеличению выходной мощности. В отличие от охлаждения с медными ребрами, которое демонстрирует увеличение выходной электрической мощности на 5,5%, при воздействии солнечного излучения мощностью 1000 Вт/м² охлаждение РНП демонстрирует увеличение на 20%.

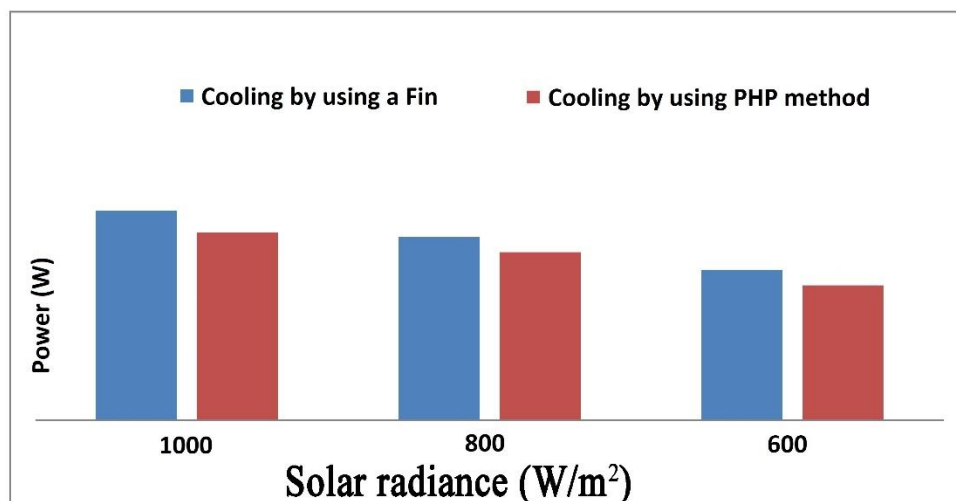


Рисунок 12. Показаны различные сценарии выработки электроэнергии.

Выводы

Понижение температуры рабочей поверхности кремниевого преобразователя способствует значительному увеличению его энергетических характеристик и повышению эффективности работы электрогенерирующей системы. В ходе работы было проведено комплексное исследование внедрения солнечного охлаждения с помощью одноконтурной импульсной тепловой трубы (пульсирующая тепловая труба). Определение тепловых характеристик фотоэлектрической панели зависит от двух факторов: оптимального угла наклона и коэффициента заполнения 40%. В работе было проведено численное исследование для определения температуры поверхности охлаждаемой фотоэлектрической панели, результаты, полученные в ходе этого исследования, демонстрируют удовлетворительную степень согласованности с

предыдущими исследованиями. Также было проведено моделирование для оценки функциональности фотоэлектрической панели, в которой использовалась пульсирующая вентиляция тепловой трубы. Результаты показывают, что введение прерывистого охлаждения тепловой трубы приводит к снижению температуры поверхности фотоэлектричества на 16,1 К. Металлическое медь-ребро, с другой стороны, эффективно снижает температуру всего на 4,9 К. Результаты этого исследования показывают, что пульсирующее охлаждение тепловой трубы демонстрирует превосходные возможности охлаждения по сравнению со сплошным медным ребром. Кроме того, при использовании пульсирующих тепловых труб для охлаждения фотоэлектрических панелей эффективность увеличивается за более короткий период времени, а процесс охлаждения ускоряется. Электроэнергия увеличивается на 20% при воздействии 1000 Вт/м² солнечного излучения из-за повышенной эффективности охлаждения пульсирующей тепловой трубы.

Список источников

1. Sharaf M., Yousef M.S., Huzayyin A.S. Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems // Environmental science and pollution research. 2022. V. 29 (18), P. 26131-26159. DOI: [10.1007/s11356-022-18719-9](https://doi.org/10.1007/s11356-022-18719-9)
2. Panda S., Gupta M., Panda B., Jena C., Nanda L., Pradhan A., Malvi C.S. A review on advanced cooling techniques for photovoltaic panel // Materials Today Proceedings. 2022. V. 62 (5), P. 6799-6803. DOI: [10.1016/j.matpr.2022.04.925](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.925)
3. Issa H.A., Abdali L.M., Velkin V.I. A stand-alone hybrid power system based on PV energy and hydrogen fuel cells with energy storage systems // MM Science Journal. 2024. DOI: [10.17973/MMSJ.2024_12_2024102](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2024_12_2024102)
4. Абдали Л.М., Исса Х.А., Аль-Малики М.Н., Кувшинов В.В., Бекиров Э.А. Исследование режимов работы комбинированных солнечно-ветровых установок для обеспечения уличного освещения // Строительство и техногенная безопасность. 2022. № 25 (77). С. 75-85.

5. Al-Maliki M.N., Soldan M., Issa H.A., Abdali L.M., Yakimovich B.A., Kobeticova H. The performance and advanced cooling techniques for photovoltaic solar panels // MM Science Journal. 2024. DOI: [10.17973/MMSJ.2024_11_2024055](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2024_11_2024055)
6. Siecker J., Kusakana K., Numbi E.B. A review of solar photovoltaic systems cooling technologies // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. V. 79, P. 192-203.
7. Liu H.D., Lin C.H., Pai K.J., Lin Y.L. A novel photovoltaic system control strategies for improving hill climbing algorithm efficiencies in consideration of radian and load effect // Energy Conversion and Management. 2018. V. 165, P. 815-826. DOI: [10.1016/j.enconman.2018.03.081](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.081)
8. Cheboxarov V.V. An Offshore Wind-Power-Based Water Desalination Complex as a Response to an Emergency in Water Supply to Northern Crimea // Applied Solar Energy. 2019. V. 55, No. 4. P. 260-264. URL: <https://doi.org/10.3103/S0003701X19040030>
9. Chandel S.S., Agarwal T. Review of cooling techniques using phase change materials for enhancing efficiency of photovoltaic power systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. V. 73, P. 1342-1351. DOI: [10.1016/j.rser.2017.02.001](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.001)
10. Исса Х.А., Абдали Л.М., Якимович Б.А., Кувшинов В.В., Морозова Н.В., Федотикова М.В. Сравнение эффективности различных методов управления энергетическими параметрами фотоэлектрических систем // Труды МАИ. 2023. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171405>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-17](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-17)
11. Alktranee M., Bencs P. Experimental comparative study on using different cooling techniques with photovoltaic modules // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2023. V. 148 (9), P. 3805-3817.
12. Абдали Л.М., Аль-Малики М.Н., Али К.А., Якимович Б.А., Коровкин Н.В., Кувшинов В.В., Соломенникова С.И. Использование гибридных ветро-солнечных систем для энергоснабжения города Аль-Наджаф в Республике Ирак // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 3. С. 82-91. DOI: [10.22213/2413-1172-2022-3-82-91](https://doi.org/10.22213/2413-1172-2022-3-82-91)

13. Ahmed Mohammed H., Anssari M.O.H. Electricity generation by using a hybrid system (photovoltaic and fuel cell) // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019. No. 14. P. 4414-4418. DOI: [10.3923/jeasci.2019.4414.4418](https://doi.org/10.3923/jeasci.2019.4414.4418)
14. Ismail B., Taib S., Saad A.R.M. et al. Development of a single phase SPWM microcontroller-based inverter // Power and Energy Conference, PECon '06, IEEE International. 2006. P. 437–440. DOI: [10.1109/PECON.2006.346691](https://doi.org/10.1109/PECON.2006.346691)
15. Layth M. Abd Ali, L.M. Ali, Q.A., Klačková I., Issa H.A., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. Developing a thermal design for steam power plants by using concentrating solar power technologies for a clean environment // Acta Montanistica Slovaca. 2021. V. 26 (4), P. 773-783. DOI: [10.46544/AMS.v26i4.14](https://doi.org/10.46544/AMS.v26i4.14)
16. Jiang L.L., Maskell D.L., Patra J.C. A novel ant colony optimization-based maximum power point tracking for photovoltaic systems under partially shaded conditions // Energy Build. 2013. V. 58, P. 227–236. DOI: [10.1016/j.enbuild.2012.12.001](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.001)
17. Abd Ali L.M., Al-Rufae F.M., Kuvshinov V.V. et al. Study of Hybrid Wind—Solar Systems for the Iraq Energy Complex // Applied Solar Energy. 2020. V. 56, No. 4. P. 284–290. DOI: [10.3103/S0003701X20040027](https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027)
18. Koohestani S.S., Nižetić S., Santamouris M. Comparative review and evaluation of state-of-the-art photovoltaic cooling technologies // Journal of Cleaner Production. 2023. V. 406, P. 136953. DOI: [10.1016/j.jclepro.2023.136953](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136953)
19. Gharzi M., Arabhosseini A., Gholami Z., Rahmati M.H. Progressive cooling technologies of photovoltaic and concentrated photovoltaic modules: A review of fundamentals, thermal aspects, nanotechnology utilization and enhancing performance // Solar energy. 2020. V. 211, P. 117-146. DOI: [10.1016/j.solener.2020.09.048](https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.048)
20. Pathak S.K., Sharma P.O., Goel V., Bhattacharyya S., Aybar H.Ş., Meyer J.P. A detailed review on the performance of photovoltaic/thermal system using various cooling methods // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. V. 51, P. 101844. DOI: [10.1016/j.seta.2021.101844](https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101844)

21. B. Sanjay Gandhi, S. Sam Chelladurai, Dr. D. Senthil Kumaran. Process Optimization for Biodiesel Synthesis from Jatropha Curcas Oil // Distributed Generation and Alternative Energy Journal. 2011. V. 23, No. 4, P. 6-16. DOI: [10.1080/21563306.2011.10462201](https://doi.org/10.1080/21563306.2011.10462201)
22. Тепликова В.И., Сенцов А.А., Ненашев В.А., Поляков В.Б. Анализ диаграммы направленности плоской многоэлементной активной фазированной антенной решетки // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168189>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-17](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-17)
23. Абдали Л.М.А., Аль-Малики М.Н.К., Аль Баирмани А.Г. и др. Анализ методов управления производительностью преобразователей постоянного тока солнечных элементов и выбор оптимального метода // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 1. С. 125-137. DOI: [10.22213/2410-9304-2023-1-125-137](https://doi.org/10.22213/2410-9304-2023-1-125-137)
24. Ибрагимов Д.Н., Берендакова А.В. Метод построения и оценивания асимптотических множеств управляемости двумерных линейных дискретных систем с ограниченным управлением // Труды МАИ. 2022. № 126. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=169003>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-17](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-17)
25. Ghadikolaei S.S.C. Solar photovoltaic cells performance improvement by cooling technology: An overall review // International journal of hydrogen energy. 2021. V. 46 (18), P. 10939-10972.
26. King D.L. Photovoltaic Module and Array Performance Characterization Methods for All System Operating Conditions // AIP Conference Proceedings. 1997. V. 394, P. 347–368. DOI: [10.1063/1.52852](https://doi.org/10.1063/1.52852)
27. Himri Y., Malik A.S., Stambouli A.B. et al. Review and use of the Algerian renewable energy for sustainable development // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. V. 13, P. 1584–1591. DOI: [10.1016/j.rser.2008.09.007](https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.007)
28. Абдали Л.М., Якимович Б.А., Сяктерева В.В., Кувшинов В.В., Морозова Н.В. Оптимизация системы автоматического управления точкой максимальной мощности для ветро-солнечной генерирующей установки с накопителями энергии // Труды МАИ.

2023. № 129. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=173037>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-24](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-24)

29. Ali H.M. Recent advancements in PV cooling and efficiency enhancement integrating phase change materials based systems – A comprehensive review // *Solar Energy*. 2020. V. 197, P.163-198. DOI: [10.1016/j.solener.2019.11.075](https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.075)

30. Волков А.С. Разработка имитационной модели канала с группирующимися ошибками // Труды МАИ. 2023. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171396>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-12](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-12)

31. Соколов Н.Л. Анализ комбинированных способов формирования орбит искусственного спутника планет // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=69701>

References

1. Sharaf M., Yousef M.S., Huzayyin A.S. Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systemsю *Environmental science and pollution research*. 2022. V. 29 (18), P. 26131-26159. DOI: [10.1007/s11356-022-18719-9](https://doi.org/10.1007/s11356-022-18719-9)

2. Panda S., Gupta M., Panda B., Jena C., Nanda L., Pradhan A., Malvi C.S. A review on advanced cooling techniques for photovoltaic panel. *Materials Today Proceedings*. 2022. V. 62 (5), P. 6799-6803. DOI: [10.1016/j.matpr.2022.04.925](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.925)

3. Issa H.A., Abdali L.M., Velkin V.I. A stand-alone hybrid power system based on PV energy and hydrogen fuel cells with energy storage systems. *MM Science Journal*. 2024. DOI: [10.17973/MMSJ.2024_12_2024102](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2024_12_2024102)

4. Abdali L.M., Issa Kh.A., Al'-Maliki M.N., Kuvshinov V.V., Bekirov E.A. Design and study of operating modes of combined solar Wind installations to provide street lighting. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'*. 2022. No. 25 (77). P. 75-85. (In Russ.)

5. Al–Maliki M.N., Soldan M., Issa H.A., Abdali L.M., Yakimovich B.A., Kobeticova H. The performance and advanced cooling techniques for photovoltaic solar panels. *MM Science Journal*. 2024. DOI: [10.17973/MMSJ.2024_11_2024055](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2024_11_2024055)

6. Siecker J., Kusakana K., Numbi E.B. A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. V. 79, P. 192-203.
7. Liu H.D., Lin C.H., Pai K.J., Lin Y.L. A novel photovoltaic system control strategies for improving hill climbing algorithm efficiencies in consideration of radian and load effect. *Energy Conversion and Management*. 2018. V. 165, P. 815-826. DOI: [10.1016/j.enconman.2018.03.081](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.081)
8. Cheboxarov V.V. An Offshore Wind-Power-Based Water Desalination Complex as a Response to an Emergency in Water Supply to Northern Crimea. *Applied Solar Energy*. 2019. V. 55, No. 4. P. 260-264. URL: <https://doi.org/10.3103/S0003701X19040030>
9. Chandel S.S., Agarwal T. Review of cooling techniques using phase change materials for enhancing efficiency of photovoltaic power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. V. 73, P. 1342-1351. DOI: [10.1016/j.rser.2017.02.001](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.001)
10. Issa Kh.A., Abdali L.M., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., Morozova N.V., Fedotikova M.V. Comparison of the effectiveness of various methods for controlling the energy parameters of photovoltaic systems. *Trudy MAI*. 2023. No. 128. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171405>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-17](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-17)
11. Alktranee M., Bencs P. Experimental comparative study on using different cooling techniques with photovoltaic modules. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023. V. 148 (9), P. 3805-3817.
12. Abdali L.M., Al'-Maliki M.N., Ali K.A., Yakimovich B.A., Korovkin N.V., Kuvshinov V.V., Solomennikova S.I. Using hybrid wind-solar power systems for the al-najaf city in Iraq. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. 2022. V. 25, No 3. P. 82-91. (In Russ.). DOI: [10.22213/2413-1172-2022-3-82-91](https://doi.org/10.22213/2413-1172-2022-3-82-91)
13. Ahmed Mohammed H., Anssari M.O.H. Electricity generation by using a hybrid system (photovoltaic and fuel cell). *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. No. 14. P. 4414-4418. DOI: [10.3923/jeasci.2019.4414.4418](https://doi.org/10.3923/jeasci.2019.4414.4418)

14. Ismail B., Taib S., Saad A.R.M. et al. Development of a single phase SPWM microcontroller-based inverter. *Power and Energy Conference, PECon '06*, IEEE International. 2006. P. 437–440. DOI: [10.1109/PECON.2006.346691](https://doi.org/10.1109/PECON.2006.346691)
15. Layth M. Abd Ali, L.M. Ali, Q.A., Klačková I., Issa H.A., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. Developing a thermal design for steam power plants by using concentrating solar power technologies for a clean environment. *Acta Montanistica Slovaca*. 2021. V. 26 (4), P. 773–783. DOI: [10.46544/AMS.v26i4.14](https://doi.org/10.46544/AMS.v26i4.14)
16. Jiang L.L., Maskell D.L., Patra J.C. A novel ant colony optimization-based maximum power point tracking for photovoltaic systems under partially shaded conditions. *Energy Build.* 2013. V. 58, P. 227–236. DOI: [10.1016/j.enbuild.2012.12.001](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.001)
17. Abd Ali L.M., Al-Rufae F.M., Kuvshinov V.V. et al. Study of Hybrid Wind—Solar Systems for the Iraq Energy Complex. *Applied Solar Energy*. 2020. V. 56, No. 4. P. 284–290. DOI: [10.3103/S0003701X20040027](https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027)
18. Koohestani S.S., Nižetić S., Santamouris M. Comparative review and evaluation of state-of-the-art photovoltaic cooling technologies. *Journal of Cleaner Production*. 2023. V. 406, P. 136953. DOI: [10.1016/j.jclepro.2023.136953](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136953)
19. Gharzi M., Arabhosseini A., Gholami Z., Rahmati M.H. Progressive cooling technologies of photovoltaic and concentrated photovoltaic modules: A review of fundamentals, thermal aspects, nanotechnology utilization and enhancing performance. *Solar energy*. 2020. V. 211, P. 117–146. DOI: [10.1016/j.solener.2020.09.048](https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.048)
20. Pathak S.K., Sharma P.O., Goel V., Bhattacharyya S., Aybar H.Ş., Meyer J.P. A detailed review on the performance of photovoltaic/thermal system using various cooling methods. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. V. 51, P. 101844. DOI: [10.1016/j.seta.2021.101844](https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101844)
21. B. Sanjay Gandhi, S. Sam Chelladurai, Dr. D. Senthil Kumaran. Process Optimization for Biodiesel Synthesis from Jatropha Curcas Oil. *Distributed Generation and Alternative Energy Journal*. 2011. V. 23, No. 4, P. 6–16. DOI: [10.1080/21563306.2011.10462201](https://doi.org/10.1080/21563306.2011.10462201)

22. Teplikova V.I., Sentsov A.A., Nenashev V.A., Polyakov V.B. Analysis of the direction pattern of a flat multi-element active phased array. *Trudy MAI*. 2022. No. 125. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168189>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-17](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-17)
23. Abdali L.M.A., Al'-Maliki M.N.K., Al' Bairmani A.G. et al. Analysis and selection of the optimal performance control method for solar cell dc converters. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023. V. 21, No. 1. P. 125-137. (In Russ.). DOI: [10.22213/2410-9304-2023-1-125-137](https://doi.org/10.22213/2410-9304-2023-1-125-137)
24. Ibragimov D.N., Berendakova A.V. Method of constructing and estimating asymptotic controllability sets of two-dimensional linear discrete systems with limited control. *Trudy MAI*. 2022. No. 126. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=169003>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-17](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-17)
25. Ghadikolaei S.S.C. Solar photovoltaic cells performance improvement by cooling technology: An overall review. *International journal of hydrogen energy*. 2021. V. 46 (18), P. 10939-10972.
26. King D.L. Photovoltaic Module and Array Performance Characterization Methods for All System Operating Conditions. *AIP Conference Proceedings*. 1997. V. 394, P. 347–368. DOI: [10.1063/1.52852](https://doi.org/10.1063/1.52852)
27. Himri Y., Malik A.S., Stambouli A.B. et al. Review and use of the Algerian renewable energy for sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. V. 13, P. 1584–1591. DOI: [10.1016/j.rser.2008.09.007](https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.007)
28. Abdali L.M., Yakimovich B.A., Syaktereva V.V., Kuvshinov V.V., Morozova N.V. Optimization of the automatic control system for the maximum power point for a wind-solar generating plant with energy storage. *Trudy MAI*. 2023. No. 129. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=173037>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-24](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-24)
29. Ali H.M. Recent advancements in PV cooling and efficiency enhancement integrating phase change materials based systems – A comprehensive review. *Solar Energy*. 2020. V. 197, P.163-198. DOI: [10.1016/j.solener.2019.11.075](https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.075)

30. Volkov A.S. The development of simulation model of channel with burst error arrays. *Trudy MAI*. 2023. No. 128. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171396>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-12](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-12)
31. Sokolov N.L. The analysis of combined methods of artificial satellite orbit formation. *Trudy MAI*. 2016. No. 87. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=69701>

Статья поступила в редакцию 21.02.2025

Одобрена после рецензирования 24.02.2025

Принята к публикации 25.04.2025

The article was submitted on 21.02.2025; approved after reviewing on 24.02.2025; accepted for publication on 25.04.2025