

# ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

## NUCLEAR, RADIATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY

УДК 620.91: 620.92

<https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-02>

EDN HJLZIN



### Сравнительный эксперимент по оценке эффективности водяного охлаждения фотоэлектрических модулей в климатических условиях Юга России

В.Г. Ильичев<sup>1</sup> , Л.Х. Зайнутдинова<sup>1</sup> , Е.И. Теруков<sup>2</sup> , М.Ю. Михайлов<sup>2</sup><sup>1</sup>Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева, г. Астрахань, Россия<sup>2</sup>ООО «Научно-технический центр тонкопленочных технологий в энергетике»,

г. Санкт-Петербург, Россия

Lzain@mail.ru

**Аннотация.** Проблемам обеспечения безопасности эксплуатации атомных станций всегда уделяется повышенное внимание. В дополнение к автономным дизель-генераторным установкам, используемым для поддержания работы систем безопасности при потере внешнего энергоснабжения, на настоящем этапе целесообразно также рассмотреть применение более экологических автономных фотоэлектрических установок. Целью работы является проведение сравнительного экспериментального исследования эффективности водяного охлаждения в реальных естественных климатических условиях Юга России, когда охлаждаемый и неохлаждаемый фотоэлектрические модули одновременно находятся под воздействием комплекса переменчивых погодных факторов: солнечной радиации, облачности, ветра, давления, температуры и влажности окружающей среды, при этом оба модуля имеют нагрузки, подключенные через МРРТ контроллеры. Исследовано влияние водяного охлаждения на энергетическую эффективность фотоэлектрических модулей, собранных из кремниевых гетероструктурных (НТ) солнечных ячеек. Солнечные панели были изготовлены из НТ ячеек толщиной 130 мкм, соединенных между собой по технологии контактирования SmartWire, которая уменьшает потери мощности из-за возникновения возможных дефектов, например, трещин. Выполнены условия по обеспечению наибольшей идентичности параметров охлаждаемого и неохлаждаемого модулей. Сравнительное экспериментальное исследование проведено на площадке Астраханского государственного университета с использованием системы долгосрочного мониторинга характеристик фотоэлектрических модулей - тестовой фотоэлектрической системы (ТФЭС), построенной на базе электронного регистратора «Параграф PL2». Установлено значительное повышение выработки модуля при работе с охлаждением. При инсоляции 987,5 Вт/м<sup>2</sup> мощность, вырабатываемая охлаждаемым модулем, составляла 93,0297 Вт, в то время как мощность модуля без охлаждения была равна 79,306 Вт. Разница составила 13,7237 Вт. Мощность возросла на 17%. В проведенном эксперименте среднее значение КПД при охлаждении модуля составило 0,15977, при отсутствии охлаждения 0,13764. Коэффициент полезного действия повысился на 2,21 %. Такое повышение является существенным. Полученные результаты подтверждают достаточно высокую эффективность водяного охлаждения фотоэлектрических модулей в реальных естественных условиях работы для регионов с высокими температурами окружающей среды, в частности для Юга России.

**Ключевые слова:** фотоэлектрический модуль, водяное охлаждение, кремниевые гетероструктурные солнечные ячейки, сравнительный эксперимент, тестовая фотоэлектрическая система, энергоэффективность.

**Для цитирования:** Ильичев В.Г., Зайнутдинова Л.Х., Теруков Е.И., Михайлов М.Ю. Сравнительный эксперимент по оценке эффективности водяного охлаждения фотоэлектрических модулей в климатических условиях Юга России. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(4):11–21. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-02>

**For citation:** Ilyichev V.G., Zaynutdinova L.Kh., Terukov E.I., Mikhailov M.Yu. Comparative experiment on the efficiency of water cooling in photovoltaic modules in the climatic conditions of Southern Russia. *Global nuclear safety*. 2023;13(4):11–21 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-02>

### Comparative experiment on the efficiency of water cooling in photovoltaic modules in the climatic conditions of Southern Russia

Vladimir G. Ilyichev<sup>1</sup> , Larisa Kh. Zaynutdinova<sup>1</sup> , Evgenii I. Terukov<sup>2</sup> ,  
Mikhail Yu. Mikhailov<sup>2</sup><sup>1</sup>Astrakhan Tatishchev State University, Astrakhan, Russian Federation<sup>2</sup>R&D Center of Thin Film Technologies in Energetics, St. Petersburg, Russian Federation.

Lzain@mail.ru

**Abstract.** The problems of ensuring the safety of operation of nuclear power plants are always paid increased attention. In addition to the self-contained diesel generator sets used to maintain the operation of safety systems in case of loss of external power supply, it is also advisable to consider the use of more environmentally friendly self-contained photovoltaic units at this stage. The work is aimed at a comparative experimental study of the efficiency of water cooling in real natural climatic conditions of Southern Russia. In this experiment, cooled and uncooled photovoltaic modules are simultaneously exposed to a complex of variable weather factors: solar radiation, cloudiness, wind, pressure, temperature and humidity of the environment. Both modules have loads connected via MPPT controllers. The effect of water cooling on the energy efficiency of photovoltaic modules assembled from silicon heterojunction technology (HJT) solar cells was studied. The solar panels were made from 130 micron thick HJT cells interconnected using SmartWire contact technology. It reduces power loss due to possible defects such as cracks. The conditions for ensuring the highest degree of similarity between the parameters of the cooled and uncooled modules have been met. A comparative experimental study was conducted in Astrakhan State University using a long-term monitoring system for the characteristics of photovoltaic modules. This is a test photovoltaic system (TPS), built on the basis of the Paragraph PL2 electronic recorder. A significant increase in module output when working with cooling was established. At insolation of 987.5 W/m<sup>2</sup>, the power generated by the cooled module was 93.0297 W, while the power of the module without cooling was 79.306 W. The difference comprised 13.7237 watts. Power increased by 17%. In the experiment, the average efficiency value when the module was cooled was 0.15977. When uncooled, it was 0.13764. The efficiency intensified by 2.21%. This increase is significant. The results obtained confirm the fairly high efficiency of water cooling in photovoltaic modules in real natural operating conditions for regions with high ambient temperatures, Southern Russia, in particular.

**Keywords:** photovoltaic module, water cooling, silicon heterojunction solar cells, comparative experiment, test photovoltaic system, energy efficiency.

## Введение

Солнечная энергия является одним из важных видов возобновляемых источников энергии, который привлекает к работе многих исследователей по всему миру. Одной из наиболее распространенных технологий является использование фотоэлектрических систем (сетевых и автономных), преобразующих солнечный свет в полезную электрическую энергию. Этот тип технологии возобновляемых источников энергии не загрязняет окружающую среду во время эксплуатации, уменьшает проблемы глобального потепления, снижает эксплуатационные расходы и обеспечивает минимальное техническое обслуживание. Автономные фотоэлектрические системы вполне могут дополнять автономные дизель-генераторные установки, используемые для поддержания работы систем безопасности атомных станций при потере внешнего энергоснабжения. Помимо преимуществ у фотоэлектрической технологии есть недостаток, заключающийся в зависимости выработки электроэнергии от погодных факторов, таких как влияние града, снега, пыли, ветра, температуры и влажности окружающей среды. Производительность фотоэлемента особенно чувствительна к температуре поверхности ячейки, которая зависит как от ряда погодных факторов, так и от материала и структуры ячейки [1, 2]. Большая зависимость выработки электроэнергии от погодных факторов и снижение КПД с ростом температуры отмечается также в работах [3-5].

Важным фактором работы солнечных элементов является их температурный режим. Обычно в качестве номинальной для работы солнечного элемента принимается температура +25°C. При нагреве элемента на один градус выше +25°C он теряет примерно 0,4 % процента напряжения на каждый градус. В летний солнечный день элементы могут нагреваться до 60-70°C.

Солнечные элементы имеют ограниченный КПД – это означает, что они не в состоянии преобразовать всю полученную энергию в электричество; оставшаяся энергия при этом преобразуется в тепло. Повышенная

температура вызывает уменьшение ширины запрещенной зоны полупроводника, т. е. с ростом температуры ширина зоны уменьшается, и ток насыщения увеличивается из-за меньшей энергии, необходимой для образования электронно-дырочных пар. При этом ток короткого замыкания увеличивается незначительно, в то время как напряжение холостого хода уменьшается в большей степени, что и приводит к заметному уменьшению доступного максимума мощности<sup>1</sup>.

В ряде исследований и, в том числе в работах И.М. Кирпичниковой [6], влияние температуры на значение выдаваемой солнечным элементом мощности<sup>2</sup> предлагается определять из выражения (1):

$$P_{C\theta} = P_0 (1 + \beta \Delta t) \quad (1)$$

где  $P_{C\theta}$  – мощность солнечного элемента, Вт;

$P_0$  – мощность солнечного элемента при температуре +25 °C, Вт;

$\beta$  – температурный коэффициент мощности, °C<sup>-1</sup>;

$\Delta t$  – приращение температуры, °C.

Температурные коэффициенты мощности для различных фотоэлектрических технологий изменяются от –0.2 до –0.4 % на 1 °C. Для солнечного элемента с температурным коэффициентом  $\beta \approx -0.4 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ . при возрастании температуры ячейки до +50°C произойдет снижение выходной мощности на 10%. В летний солнечный день в условиях Юга России солнечные элементы могут нагреваться до 60-70°C и выше. В этих условиях наблюдается существенное снижение коэффициента полезного действия (КПД). Соответственно, проблема научного обоснования и практической реализации систем охлаждения фотоэлектрических модулей, работающих в климатических условиях

<sup>1</sup> The effect of temperature on solar panel performance [Электронный ресурс]. – Solar calculate. – Режим доступа: <https://solarcalculator.com.au/solar-panel-temperature> (дата обращения: 15.07.2023).

<sup>2</sup> Там же.

Юга России, с целью повышения их энергоэффективности является актуальной.

#### **Методы охлаждения фотоэлектрических модулей**

Принято выделять две группы методов охлаждения фотоэлектрических модулей: активное и пассивное охлаждение. Механизмы пассивного охлаждения относятся к технологиям, используемым для извлечения и/или минимизации поглощения тепла фотоэлектрической панелью без дополнительного энергопотребления. Активные системы потребляют электроэнергию, они используются в ситуациях, когда добавленная эффективность панелей превышает энергию, требуемую для питания системы. Активные системы охлаждения включают в себя отвод тепла с использованием таких устройств, как вентиляторы, устройства для нагнетания воздуха или подачи воды к панелям. Методы активного охлаждения, как правило, более эффективны, но более дорогостоящи.

Как для пассивных, так и для активных систем охлаждения обычно используются охлаждающие среды – воздух и вода. Воздушное охлаждение плохо подходит для извлечения тепловой энергии из фотоэлектрического модуля в жарких регионах. Водяное охлаждение позволяет работать при гораздо более высоких температурах и позволяет более эффективно использовать рекуперацию отработанного тепла [7]. Следовательно, водяное охлаждение во многих случаях является более выгодным вариантом.

Известны различные варианты пассивного охлаждения, простейшие формы включают нанесение твердых частиц из металлов с высокой теплопроводностью, таких как алюминий и медь, или массив ребер или других экструдированных поверхностей для улучшения теплопередачи в окружающую среду. Более сложные системы предполагают использование материалов с фазовым переходом (PCM) и различных методов естественной циркуляции.

Один из методов пассивного охлаждения исследован учеными факультета электромеханики Технологического университета Багдада: «Влияние испарительного охлаждения в сочетании с теплоотводом на производительность фотоэлектрического модуля» [8]. Была использована решетка штыревых ребер в качестве теплоотвода вместе с влажной прокладкой из древесной ваты, служащей новой системой охлаждения фотоэлектрической панели. Система охлаждения была основана на концепции испарительного охлаждения и расширенной области теплопередачи. Использование радиатора с влажной прокладкой в качестве системы охлаждения позволило добиться улучшения среднесуточных выходных токов примерно на 15,9% и выходных напряжений примерно на 17,76%. Недостатком является усложнение конструкции и необходимость поддержания заданной влажности прокладки из древесной ваты.

Способ охлаждения фотоэлектрического модуля путем погружения в воду был рассмотрен Saurabh Mehrotra и др. [9]. Фотоэлектрический элемент, погруженный в воду, контролировался в реальных климатических условиях; температуру поверхности эле-

мента можно было регулировать в диапазоне от 31°C до 39°C. Однако, понятно, что такой подход не может быть рекомендован к широкому применению.

Y. Igwan и др. [10] провели эксперимент с водяным охлаждением в помещении. В качестве солнечного симулятора были установлены галогенные лампы на стальной раме. Лампы действуют как естественный солнечный свет. Для проведения эксперимента были выбраны четыре набора средней солнечной радиации на испытательной поверхности солнечного симулятора, измеренные как 413, 620, 821 и 1016 Вт/м<sup>2</sup>. В качестве нагнетателя охлаждающей жидкости был выбран водяной насос постоянного тока. Результаты эксперимента показали, что снижение рабочей температуры примерно на 5-23°C увеличивает выходную мощность фотоэлектрического модуля с механизмом водяного охлаждения на 9-22%. Согласно результатам, представленным авторами, водяное охлаждение оказывает наибольшее влияние на снижение рабочей температуры фотоэлемента и улучшает электрические характеристики фотоэлектрической панели. К сожалению, поскольку эксперимент был проведен в помещении, влияние ряда погодных факторов не рассматривалось.

Влияние водяного охлаждения на производительность фотоэлектрической панели было также исследовано авторами [11]. Целью этого исследования было прогнозирование распределения температуры по площади фотоэлектрических панелей при наличии и отсутствии водяного охлаждения. В системе водяного охлаждения вода течет по передней поверхности фотоэлектрической панели, чтобы снизить температуру фотоэлектрической панели. Результат этого исследования показал, что среднее значение распределения температуры фотоэлектрической панели без системы водяного охлаждения выше, чем с системой водяного охлаждения. Средняя температура фотоэлектрической панели без системы охлаждения составляет 50,68°C. Для системы водяного охлаждения с температурой воды на входе 20°C можно было снизить температуру фотоэлектрической панели на 15,63°C. Полученное распределение температуры по поверхности фотоэлектрической панели может быть полезным для дальнейших исследований.

Альберто Бенато и Анна Стоппато [12] экспериментировали с установкой, в которой система охлаждения оснащена 3 форсунками, характеризующимися углом распыления 90°. Работа при входном давлении 1,5 бар, которая остается активной в течение 30 с и отключается в течение 120 с, может снизить температуру модуля на 28°C и повысить эффективность модуля с 12,2% к 13,9%. Для имитации солнечного излучения над фотоэлектрическим модулем на расстоянии 1 м установлены две галогенные лампы мощностью 1000 Вт, светоотдачей 33000 люмен. Здесь также не рассматривалось влияние других погодных факторов.

Анализ известных работ показывает, что тренд на внедрение систем охлаждения фотоэлектрических модулей постепенно развивается. Для оценки эффективности систем охлаждения фотоэлектрических модулей необходимо выходить за рамки лабораторных

экспериментов в помещениях к экспериментам в реальных естественных условиях работы, когда фотоэлектрические модули находятся под воздействием комплекса переменчивых погодных факторов, а именно: солнечной радиации, облачности, пыли, ветра, давления, температуры и влажности окружающей среды.

Более того, на наш взгляд, при проектировании систем охлаждения фотоэлектрических модулей надо также принимать во внимание изменение температуры солнечной ячейки в зависимости от тока нагрузки. Согласно исследованиям, проведенным авторами настоящей статьи [13], при подключении к фотоэлектрическому модулю нагрузки, соответствующей точке максимальной мощности, в дневное время суток наблюдалось возрастание температура тыльной стороны модуля на 10 градусов.

Цель настоящего исследования – проведение сравнительного экспериментального исследования эффективности водяного охлаждения в реальных естественных климатических условиях Юга России, когда охлаждаемый и неохлаждаемый фотоэлектрические модули одновременно находятся под воздействием комплекса переменчивых погодных факторов: солнечной радиации, облачности, ветра, давления, температуры и влажности окружающей среды, при этом оба модуля имеют нагрузки, подключенные через MPPT контроллеры. Как известно, такие контроллеры используют технологию поиска точки максимальной мощности (MPPT) и повсеместно применяются на действующих солнечных электростанциях.

#### Организация и методика проведения эксперимента

С целью повышения достоверности оценки влияния водяного охлаждения на энергетическую эффективность фотоэлектрических модулей в данной работе были выполнены условия по обеспечению наибольшей идентичности параметров охлаждаемого и неохлаждаемого модулей.

Данная работа посвящена исследованию влияния водяного охлаждения на энергетическую эффективность фотоэлектрических модулей, собранных из кремниевых гетероструктурных (НТ) солнечных ячеек. Солнечные панели были изготовлены из НТ ячеек

толщиной 130 мкм, соединенных между собой по технологии контактирования SmartWire, которая уменьшает потери мощности из-за возникновения возможных дефектов, например, трещин [14]. Материалы, используемые при сборке и конструктивные параметры фотоэлектрических модулей приведены в таблице 1.

Идентичность испытуемых фотоэлектрических модулей проверялась путем сравнения изображений электролюминесценции, позволяющих визуализировать возможные повреждения в модуле. Измерения электролюминесценции осуществлялись на установке SolarModule EL-lab. Полученные изображения приведены на рисунке 1.

Представленные изображения электролюминесценции свидетельствуют об отсутствии повреждений рассматриваемых фотоэлектрических модулей.

Идентичность испытуемых фотоэлектрических модулей также проверялась путем сравнений вольт-амперных характеристик модулей. Для измерения вольт-амперных характеристик использовался иммитатор солнечного излучения CetisPV-Moduletest3 компании h.a.l.m. elektronik GmbH. Основные параметры вольт-амперных характеристик приведены в таблице 2 с общепринятыми обозначениями:  $I_{sc}$  – ток короткого замыкания;  $U_{oc}$  – напряжение холостого хода;  $I_{mpp}$ ,  $U_{mpp}$ ,  $P_{mpp}$  – соответственно, ток, напряжение и мощность в точке максимальной мощности; FF – коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики (BAX) солнечного элемента.

Приведенные в таблице 2 характеристики были получены при стандартном значении инсоляции  $1000 \text{ Вт/м}^2$  в условиях лабораторного эксперимента. Сведения, приведенные в таблице 2 свидетельствуют о достаточной идентичности вольт-амперных характеристик рассматриваемых фотоэлектрических модулей.

Также была проведена проверка идентичности характеристик модулей в реальных условиях. 2 июня 2023 г. было проведено снятие вольт-амперных характеристик в условиях естественной освещенности на крыше Учебного корпуса Астраханского государственного университета.

Таблица 1. Конструкция фотоэлектрических модулей

Table 1. Architecture of photovoltaic modules

Наименование модуля	Количество ячеек	Размер стекла, мм	Размер ФЭМ, мм	Тип ФЭМ	Фронтальное стекло	Инкапсулянт	Ячейки	Тыльный лист
211116_1	4x5	870x677	878x675	стекло-тыльный лист	3,2мм с антиотражающим покрытием	несшиваемый инкапсулянт ТРО	5,77W (Q5) SWCT	тыльный защитный лист без алюминия
211116_2 охлаждаемый	4x5	870x677	878x675	стекло-тыльный лист	3,2мм с антиотражающим покрытием	несшиваемый инкапсулянт ТРО	5,77W (Q5) SWCT	тыльный защитный лист без алюминия

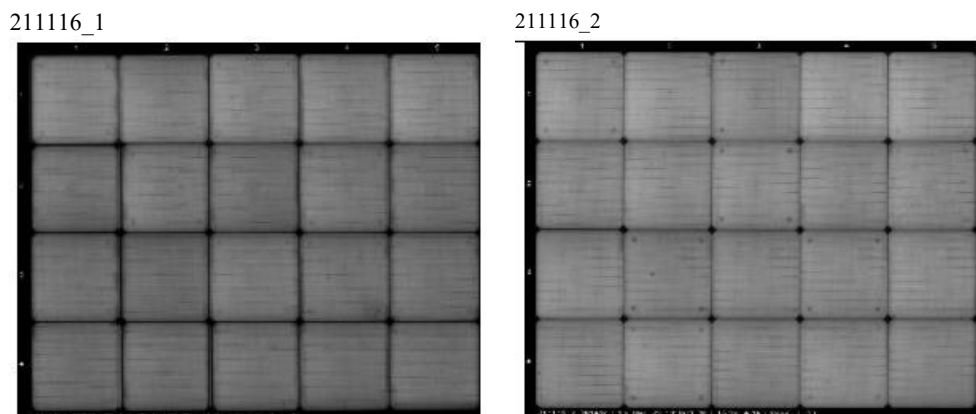


Рисунок 1. Изображения электролюминесценции  
Figure 1. Electroluminescence images

Таблица 2. Характеристики фотоэлектрических модулей  
Table 2. Characteristics of photovoltaic modules

Название	$I_{sc}$ , А	$U_{oc}$ , В	$I_{mp}$ , А	$U_{mp}$ , В	$P_{mp}$ , Вт	FF, %
211116_1	9,08	14,72	8,58	12,21	104,7	78,36
211116_2 охлаждаемый	8,98	14,71	8,49	12,17	103,29	78,18

Одновременно снимались ВАХ обоих модулей (чтобы избежать погрешности от влияния изменчивости солнечной радиации). В качестве нагрузки использовались проволочные реостаты с регулируемым сопротивлением. В результате измерений были получены следующие значения:  $U_{oc}$  – напряжение холостого хода, для первого модуля 13,8 В, для второго модуля 13,649 В, при солнечной радиации 880 Вт/м<sup>2</sup>;  $I_{sc}$  – ток короткого замыкания, для первого модуля 9,08 А, для второго модуля 8,98 А, при солнечной радиации 873 Вт/м<sup>2</sup>.

Таким образом, была подтверждена высокая идентичность характеристик двух фотоэлектрических модулей, предназначенных для проведения сравнительного эксперимента.

Первый модуль будет испытываться без охлаждения, а второй – будет подвержен водяному охлаждению с использованием разработанной авторами автоматизированной системы. Все внешние погодные факторы оказывают одинаковое влияние на оба модуля. Различие в выработке электроэнергии упомянутых модулей будет определяться только водяным охлаждением.

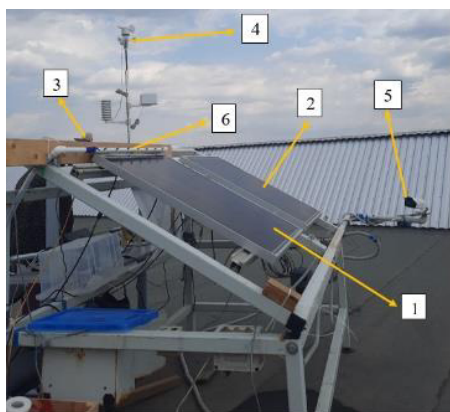
Экспериментальное исследование проведено нами с использованием системы долгосрочного мониторинга характеристик фотоэлектрических модулей – тестовой фотоэлектрической системы (ТФЭС). Общество с ограниченной ответственностью «Научно-технический центр тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе» и ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет» 22 января 2013 г. заключили соглашение о сотрудничестве в области возобновляемой солнечной энергетики путем создания системы мониторинга солнечной инсоляции в Астраханской области, совместного участия в научно-практических исследованиях и подго-

товке высококвалифицированных кадров в сфере возобновляемых источников энергии, в рамках которого 8 мая 2013 года в Астраханской области на крыше одного из учебных корпусов Астраханского государственного университета была установлена упомянутая тестовая фотоэлектрическая система (ТФЭС). Общий вид экспериментальной установки приведен на рисунке 2.

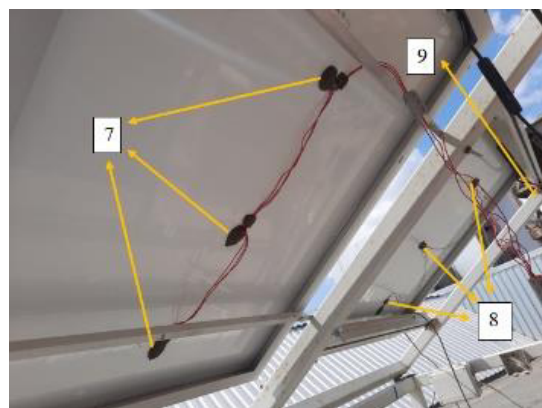
Система мониторинга характеристик фотоэлектрических модулей построена на базе электронного регистратора «Параграф PL2», который обеспечивает круглосуточный сбор, хранение данных о мощностных, температурных характеристиках, уровне солнечной иррадиации, а также обеспечивает доступ к этим данным посредством подключения к сети Internet. Отбор энергии от фотоэлектрического модуля обеспечен системой, состоящей из контроллера заряда с удержанием точки максимальной мощности, аккумулятора и электрической нагрузки. Система позволяет производить круглосуточное измерение характеристик фотоэлектрических модулей, работающих в естественных условиях [15].

### Результаты эксперимента

В таблице 3 приведены результаты измерений от 31 августа 2023 года для модуля с охлаждением: скорость ветра, температура тыльной стороны модуля, температура окружающей среды, солнечная радиация, напряжение  $U$ , и сила тока  $I$  на выходе модуля. Благодаря имеющейся в нашем распоряжении системе мониторинга [16] все показатели фиксировались ежедневно. В статье с целью сокращения объема таблиц результаты измерений и вычислений приведены с более крупным шагом. Мощность  $P_{охл}$ , отдаваемая в нагрузку охлаждаемым модулем, определена как произведение силы тока на напряжение.



а)



б)

Рисунок 2. Общий вид экспериментальной установки. а) внешний вид опорной конструкции ТФЭС с размещенными на ней испытуемыми ФЭМ: 1 – фотоэлектрический модуль охлаждаемый, 2 – фотоэлектрический модуль без охлаждения, 3 – датчик солнечной радиации, 4 – датчик скорости и направления ветра, 5 – камера наблюдения, 6 – гребенка с распылительными форсунками; б) вид задней поверхности ФЭМ: 7 – температурные датчики задней поверхности фотоэлектрического модуля без охлаждения, 8 – температурные датчики охлаждаемого модуля, 9 – температурный датчик окружающей среды

Figure 2. General view of the experimental installation. а) appearance of the support structure of the TFS with the tested FEM located on it: 1 – a cooled photovoltaic module, 2 – a non-cooled photovoltaic module, 3 – a solar radiation sensor, 4 – a wind speed and direction sensor, 5 – a surveillance camera, 6 – a comb with spray nozzles; б) view of the rear surface of the FEM: 7 – temperature sensors of the rear surface of the photoelectric module without cooling, 8 – temperature sensors of the cooled module, 9 – ambient temperature sensor

Таблица 3. Результаты измерений для модуля с охлаждением

Table 3. Measurement results for a cooled module

Время	Ветер, м/с	t мод, °C	t окр сред, °C	Солнечная радиация, Вт/м <sup>2</sup>	U, В	I, А	P <sub>охл</sub> , Вт
12:00	0,6945	55,05	27,1	977,875	10,0145	7,395397	74,06135
12:01	0,6945	54,53	27,2	977,875	10,0946	7,330300	73,99667
12:02	0,30558	52,5	27,1	978,5	10,11235	7,321739	74,03999
12:03	0,30558	47,54	27,2	983,875	10,3657	7,351303	76,20141
12:04	0,6945	42,18	27,1	983,125	10,55548	7,89269	83,31116
12:05	0,30558	38,94	26,9	981,5	11,18966	8,28718	92,73079
12:06	0	37,24	27,3	987,5	11,69025	7,95788	93,02970
12:07	0	36,23	27,2	986,875	11,99492	7,73471	92,77734
12:20	0	35,71	27,2	993,375	12,23912	7,62194	93,28599
12:30	0,6945	34,81	27,1	991,875	12,52445	7,42202	92,95676
12:40	1,00008	35,81	27,2	1000,625	12,29178	7,64653	93,98956
12:50	1,69458	37,65	26,9	999,875	11,70709	8,05288	94,27590
13:00	0,6945	36,93	26,8	999,25	11,91845	7,89375	94,08139
13:10	0,30558	37,13	26,9	994	11,79727	7,93601	93,62340
13:20	0,30558	37,83	27,0	988,125	11,52270	8,08812	93,19705
13:30	0	36,43	26,8	978,625	11,83625	7,77593	92,03795
13:40	0,30558	37,73	26,9	968,5	11,33241	8,05849	91,32217
13:50	0,30558	36,72	26,9	956	11,48671	7,831412	89,95717
14:00	0,30558	38,84	26,9	943,5	10,75121	8,291517	89,14384

Влияние скорости ветра на выходную мощность фотоэлектрического модуля в силу малых значений скоростей ветра оказалось незначительным. Изменение выходной мощности охлаждаемого фотоэлектрического модуля во времени представлено на рисунке 3 – выходная мощность фотоэлектрического модуля

практически безынерционно реагирует на изменение солнечной радиации: с ростом солнечной радиации выходная мощность увеличивается. В таблице 4 приведены результаты измерений от 31 августа 2023 г. для модуля, работающего без охлаждения.



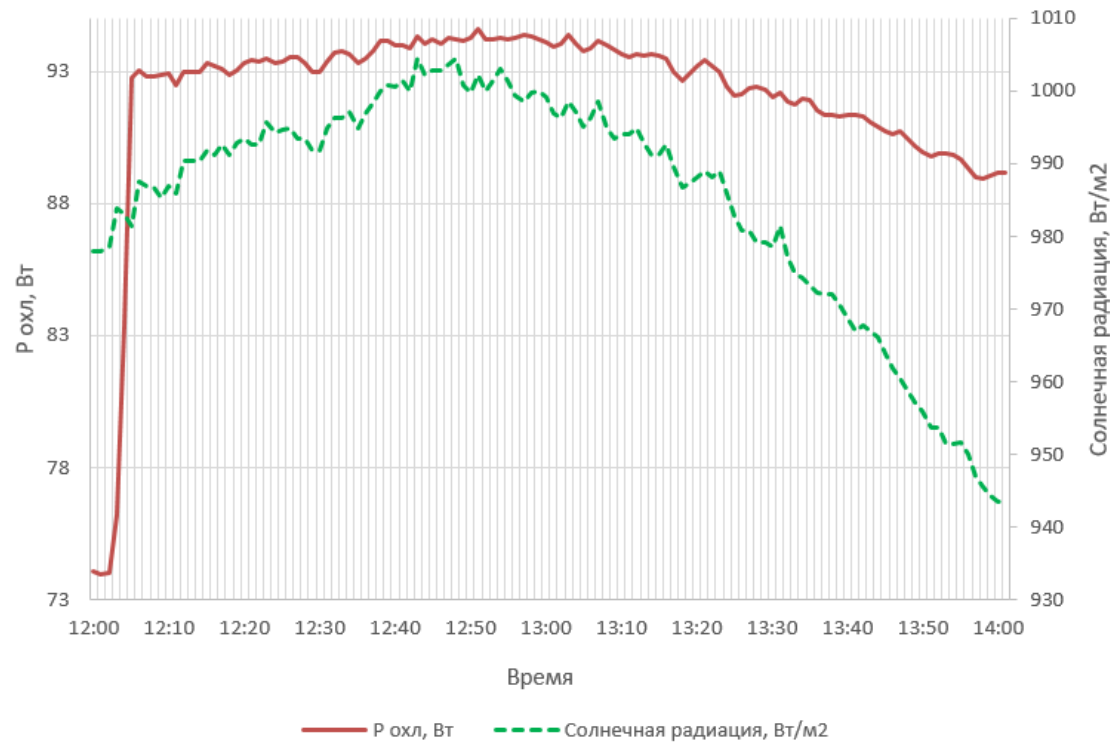


Рисунок 3. Выходная мощность охлаждаемого фотоэлектрического модуля и солнечная радиация. Эксперимент 2023-08-31

Figure 3. Cooled PVM power output and solar radiation. Experiment dated 2023-08-31

Таблица 4. Результаты измерений для модуля, работающего без охлаждения

Table 4. Measurement results for an uncooled module

Время	Ветер, м/с	t мод, °C	t окр среды, °C	Солнечная радиация, Вт/м <sup>2</sup>	U, В	I, А	P без охл, Вт
12:00	0,6945	57,19	27,1	977,875	10,36959	7,676101	79,59804
12:01	0,6945	56,98	27,2	977,875	10,40891	7,639925	79,52333
12:02	0,30558	55,76	27,1	978,5	10,65021	7,429740	79,12833
12:03	0,30558	55,05	27,2	983,875	10,85237	7,306242	79,29005
12:04	0,6945	54,35	27,1	983,125	10,98739	7,186173	78,95734
12:05	0,30558	54,35	26,9	981,5	10,96873	7,186584	78,82777
12:06	0	54,35	27,3	987,5	11,03762	7,185074	79,30617
12:07	0	54,24	27,2	986,875	11,05342	7,166344	79,21268
12:20	0	55,16	27,2	993,375	10,93759	7,322704	80,09281
12:30	0,6945	56,48	27,1	991,875	10,65839	7,550011	80,47098
12:40	1,00008	58,2	27,2	1000,625	10,42835	7,843675	81,79660
12:50	1,69458	56,59	26,9	999,875	10,72530	7,566799	81,15622
13:00	0,6945	56,59	26,8	999,25	10,71841	7,566964	81,10585
13:10	0,30558	58,52	26,9	994	10,29904	7,900688	81,36953
13:20	0,30558	56,59	27,0	988,125	10,59574	7,569948	80,20922
13:30	0	54,64	26,8	978,625	10,87609	7,237140	78,71184
13:40	0,30558	56,88	26,9	968,5	10,32489	7,625353	78,73096
13:50	0,30558	56,88	26,9	956	10,18776	7,628973	77,72218
14:00	0,30558	55,05	26,9	943,5	10,39471	7,317145	76,05963

Сопоставление температуры окружающей среды и температуры тыльных сторон фотоэлектрических модулей отражено на рисунке 4. В ходе эксперимента температура окружающей среды сохранялась на уровне +27°C. Температура тыльной стороны фотоэлектрического модуля, работавшего без охлаждения,

изменялась в диапазоне от +54°C до +58 °C. Применение автоматизированной системы водяного охлаждения обеспечило поддержание температуры охлаждаемого модуля в диапазоне от +36°C до +38°C. Было достигнуто снижение температуры модуля в среднем на 20°C.

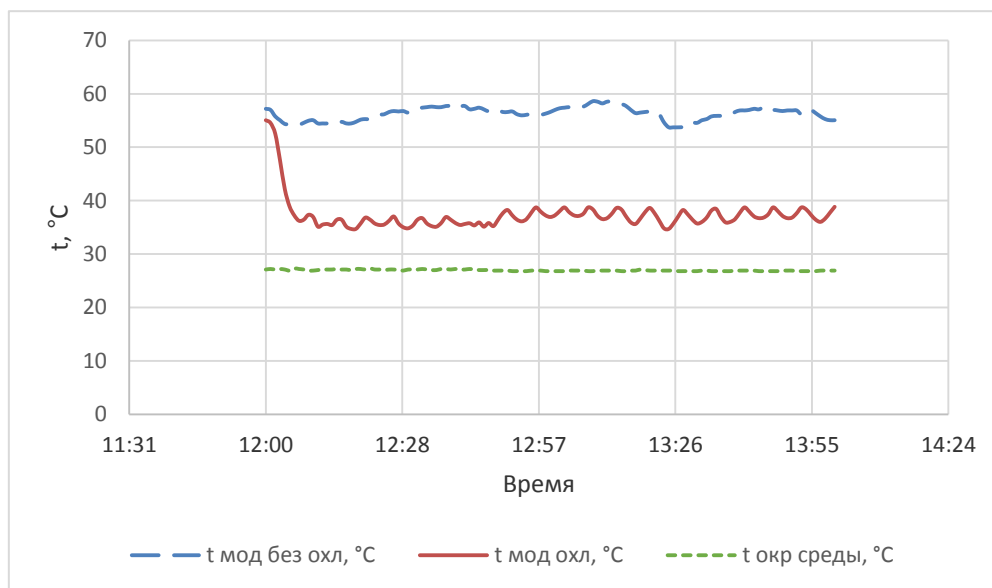


Рисунок 4. Зависимость температуры окружающей среды (зеленый —), температуры охлаждаемого модуля (красный —), температуры модуля без охлаждения (синий —) от времени. Эксперимент 2023-08-31

Figure 4. Dependence of ambient temperature (green —), cooled module temperature (red —), uncooled module temperature (blue —) on time. Эксперимент 2023-08-31

Проведенный эксперимент подтверждает зависимость энергетической эффективности фотоэлектрических модулей от температуры самого модуля. На рисунке 5 представлено сравнение мощностей, вырабатываемых упомянутыми фотоэлектрическими модулями. Из рисунка очевидно значительное повышение выработки модуля при работе с охлаждением. Так,

например, в 12 ч. 06 минут мощность, вырабатываемая охлаждаемым модулем, составляла 93,0297 Вт, в то время как мощность модуля без охлаждения была равна 79,306 Вт. Разница составила 13,7237 Вт. Мощность возросла на 17%. Такое повышение является существенным.

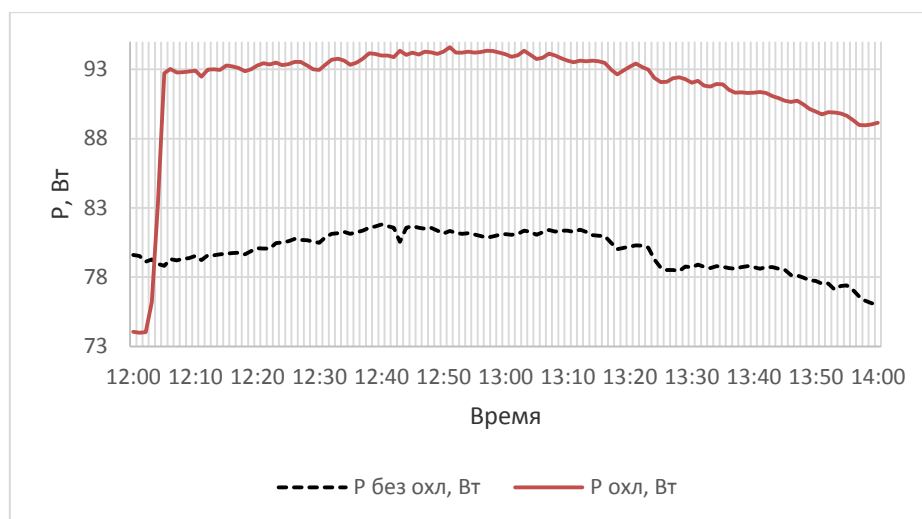


Рисунок 5. Мощность модуля с охлаждением (красный —), мощность модуля без охлаждения (черный —). Эксперимент 2023-08-31

Figure 5. Cooled module power (red —), uncooled module power (black —). Experiment dated 2023-08-31

Затраты электроэнергии на электропривод насоса невелики, поскольку автоматическое включение насоса происходило на небольшие промежутки времени. Анализ работы системы автоматического поддержания заданной температуры тыльной стороны охлаждаемого модуля будет проведен нами в отдельной статье.

#### Коэффициент полезного действия

Наиболее важным показателем для оценки энергоэффективности является коэффициент полезного действия (КПД). Расчет КПД фотоэлектрического модуля произведем по формуле (2):

$$\eta = P_2 / P_1 \quad (2)$$



где  $P_2 = U \cdot I$  – мощность, отдаваемая фотоэлектрическим модулем в нагрузку, (Вт);

$P_1$  – мощность солнечного излучения, падающего на поверхность фотоэлектрического модуля (Вт).

Мощность солнечного излучения зависит от интенсивности солнечной радиации и площади поверхности, выражение (3):

$$P_1 = S \cdot I_n \text{ (Вт)}, \quad (3)$$

где  $I_n$  – солнечная радиация, Вт/м<sup>2</sup>;

$S$  – площадь поверхности фотоэлектрического модуля, м<sup>2</sup>.

Для исследованных модулей площадь поверхности составляет  $S = 0,58899$  м<sup>2</sup>.

В таблице 5 приведены значения мощности солнечного излучения, падающего на поверхность фотоэлектрического модуля  $P_1$ , мощности охлаждаемого фотоэлектрического модуля  $P_{2\text{охл}}$ , мощности фотоэлектрического модуля работающего без охлаждения  $P_2$  без охл., а также значения коэффициента полезного действия. Среднее значение КПД при охлаждении модуля составляет 0,15977, при отсутствии охлаждения 0,13764. Имеет место повышение КПД на 2,21 %.

### Заключение

Проблемам обеспечения безопасности эксплуатации атомных станций всегда уделяется повышенное внимание. В дополнение к автономным дизель-генераторным установкам, используемым для поддержания работы систем безопасности при потере внешнего энергоснабжения, на настоящем этапе целесообразно также рассмотреть применение более экологических автономных фотоэлектрических установок.

1. Анализ научно-технической литературы показал интерес разработчиков к проблеме охлаждения фотоэлектрических модулей с целью повышения коэффициента полезного действия установок, преобразующих солнечное излучение в электрическую энергию.

Далее для оценки эффективности систем охлаждения фотоэлектрических модулей необходимо выходить за рамки лабораторных экспериментов в помещениях к экспериментам в реальных естественных условиях работы.

2. В настоящей работе проведено сравнительное экспериментальное исследование эффективности водяного охлаждения в реальных естественных климатических условиях Юга России, когда охлаждаемый и неохлаждаемый фотоэлектрические модули одновременно находятся под воздействием комплекса переменчивых погодных факторов: солнечной радиации, облачности, ветра, давления, температуры и влажности окружающей среды, при этом оба модуля имеют нагрузки, подключенные через МРРТ контроллеры.

3. Исследовано влияние водяного охлаждения на энергетическую эффективность фотоэлектрических модулей, собранных из кремниевых гетероструктурных (НТ) солнечных ячеек. Солнечные панели были изготовлены из НТ ячеек толщиной 130 мкм, соединенных между собой по технологии контактирования SmartWire, которая уменьшает потери мощности из-за возникновения возможных дефектов, например, трещин. Выполнены условия по обеспечению наибольшей идентичности параметров охлаждаемого и неохлаждаемого модулей.

4. Сравнительное экспериментальное исследование проведено на площадке Астраханского государственного университета с использованием системы долгосрочного мониторинга характеристик фотоэлектрических модулей – тестовой фотоэлектрической системы (ТФЭС), построенной на базе электронного регистратора «Параграф PL2», который обеспечивает круглосуточный сбор, хранение данных о мощностных, температурных характеристиках, уровне солнечной иррадиации, а также обеспечивает доступ к этим данным посредством подключения к сети Internet.

Таблица 5. Коэффициент полезного действия

Table 5. Efficiency

Время	Солнечная радиация, Вт/м <sup>2</sup>	$P_1$ , Вт	$P_2$ охл, Вт	КПД охл	$P_2$ без охл, Вт	КПД без охл
12:00	977,875	575,9585963	74,06135304	0,128587981	79,59804671	0,138200987
12:01	977,875	575,9585963	73,99667151	0,128475679	79,52333335	0,138071267
12:02	978,5	576,326715	74,03999295	0,128468785	79,1283306	0,137297697
12:03	983,875	579,4925363	76,20141153	0,131496795	79,29005054	0,136826698
12:04	983,125	579,0507938	83,31116015	0,143875392	78,95734102	0,136356503
12:05	981,5	578,093685	92,7307913	0,160407895	78,82777516	0,136358132
12:06	987,5	581,627625	93,02970603	0,159947193	79,30617216	0,136352141
12:07	986,875	581,2595063	92,77734012	0,159614319	79,21268014	0,136277651
12:20	993,375	585,0879413	93,28599195	0,159439266	80,09281168	0,136890211
12:30	991,875	584,2044563	92,95676903	0,159116843	80,47098516	0,137744559
12:40	1000,625	589,3581188	93,9895614	0,159477843	81,7966009	0,1387893
12:50	999,875	588,9163763	94,2759057	0,160083688	81,15622746	0,137806029
13:00	999,25	588,5482575	94,08139837	0,159853329	81,10585477	0,137806635
13:10	994	585,45606	93,62340451	0,159915339	81,36953618	0,138984873
13:20	988,125	581,9957438	93,19705523	0,160133568	80,20922091	0,137817539
13:30	978,625	576,4003388	92,03795511	0,159677136	78,71184649	0,136557599
13:40	968,5	570,436815	91,32217249	0,160091653	78,73096992	0,138018739
13:50	956	563,07444	89,95717165	0,159760709	77,72218095	0,138031804
14:00	943,5	555,712065	89,14384424	0,160413728	76,0596381	0,13686879

5. В ходе эксперимента температура окружающей среды сохранялась на уровне  $+27^{\circ}\text{C}$ . Температура тыльной стороны фотоэлектрического модуля, работавшего без охлаждения, изменялась в диапазоне от  $+54^{\circ}\text{C}$  до  $+58^{\circ}\text{C}$ . Применение автоматизированной системы водяного охлаждения обеспечило поддержание температуры охлаждаемого модуля в диапазоне от  $+36^{\circ}\text{C}$  до  $+38^{\circ}\text{C}$ . Было достигнуто снижение температуры модуля в среднем на  $20^{\circ}\text{C}$ .

6. Установлено значительное повышение выработки модуля при работе с охлаждением. Так, например, при инсоляции  $987,5 \text{ Вт/м}^2$  мощность, вырабатываемая охлаждаемым модулем, составляла  $93,0297 \text{ Вт}$ , в то время как мощность модуля без охлаждения была

равна  $79,306 \text{ Вт}$ . Разница составила  $13,7237 \text{ Вт}$ . Мощность возросла на  $17\%$ .

7. Наиболее важным показателем энергоэффективности является коэффициент полезного действия. В проведенном эксперименте среднее значение КПД при охлаждении модуля составляет  $0,15977$ , при отсутствии охлаждения  $0,13764$ . Имеет место повышение КПД на  $2,21\%$ . Такое повышение является существенным.

Полученные результаты подтверждают достаточно высокую эффективность водяного охлаждения фотоэлектрических модулей в реальных естественных условиях работы, что особенно важно для регионов с высокими температурами окружающей среды в летнее время, в частности для Юга России.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Adnan Ahmed Siddique, Akram Mohiuddin Syed Mohammed Nahri. Effects of surface temperature variations on output power of three commercial photovoltaic modules. *International Journal of Engineering Research & technology (IJERT)*. 2016;5(11):12–16. Available at: <https://www.ijert.org/research/effects-of-surface-temperature-variations-on-output-power-of-three-commercial-photovoltaic-modules-IJERTV5IS110009.pdf> (accessed: 15.07.2023).
2. Malagouda Patil, Alur Sidramappa, Rajashekhar Angadi. Experimental investigation of enhancing the energy conversion efficiency of solar PV cell by water cooling mechanism. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;376(1):012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/376/1/012014> Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/376/1/012014/pdf> (accessed: 15.07.2023).
3. Троицкий А.О., Серадская О.В., Кирпичникова И.М. Основные факторы снижения КПД солнечных установок и способы поддержания номинального КПД. *Энерго-и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)*. 2015;3(1):222–225. EDN: TRSQTZ Режим доступа: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_23384244\\_61233041.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23384244_61233041.pdf) (дата обращения: 15.07.2023).
4. Дубинин Д.В., Лаевский В.Е. Энергетическая эффективность работы солнечных батарей в реальных режимах эксплуатации. *Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2015;3(326):58–62. EDN: TSXNHT. Режим доступа: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_23438495\\_82878854.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23438495_82878854.pdf) (дата обращения: 15.07.2023).
5. Джумаев А.Я. Анализ влияния температуры на рабочий режим фотоэлектрической солнечной станции. *Технические науки – от теории к практике: сборник статей по материалам 46-й международной научно-практической конференции*. Новосибирск: Сибак, 2015. 2015;5(42):33–40. EDN: TWOZVD. Режим доступа: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_23606313\\_35862862.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23606313_35862862.pdf) (дата обращения 15.07.2023).
6. Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б. Построение энергетических характеристик солнечных модулей с учетом условий окружающей среды. *Вестник Пермского государственного технического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2020;(34):56–74. EDN: FZIWGM. Режим доступа: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_43803124\\_89485757.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_43803124_89485757.pdf) (дата обращения 15.07.2023).
7. Mohamed Sharaf, Mohamed S. Yousef, Ahmed S. Huzayyin. Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29(18):26131–26159. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18719-9>
8. Ibtisam Ahmed Hasan, Iman Saleh, Kareem Duha, Adil Attar. Effect of evaporative cooling combined with heat sink on pv module performance. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences. Electro mechanical Engineering Department University of Technology Baghdad, Iraq*. 2019;(27)2:252–254. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23413.42728>
9. Mehrotra S., Rawat P., Debbarma M., Sudhakar K. Performance of a solar panel with water immersion cooling technique. *International Journal of Science, Environment ISSN 2278-3687 (O) and Technology*. 2014;3(3):1161–1172. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/263448324> (accessed: 15.07.2023).
10. Irwan Y.M., Leow W.Z., Irwanto M. et al. Indoor test performance of PV panel through water cooling method. *Energy Procedia*. 2015;79:604–611. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.540>
11. Leow Wai Zhe, Mohd. Irwan Yusoff, Amelia Abd Razak, Muhammad Irwanto Misrun, Safwati Ibrahim, Muhammad Izuan Fahmi, Afifah Shuhada Rosmi. Effect of Water Cooling Temperature on Photovoltaic Panel Performance by Using Computational Fluid. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2019;56(1):133–146. Available at: [https://www.akademibaru.com/doc/ARFMTSV56\\_N1\\_P133\\_146.pdf](https://www.akademibaru.com/doc/ARFMTSV56_N1_P133_146.pdf) (accessed: 15.07.2023).
12. Benato A., Stoppato, A. An Experimental Investigation of a Novel Low-Cost Photovoltaic Panel Active Cooling System. *Energies*. 2019;12(8):1448. <https://doi.org/10.3390/en12081448>
13. Зайнутдинова Л.Х., Ильичев В.Г., Джамбеков Р.Г. Экспериментальное исследование нагрева фотоэлектрического модуля Ргматс-125. *Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики: сборник трудов российской конференции, 21-23 ноября 2022 г., Санкт-Петербург*. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С. 99–100. ISBN 978-5-7422-7926-6. <https://www.18720/SPBPU/2/id22-248>
14. Faes A., Despeisse M., Levrat J. et al. SmartWire Solar Cell Interconnection Technology. *29-th EU PVSEC*. 2014. P.2555-2561 (2014). <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20142014-5DO.16.3>

15. Братышев С.Н., Зайнутдинова Л.Х., Ильичев В.Г., Титов А.С. Информационно-измерительная система долгосрочного мониторинга характеристик фотоэлектрических модулей. *Проблемы получения, обработки и передачи измерительной информации: материалы II Международной научно-технической конференции. Уфимский государственный авиационный технический университет*. Уфа: РИК УГАТУ, 2019. С.281–286. EDN: MFRIHN. Режим доступа: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_41446854\\_91814858.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_41446854_91814858.pdf) (дата обращения: 15.07.2023).

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Ильичев В.Г.** – разработка системы охлаждения фотоэлектрических модулей, проведение эксперимента, обработка результатов эксперимента;

**Зайнутдинова Л.Х.** – разработка концепции сравнительного эксперимента и оценки энергоэффективности фотоэлектрических модулей, проведение эксперимента, оформление текста статьи;

**Теруков Е.И.** – разработка требований к конструкции фотоэлектрических модулей на основе кремниевых гетероструктурных (HJT) солнечных ячеек;

**Михайлов М.Ю.** – разработка технологии и изготовление фотоэлектрических модулей, на основе кремниевых гетероструктурных (HJT) солнечных ячеек.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Без дополнительного финансирования.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Владимир Геннадьевич Ильичев**, младший научный сотрудник, Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева, г. Астрахань, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2579-0403>

e-mail: vova201428@yandex.ru

**Лариса Хасановна Зайнутдинова**, кандидат технических наук, доктор педагогических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева, г. Астрахань, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7013-9716>

e-mail: Lzain@mail.ru

**Теруков Евгений Иванович**, доктор технических наук, заместитель генерального директора по научным вопросам, ООО «Научно-технический центр тонкопленочных технологий в энергетике», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4818-4924>

e-mail: e.terukov@hevelsolar.com

**Михайлов Михаил Юрьевич**, технолог, ООО «Научно-технический центр тонкопленочных технологий в энергетике», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

e-mail: m.mikhailov@hevelsolar.com

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Ilyichev V.G.** – development of a cooling system for photovoltaic modules, experiment, processing of experimental results;

**Zainutdinova L.H.** – development of the concept of a comparative experiment and assessment of the energy efficiency of photovoltaic modules, conducting an experiment, drafting the text of the article;

**Terukov E.I.** – development of requirements for the design of photovoltaic modules based on silicon heterostructural (HJT) solar cells;

**Mikhailov M.Yu.** – development of technology and manufacture of photovoltaic modules based on silicon heterostructured (HJT) solar cells.

#### FUNDING:

No additional funding.

#### CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare no conflict of interest.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Vladimir G. Ilyichev**, research associate, Astrakhan Tatishchev State University, Astrakhan, Astrakhan region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2579-0403>

e-mail: vova201428@yandex.ru

**Larisa Kh. Zainutdinova**, Cand. Sci. (Eng.), Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Lead Researcher, Astrakhan Tatishchev State University, Astrakhan, Astrakhan region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7013-9716>

e-mail: Lzain@mail.ru

**Evgenii I. Terukov**, Doctor of Technical Sciences, Deputy director for science, R&D Center of Thin Film Technologies in Energetics, St. Petersburg, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4818-4924>

e-mail: e.terukov@hevelsolar.com

**Mikhail Yu. Mikhailov** process engineer, R&D Center of Thin Film Technologies in Energetics, St. Petersburg, Russian Federation.

e-mail: m.mikhailov@hevelsolar.com

Поступила в редакцию 04.10.2023

После доработки 24.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

Received 04.10.2023

Revision 24.11.2023

Accepted 30.11.2023