



Научная статья
УДК 620.92(575.3)
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-83-93>

Снижение генерации электрической энергии солнечными модулями в условиях запыленности местности

И.М. Кирпичникова^{1✉}, И.Б. Махсумов², В.В. Шестакова³

^{1,3}Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

²Институт энергетики Таджикистана, р-н Кушониён, Республика Таджикистан

Резюме. Цель – провести анализ производительности солнечных модулей в зависимости от климатических характеристик местности, химических и электрофизических свойств пыли; исследовать влияние загрязнения поверхности фотоэлектрических модулей на генерацию электрической энергии и определить срок покрытия поверхностей пылью до критического значения по снижению выработки энергии. Эксперимент проводился в апреле 2022 года в двух регионах: Республике Таджикистан и Челябинской области Российской Федерации. При исследованиях были проанализированы работы ученых разных стран по влиянию загрязнения на генерацию модулей, проведены сравнительные натурные эксперименты по производительности солнечных модулей и их корреляция с метеорологическими данными регионов. Установлено, что концентрация пыли в Челябинской области составляет 12–19 мг/м³, что значительно меньше, чем в Таджикистане, но из-за мелкодисперсной структуры ее сложнее удалять с поверхности. Результаты экспериментов показали, что в Республике Таджикистан мощность запыленного модуля за первую декаду апреля (начало пылевых бурь) снизилась на 46,64% относительно заявленной производителем номинальной мощности солнечного модуля. Для условий г. Челябинск – крупного промышленного центра – выработка электроэнергии модулями за этот же период снизилась в среднем на 7,1%. Это свидетельствует об актуальности проблемы защиты фотоэлектрических модулей, которую необходимо решать для поддержания генерации электроэнергии в номинальных режимах в данном регионе. Установлено, что периодичность очистки для сохранения параметров модулей без специальных устройств защиты от загрязнений должна быть в среднем не реже одного раза в неделю для обоих регионов. Предложено устройство, предотвращающее запыление поверхности модулей на основе электронно-ионной технологии и использование голографической пленки, защищающей модули не только от пылевых загрязнений, но и от действия инфракрасных лучей. Данные устройства являются предметом дальнейших работ по их усовершенствованию.

Ключевые слова: солнечная энергетика, фотоэлектрические модули, пылевые загрязнения, снижение генерации солнечных модулей, защита модулей

Для цитирования: Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б., Шестакова В.В. Снижение генерации электрической энергии солнечными модулями в условиях запыленности местности // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 83–93. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-83-93>.

POWER ENGINEERING

Original article

Reduced power generation efficiency of solar panels in dusty locations

Irina M. Kirpichnikova^{1✉}, Ilkhom B. Makhsumov², Valeriya V. Shestakova³

^{1,3}South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

²Institute of Energy of Tajikistan, Kushoniyon district, Republic of Tajikistan

Abstract. In this paper, we aim to investigate the performance of solar panels depending on the climate conditions of their location and the chemical and electrophysical characteristics of deposited dust. In particular, we study the effect of surface contamination of solar panels on their efficiency and determine the period of dust deposition that is critical in terms of power generation reduction. Experiments were conducted in April 2022 in the Republic of Tajikistan and the Chelyabinsk region of the Russian Federation. Both domestic and foreign publications on the impact of surface contamination on solar cell efficiency were reviewed. Comparative field experiments were carried out to investigate the performance of solar panels depending on environmental variables. It was found that the level of dust deposition in the Chelyabinsk region reached about 12–19 mg/m³, which is significantly lower than that in Tajikistan. However, due to its fine disperse structure, this dust is harder to remove. In Tajikistan, the capacity of the solar panel covered with dust decreased by 46.64% relative to its nominal value in the first decade of April (the onset of dust storms). In the large industrial city of Chelyabinsk, the power output of the panels under study decreased by an average of 7.1% during this period. These findings confirm the importance of solar panel protection for maintaining the nominal values of solar power generation in the given regions. When no special protection devices are used, cleaning frequency for maintaining the required efficiency of solar panels should be, on average, not less than once a week for both regions. A device is proposed for preventing dusting of the solar panel surface based on electron-ion technology. In addition, holographic films can be used to protect solar panels not only from dust contamination, but also from IR radiation. These protection approaches are the subject of future research.

Keywords: solar energy, photovoltaic modules, dust pollution, reduction of solar module generation, module protection

For citation: Kirpichnikova I.M., Maksumov I.B., Shestakova V.V. Reduced power generation efficiency of solar panels in dusty locations. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):83-93. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-83-93>.

ВВЕДЕНИЕ

На производительность фотоэлектрических систем сильно влияют внутренние и внешние факторы, такие как особенности конструкции, старение, радиация, затенение, температура окружающей среды, ветер, степень загрязнения и чистота. Любой тип климатических преобразований вызывает изменения солнечной радиации и температуры окружающей среды, что приводит к корректировке выходных характеристик солнечных фотоэлектрических систем [1].

На сегодняшний день экономические последствия пылевого загрязнения в результате изменения климата стали одним из важнейших вопросов, решаемых правительствами большинства стран мира. Пыль можно определить как измельченную форму мельчайших частиц размером менее 500 мкм. Пыль может попадать в окружающую среду из различных источников, таких как строительные площадки, промышленные предприятия и пыльные бури. Пыль состоит из видимых и невидимых плавающих и упавших частиц твердого материала [1]. Под термином «пылевые частицы» обычно подразумеваются аэрозольные частицы в атмосфере, которые являются причиной искусственного или естественного загрязнения воздуха. К категории естественных источников в засушливых, полусушливых или подвергшихся эрозии

районах относятся пыльные бури, которые производят частицы различного размера, как правило, крупнее искусственных частиц. В большинстве случаев эти источники не действуют локально и могут экспортировать частицы на несколько километров [2–4].

Искусственные источники загрязнения в основном находятся в городских районах с промышленными сооружениями. Они производят мелкие частицы пыли, действующие локально и оказывающие наиболее негативное воздействие на окружающую среду.

Целью работы является определение влияния загрязнения поверхности фотоэлектрических модулей на генерацию электрической энергии и определение срока покрытия поверхностей пылью до критического значения при сравнительных испытаниях для регионов с разными климатическими условиями.

ВЛИЯНИЕ ПЫЛИ НА РАБОТУ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Степень снижения КПД фотоэлектрического модуля зависит от удельной массы и размера частиц пыли, появившихся на его поверхности. По мере увеличения массы пылевых отложений выходная мощность и эффективность модуля уменьшаются, с уменьшением размера пылевых частиц выходная мощность также становится меньше, поскольку наиболее мелкие частицы блокируют

больше излучения на поверхности фотоэлектрического модуля. Различные отложения загрязняющих веществ могут включать красную почву, золу, песок, карбонат кальция, кремнезем и т.д. Наличие загрязнения воздуха может значительно ухудшить выход энергии фотоэлектрических панелей; даже после короткого периода пребывания панелей на открытом воздухе (например, 2 мес.) без очистки это может уменьшить производство энергии примерно на 6,5% [5].

В пустынной местности накопление пыли на поверхности фотоэлектрических панелей является значительным и может привести к снижению поступления солнечных лучей на нее примерно на 40%, что требует постоянной очистки поверхности [6, 7].

Исследователи Д.С. Раджпут и К. Судхакар в своем научном труде [8] экспериментально определили влияние осевших частиц пыли на электрические характеристики фотоэлектрических модулей. В эксперименте учитывались такие параметры, как поступающая радиация, эффективные стратегии работы, конструкция и размеры фотоэлектрических систем. Исследование показало, что среднее значение ежедневных потерь энергии в течение года, вызванных пылью, оседающей на поверхности фотоэлектрического модуля, составляет около 4,4%. В длительные периоды без дождя ежедневные потери энергии могут превышать 20% [8].

Структура пыли, ее физико-химические свойства также влияют на эффективность работы солнечных модулей. Частицы пыли различаются по фазе, сорту, химическим и физическим свойствам в зависимости от многих условий окружающей среды. Воздух, влажность и температура в дополнение к скорости ветра играют важную роль в распределении пыли по поверхности и в том, как она будет собираться на фотоэлементе [9, 10]. Такой конструктивный элемент, как прозрачное покрытие солнечных модулей, в значительной мере определяет их эффективность. Нормальное пропускание стекла сильно зависит от плотности осаждения пыли в сочетании с углом наклона модуля, а также от ориентации поверхности по отношению к преобладающему направлению ветра. Было

обнаружено, что наклон оптимальной прямой линии, проходящей через точки измерения солнечного элемента, установленного под углом 45° к югу, предполагает снижение выходной мощности примерно на 17,4% в месяц [11].

От материала фотоэлектрических элементов солнечных панелей зависит их производительность при загрязнении. Наиболее глубоко такие исследования проводились учеными в условиях Пакистана, климатические условия в которых сходны с условиями Республики Таджикистан [12, 13].

Результаты исследований показали, что при равных условиях для монокристаллических модулей наблюдалось более быстрое снижение производительности, чем для поликристаллических. За 18 дней неблагоприятной погоды, сопровождающейся запылением модулей, их производительность упала на 13%, а поликристаллических – на 11,2%. Модуль из аморфного кремния показал наиболее стабильное значение выработки энергии. Ученые даже ставят под сомнение вопрос признанного преимущества монокристаллических модулей по эффективности.

С. Мехилеф и его соавторы установили корреляцию между толщиной пыли, собранной на фотоэлектрическом модуле, и разницей в эффективности в сложном климате. Они пришли к выводу, что при накоплении тяжелых слоев пыли происходит значительное снижение мощности фотоэлектрического модуля, примерно на 10–20% [14].

Исследования, проведенные в Кракове, одном из самых загрязненных городов Европы, касались определения воздействия естественного осаждения пыли на стеклянную поверхность фотоэлектрического модуля, на его производительность в загрязненной городской местности [15].

Проведенный анализ литературных источников по данному направлению показал, что исследователи принимали во внимание в основном только какой-то один из параметров, влияющих на генерацию электроэнергии при запыленности солнечных модулей.

В нашем исследовании постарались изучить влияние различных составов пыли в регионах с разными климатическими условиями

и предложить методы защиты от загрязнений в зависимости от места и условий эксплуатации.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования были проведены для Таджикистана, для которого характерны естественные загрязнения воздушной среды, пылевые бури и высокие температуры воздуха и промышленного Челябинска с большим количеством объектов с выбросами искусственных загрязнителей воздушной среды. При исследованиях были использованы климатические характеристики обоих регионов с данными по инсоляции солнечной энергии в весенний период года, а также данные исследований, представленные в библиографическом списке. Выбор этого периода года для исследований обусловлен тем, что в Средней Азии в это время наступает период пылевых бурь, а в условиях Урала после схода снега наблюдается увеличение как естественных, так и искусственных источников загрязнения. Экспериментальные исследования проводились на комплексной солнечной электростанции (СЭС) мощностью 30 кВт Института энергетики Таджикистана при кафедре «Нетрадиционные возобновляемые источники энергии и тепловая энергетика» в г. Бохтар. Местность, в которой было проведено исследование работы солнечной электростанции, расположена на высоте 419 м над уровнем моря, широта – 37,872, долгота – 68,724. Фотоэлектрические преобразователи были установлены под углом наклона 45° к стороне юго-запада на 12°. В эксперименте использовались два фотоэлектрических модуля типа SOLARMODUL ALEOS19 HE 300W Supercharged. Поверхность одного из модулей была запылена естественным образом, поверхность другого модуля перед измерением электрических параметров постоянно очищалась с целью сравнения вырабатываемой мощности и определения влияния электрических свойств пыли на работу солнечных модулей. С помощью инфракрасного термометра фиксировалась температура передней и задней поверхностей модулей каждый час в течение дня. Для измерения температуры и влажно-

сти наружного воздуха окружающей среды применялись термометр и смартфон с доступом в интернет. Для того чтобы оценить влияние пылевых загрязнений на работу СЭС, была определена выработка электроэнергии для всех модулей, которые были задействованы в эксперименте.

Аналогичные эксперименты были проведены для другой зоны, характеризующейся промышленными выбросами пыли, – г. Челябинск, для которого пылевые бури и высокие температуры воздуха не характерны, но при этом имеется ряд факторов, которые могут значительно снижать выработку электроэнергии солнечным модулем. Концентрация пыли на территории Челябинской области составляет 12–19 мг/м³, что значительно меньше, чем на территории Таджикистана. Однако следует учитывать, что Уральский регион является «промышленным центром» страны, поэтому в составе пыли, выбрасываемой предприятиями, часто присутствуют различные мелкодисперсные примеси, которые могут оказывать серьезное воздействие на работу и усложнять очистку солнечных модулей при их накоплении на поверхности за счет сил адгезии и проникновения пыли во внутреннюю структуру модуля.

Экспериментальные исследования проводились в апреле 2022 г. (сухой, пыльный сезон) в будние дни в одно и то же время (с 13:00 до 14:00) на промышленной базе одного из районов г. Челябинск. Местность расположена на высоте 260 м над уровнем моря, климат – континентальный, широта – 55,098, долгота – 61,361, среднее количество солнечных часов – 2089 ч/год. В течение эксперимента фотоэлектрические преобразователи были установлены под углом наклона 55° (в соответствии с географической широтой региона) и ориентированы на юго-запад. В эксперименте были использованы солнечные модули модели bps 32-100 бренда JING-YANGPV (Китай).

Аналогично эксперименту в г. Бохтар, запыление поверхности одного из солнечных модулей происходило естественным образом, второй же очищался в течение эксперимента с целью определения их вырабатываемой мощности и изучения влияния запы-

ленности поверхности на их работу.

Для определения температуры и влажности наружного воздуха окружающей среды использовались данные из интернета. Для определения солнечной инсоляции был использован люксметр модели ТКА-ПКМ (г. Санкт-Петербург), который был установлен на поверхности солнечного модуля и находился под тем же углом, что и поверхность модуля.

Значения тока и напряжения определялись по цифровому мультиметру модели АРРА 62, который подключался поочередно к каждому из солнечных модулей в соответствии с техническими рекомендациями.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА В РЕСПУБЛИКЕ ТАДЖИКИСТАН

Термин «пыльная буря» используется для описания атмосферного явления переноса большого объема пыли с поверхности земли с помощью ветра. Всемирная метеорологическая организация описала пыльные бури как явление, вызванное ветром вблизи земли, в результате чего частицы поднимаются с поверхности и задерживаются в воздухе, снижая видимость менее чем до 1000 м.

В Средней Азии наблюдаются большие сезонные изменения выбросов пыли, такие

явления характерны и для Таджикистана. По данным ученых Физико-технического института им. С.У. Умарова АН Республики Таджикистан в последнее десятилетие прошлого века в республике наблюдались продолжительные (до 8 ч) пылевые бури высокой интенсивности, которые снижали горизонтальную видимость до 50 м [16]. Наблюдения ученых за период 2008–2009 гг. показали, что сильные пылевые бури происходят преимущественно в г. Бохтар, возможно, из-за особенностей географического расположения города. В условиях пылевых бурь, помимо ухудшения дальности горизонтальной видимости, снижается интенсивность солнечной инсоляции, следовательно, происходит уменьшение попадания видимой части солнечного спектра на фотоэлектрические модули даже при ясной погоде.

Для проведения исследования была создана экспериментальная установка (рис. 1). Эксперименты выполнялись с 5 апреля 2022 г. по 8 апреля 2022 г. (начало пыльного сезона) в период с 11:00 до 16:00. Напряжение и ток электрических нагрузок (три последовательно соединенные галогеновые лампы МАЯК 12V/60/80W), подключенные к обоим модулям, определялись с помощью цифрового мультиметра типа CHYVictorVC890D.

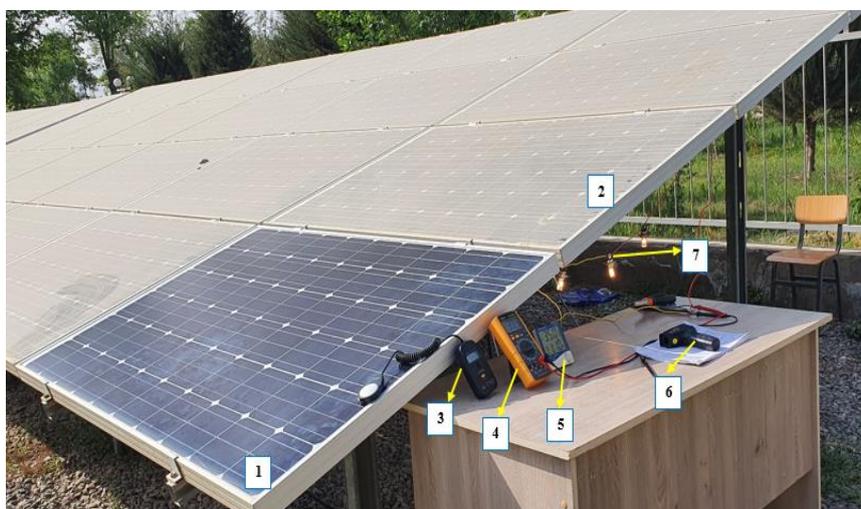


Рис. 1. Экспериментальная установка для определения генерации солнечного модуля в условиях г. Бохтар (Республика Таджикистан): 1 – очищенный солнечный модуль; 2 – запыленный солнечный модуль; 3 – цифровой люксметр MS6610; 4 – цифровой мультиметр CHYVictorVC890D; 5 – термометр/гигрометр TH90; 6 – инфракрасный термометр IR01D; 7 – галогенные лампы

Fig. 1. Experimental installation to determine solar module generation in the conditions of Bokhtar town (Republic of Tajikistan): 1 – cleaned solar module; 2 – dusty solar module; 3 – MS6610 digital illuminometer; 4 – CHYVictorVC890D digital multimeter; 5 – TH90 thermometer/hygrometer; 6 – IR01D infrared thermometer; 7 – halogen lamps

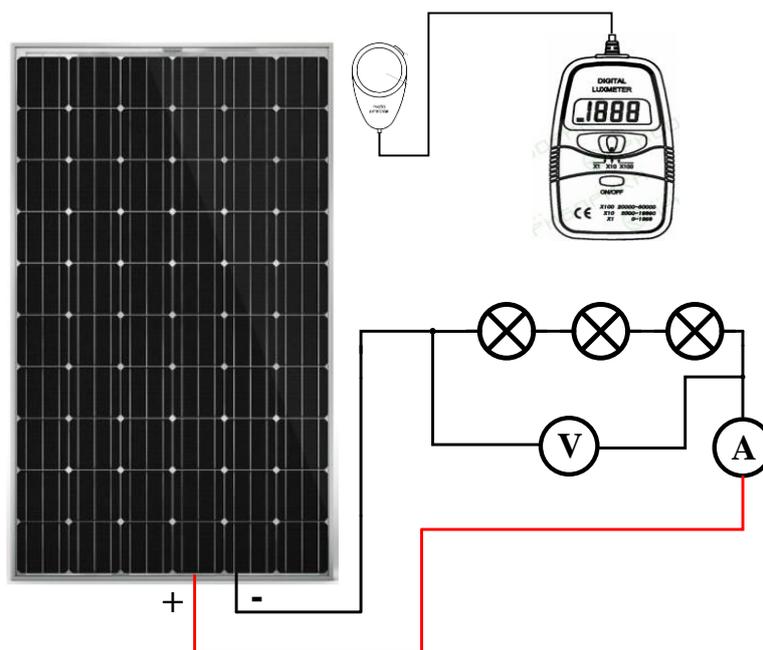


Рис. 2. Электрическая схема работы экспериментальной установки в условиях г. Бохтар (Республика Таджикистан)

Fig. 2. Electric circuit of experimental installation operation in the conditions of Bokhtar town (Republic of Tajikistan)

Электрическая схема для проведения эксперимента показана на рис. 2.

Результаты изменения мощности солнечных модулей показаны на рис. 3.

Из представленных на рис. 3 зависимостей видно, что при каждом измерении мощность чистого фотоэлектрического модуля была больше, чем запыленного модуля. Снижение мощности 06.04.2022 и 08.04.2022 г. было связано с общей облачно-

стью, однако среднее значение мощности для модуля составило 151,67 Вт. Мощность запыленного модуля за рассматриваемый период снизилась на 46,64% относительно заявленной производителем номинальной мощности солнечного модуля. При проведении экспериментов учитывалось влияние поступления солнечной радиации в течение светового дня на генерацию солнечного модуля с помощью цифрового люксметра.

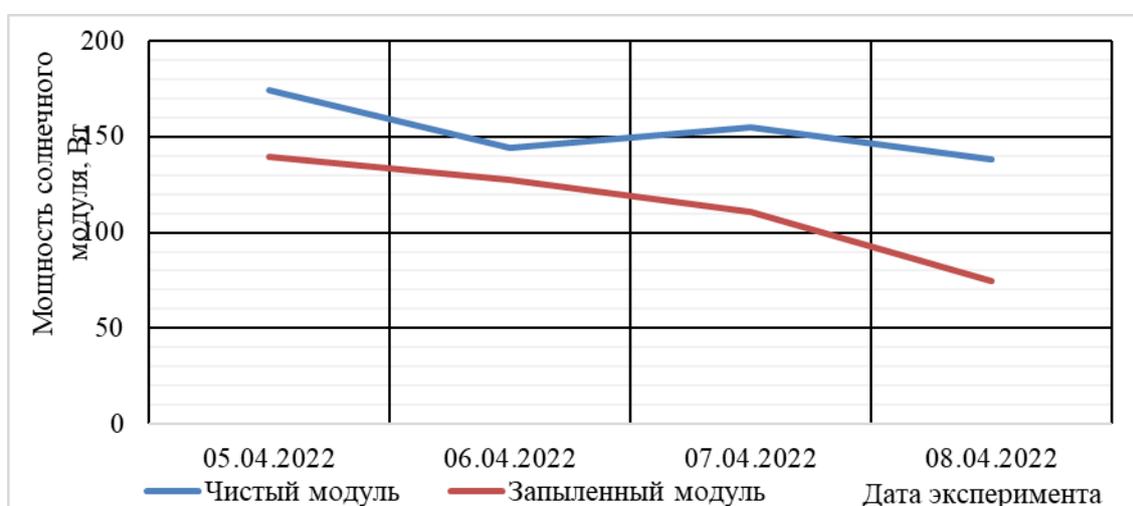


Рис. 3. Изменение мощности солнечных модулей в зависимости от уровня запыленности

Fig. 3. Solar module power vs dust level

Таким образом, в регионе с повышенной запыленностью (высокая вероятность пылевых и песчаных бурь при условии высокой засушливости и солнечной инсоляции) необходима систематическая очистка солнечных модулей для сохранения их работоспособности и солнечной электростанции в целом. Установлено, что при ежемесячной очистке модули могут терять от 17 до 20% производительности. При увеличении периодов между очисткой этот процент может составлять более 30. Следовательно, в сезон пылевых бурь рекомендуемый период очистки поверхности от загрязнений составляет минимум один раз в неделю. Полученные результаты эксперимента говорят о том, что защита поверхности солнечного модуля от загрязнений для рассматриваемого региона является очень актуальной. В сочетании с повышенными температурами, характеризующими данную местность, она только увеличивается и требует необходимого решения. Комплексным решением вопроса защиты модулей от перегрева и загрязнения может быть использование голографической пленки на основе призмаконов, устройство которой описано в работах [17–19]. Принцип действия пленки

заключается в том, что, отражая инфракрасные составляющие электромагнитного спектра излучения, она не допускает перегрева поверхности модуля. Миниатюрные призматические концентраторы в структуре пленки, увеличивая концентрацию световых лучей видимого диапазона спектра, повышают генерацию электроэнергии солнечными элементами. В то же время наличие пленки на поверхности модуля защищает ее от загрязнения и механических повреждений в случае попадания песчаных и других абразивных частиц. Такое решение будет достаточно эффективным для рассмотренных регионов.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СОЛНЕЧНОГО МОДУЛЯ В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ГОРОДА

Вид экспериментальной установки показан на рис. 4.

На рис. 5. показаны полученные в ходе эксперимента зависимости изменения мощности с течением времени для обоих модулей. К старту эксперимента (19 апреля 2022 г.) один из модулей (№ 1) был уже значительно запылен в течение месяца, в период с 19 марта по 19 апреля 2022 г. (см. рис. 4).

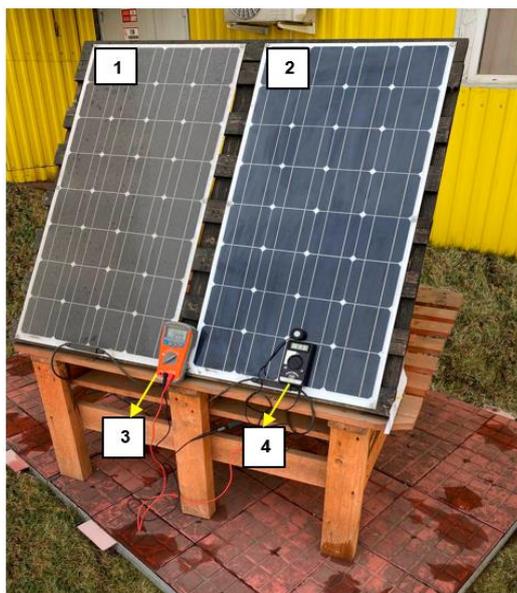


Рис. 4. Экспериментальная установка для определения генерации солнечного модуля в Челябинске:
1 – солнечный модуль №1; 2 – контрольный солнечный модуль № 2 (очищенный);
3 – цифровой мультиметр АРРА 62; 4 – люксметр ТУ 4215-003-16796024-04

Fig. 4. Experimental installation to determine solar module generation in Chelyabinsk city:
1 – solar module No. 1; 2 – control solar module No. 2 (cleaned); 3 – APPA 62 digital multimeter;
4 – ТУ 4215-003-16796024-04 illuminometer



Рис. 5. Снижение выработки мощности солнечными модулями в течение эксперимента
Fig. 5. Reduction in solar module power generation during the experiment

Анализ скопившейся пыли на поверхности солнечного модуля № 1 показал, что в состав в основном входит растительная пыль (древесная), земля, а также незначительное количество металлической пыли (железная, алюминиевая). Эта пыль обладает хорошей адгезией и способна проникать глубоко в структуру модуля.

Результаты исследования показали, что с течением времени выработка электроэнергии солнечными модулями значительно снижается из-за запыления поверхности, в среднем она снизилась на 7,1% по сравнению с регулярно очищаемым модулем.

Нами были проанализированы десятки публикаций по вопросу загрязнений солнечных модулей. Эти обзоры включают сотни исследований, которые касаются проблем загрязнения для разных стран и условий эксплуатации. Большая часть работ посвящена способам очистки уже загрязненных пылью модулей и их характеристикам. И практически нет работ по предотвращению запыления и устройствам защиты. В одной из обзорных статей авторы предложили использовать специальную гидрофобную пленку или химическое покрытие [20]. Такое покрытие не позволяет пыли прилипать к поверхности модуля, но в этом случае требуется очищать само покрытие. Таким образом, чтобы этот метод был эффективным, необходимо наличие до-

жда или воды для смыва слоя пыли с самой пленки.

Таким образом, для районов, где наблюдаются те или иные виды загрязнения, проблема снижения генерации энергии солнечными модулями является очень актуальной, требующей решения не только за счет очистки поверхностей модулей, но и за счет разработки высокоэффективных средств защиты и предотвращения модулей от загрязнения.

На основе проведенного литературного обзора, экспериментальных исследований и полученных в связи с этим выводов, был предложен способ предотвращения загрязнения поверхностей солнечных модулей с использованием устройств на базе электронно-ионной технологии улавливания частиц пыли силами электрического поля устройства [21]. В настоящее время идет оформление патента на данный способ.

В сочетании устройств защиты модулей от загрязнения с регулярной (не менее одного раза в месяц) очисткой солнечных модулей возможно сохранение их работоспособности на заявляемом производителями устройств уровне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной проблемой, снижающей генерацию электроэнергии солнечными модуля-

ми, является их загрязнение пылевыми частицами. В зависимости от региона это загрязнение проявляется по-разному. В странах, находящихся вблизи пустынь и песчаных районов, преобладают крупнодисперсные пылевые частицы, для промышленных же районов характерно наличие мелкодисперсной пыли, выбрасываемой предприятиями. Но и в том и в другом случае происходит затенение поверхности модулей из-за пылевого слоя, снижающего проникновение солнечных лучей. При длительных перерывах между очистками производительность солнечных модулей может снижаться в среднем от 7% до 46% в зависимости от степени загрязнения и региона.

Полученные экспериментальные результаты по исследованию периодов загрязнения и снижению эффективности работы модулей в условиях г. Челябинск и г. Бохтар не явля-

ются усредненными и не распространяются на остальные территории данных регионов, но считаются показательными в отношении проблем снижения генерации солнечными модулями из-за влияния основных видов загрязнений.

Для обеспечения стабильной выработки электроэнергии энергоустановками необходима не только их очистка, но, прежде всего, разработка и использование устройств, предотвращающих запыление поверхности модулей. При этом необходимо учитывать химические и электрофизические свойства пыли, их дисперсность и адгезию. Устройства защиты должны быть просты в эксплуатации, безопасны, не создавать дополнительного затенения модулей, обеспечивать максимальную чистоту поверхности модуля и снизить периодичность очистки.

Список источников

1. Hussain A., Batra A., Pachauri R. An experimental study on effect of dust on power loss in solar photovoltaic module // *Renewables*. 2017. Vol. 4. Iss. 9. <https://doi.org/10.1186/s40807-017-0043-y>.
2. Zarei T., Abdolzadeh M., Yaghoob M. Comparing the impact of climate on dust accumulation and power generation of PV modules: a comprehensive review // *Energy for Sustainable Development*. 2022. Vol. 66. P. 238–270. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.12.005>.
3. Goudie A.S. Dust storms: recent developments // *Journal of Environmental Management*. 2009. Vol. 90. Iss. 1. P. 89–94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.007>.
4. Goudie A.S. Desert dust and human health disorders // *Environment International*. 2014. Vol. 63. P. 101–113. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.10.011>.
5. Sarver T., Al-Qaraghuli A., Kazmerski L.L. A comprehensive review of impact of dust on the use of solar energy: history, investigations, results, literature and mitigation approaches // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 22. P. 698–733. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.065>.
6. Kumar S., Chaurasia P.B.L. Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panel in Jaipur (Rajasthan) // *International Journal of Science and Research*. 2014. Vol. 3. Iss. 6. P. 1690–1693.
7. Adinoyi M.J., Said S.A.M. Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules // *Renewable Energy*. 2013. Vol. 60. P. 633–636. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.014>.
8. Rajput D.S., Sudhakar K. Effect of dust on performance of solar PV panel // *International Journal of ChemTech Research*. 2013. Vol. 5. Iss. 2. P. 1083–1086.
9. Darwish Z.A., Kazem H.A., Sopian K., Alghoul M.A., Chaichan M.T. Impact of some environmental variables with dust on solar photovoltaic (PV) performance: review and research status // *International Journal of Energy and Environment*. 2013. Vol. 7. Iss. 4. P. 152–159.
10. Mani M., Pillai R. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: research status, challenges and recommendations // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14. Iss. 9. P. 3124–3131. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065>.
11. Elminir H.K. Effect of dust on the transparent cover of solar collectors // *Energy Conversion and Management*. 2006. Vol. 47. Iss. 18-19. P. 3192–3203. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.02.014>.
12. Al-hasan A.Y., Ghoneim A.A. A new correlation between photovoltaic panel's efficiency and amount of sand dust accumulated on their surface // *International Journal of Sustainable Energy*. 2005. Vol. 24. Iss. 4. P. 187–197. <https://doi.org/10.1080/14786450500291834>.
13. Ali H.M., Zafar M.A., Bashir M.A., Nasir M.A., Ali M., Siddiqui A.M. Effect of dust deposition on the performance of photovoltaic modules in Taxila, Pakistan // *Thermal Science*. 2017. Vol. 21. Iss. 2. P. 915–923. <https://doi.org/10.2298/TSCI140515046A>.
14. Mekhilef S., Saidur R., Kamliarvestani M. Effect of Dust. Humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16. Iss. 5. P. 2920–2925. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.012>.
15. Jaszczur M., Teneta J., Styszko K., Hassan Q., Burzyńska P., Marcinek E., et al. The field experiments and model of the natural dust deposition effects on photovoltaic module efficiency // *Environmental Science and*

Pollution Research. 2019. Vol. 26. P. 8402–8417.
<https://doi.org/10.1007/s11356-018-1970-x>.

16. Назаров Б.И., Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Абдурасулова Н.А., Абдуллаева М.С. О температурных эффектах пыльной мглы // Доклады академии наук Республики Таджикистан. 2010. Т. 53. № 6. С. 454–459.

17. Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B. Investigation of surface temperature of solar modules using holographic overheating protection // IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (Magnitogorsk, 4–5 October 2019). Magnitogorsk: IEEE, 2019. P. 80–84.
<https://doi.org/10.1109/PEAMI.2019.8915414>.

18. Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б. Повышение энергетической эффективности работы солнечных модулей за счет снижения температуры поверхности //

Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 2. С. 489–499.

19. Kirpichnikova I.M., Sudhakar K., Makhsumov I.B., Martyanov A.S., Priya S.S. Thermal model of photovoltaic module with heat protective film // Case Studies in Thermal Engineering. 2022. Vol. 30. P. 101744.
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101744>.

20. Deb D., Brahmabhatt N.L. Review of yield increase of solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 82. Part 3. P. 3306–3313. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.014>.

21. Kirpichnikova I.M., Shestakova V.V. Electron-Ion technology as protection of solar modules from contamination // International Russian Automation Conference. 2019. Vol. 641. P. 554–562. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39225-3_60.

References

1. Hussain A., Batra A., Pachauri, R. An experimental study on effect of dust on power loss in solar photovoltaic module. *Renewables*. 2017;4(9).

<https://doi.org/10.1186/s40807-017-0043-y>.

2. Zarei T., Abdolzadeh M., Yaghoub M. Comparing the impact of climate on dust accumulation and power generation of PV modules: a comprehensive review. *Energy for Sustainable Development*. 2022;66:238-270.
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.12.005>.

3. Goudie A.S. Dust storms: recent developments. *Journal of Environmental Management*. 2009;90(1):89-94.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.007>.

4. Goudie A.S. Desert dust and human health disorders. *Environment International*. 2014;63:101-113.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.10.011>.

5. Sarver T., Al-Qaraghuli A., Kazmerski L.L. A comprehensive review of impact of dust on the use of solar energy: history, investigations, results, literature and mitigation approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;22:698-733.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.065>.

6. Kumar S., Chaurasia P.B.L. Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panel in Jaipur (Rajasthan). *International Journal of Science and Research*. 2014;3(6):1690-1693.

7. Adinoyi M.J., Said S.A.M. Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules. *Renewable Energy*. 2013;60:633-636.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.014>.

8. Rajput D.S., Sudhakar K. Effect of dust on performance of solar PV panel. *International Journal of ChemTech Research*. 2013;5(2):1083-1086.

9. Darwish Z.A., Kazem H.A., Sopian K., Alghoul M.A., Chaichan M.T. Impact of some environmental variables with dust on solar photovoltaic (PV) performance: review and research status. *International Journal of Energy and Environment*. 2013;7(4):152-159.

10. Mani M., Pillai R. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Re-*

views. 2010;14(9):3124-3131.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065>.

11. Elminir H.K. Effect of dust on the transparent cover of solar collectors. *Energy Conversion and Management*. 2006;47(18-19):3192-3203.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.02.014>.

12. Al-hasan A.Y., Ghoneim A.A. A new correlation between photovoltaic panel's efficiency and amount of sand dust accumulated on their surface. *International Journal of Sustainable Energy*. 2005;24(4):187-197.
<https://doi.org/10.1080/14786450500291834>.

13. Ali H.M., Zafar M.A., Bashir M.A., Nasir M.A., Ali M, Siddiqui A.M. Effect of dust deposition on the performance of photovoltaic modules in Taxila, Pakistan. *Thermal Science*. 2017;21(2):915-923.
<https://doi.org/10.2298/TSCI140515046A>.

14. Mekhilef S., Saidur R., Kamliarvestani M. Effect of Dust. Humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012;16(5):2920-2925.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.012>.

15. Jaszczur M., Teneta J., Styszko K., Hassan Q., Burzyńska P., Marcinek E., et al. The field experiments and model of the natural dust deposition effects on photovoltaic module efficiency. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019;26:8402-8417.
<https://doi.org/10.1007/s11356-018-1970-x>.

16. Nazarov B.I. Abdullaev S.F., Maslov V.A., Abdurасuloва N.A., Abdullaeva M.S. On temperature effects of dusty haze. *Doklady akademii nauk respublikii Tadjhikistan*. 2010;53(6):454-459. (In Russ.).

17. Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B. Investigation of surface temperature of solar modules using holographic overheating protection. In: *IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice*. 4–5 October 2019, Magnitogorsk. Magnitogorsk: IEEE; 2019, p. 80-84.
<https://doi.org/10.1109/PEAMI.2019.8915414>.

18. Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B. Increasing energy efficiency of work of solar modules by decreasing surface

temperature. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of the Tula State University*. 2020;2:489-499. (In Russ.).

19. Kirpichnikova I.M., Sudhakar K., Makhsumov I.B., Martyanov A.S., Priya S.S. Thermal model of photovoltaic module with heat protective film. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022;30:101744.

<https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101744>.

20. Deb D., Brahmabhatt N.L. Review of yield increase of

solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;82(3):3306-3313. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.014>.

21. Kirpichnikova I.M., Shestakova V.V. Electron-Ion technology as protection of solar modules from contamination. *International Russian Automation Conference*. 2019;641:554-562. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39225-3_60.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кирпичникова Ирина Михайловна,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры электрических станций,
сетей и систем электроснабжения,
Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет),
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, Россия
✉ kirpichnikovaim@susu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4078-8790>

Махсумов Илхом Бурхонович,

к.т.н.,
ст. преподаватель, заведующий кафедрой
нетрадиционных возобновляемых источников
энергии и теплоэнергетики,
Институт энергетики Таджикистана,
733036, р-н Кушониён, ул. Н. Хусрава, 73,
Республика Таджикистан
messi.ilhom@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-7985-1315>

Шестакова Валерия Вячеславовна,

аспирант,
Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет),
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, Россия
mrsshestakova@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 23.10.2022; одобрена после рецензирования 22.12.2022; принята к публикации 17.02.2023.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Irina M. Kirpichnikova,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department
of Power Plants, Networks and Power Supply Systems,
South Ural State University,
76, Lenin pr., Chelyabinsk 454080, Russia
✉ kirpichnikovaim@susu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4078-8790>

Ilkhom B. Makhsumov,

Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer,
Head of the Department of
Unconventional Renewable Energy Sources
and Thermal Power Engineering,
Institute of Energy of Tajikistan,
73, N. Khusrava St., Kushoniyon district,
733036, Tajikistan
messi.ilhom@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-7985-1315>

Valeriya V. Shestakova,

Postgraduate Student,
South Ural State University,
76, Lenin pr., Chelyabinsk 454080, Russia
mrsshestakova@mail.ru

Contribution of the authors

All authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 23.10.2022; approved after reviewing 22.12.2022; accepted for publication 17.02.2023.