

# ВЛИЯНИЕ ОСАЖДЕНИЯ ПЫЛИ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ

**Х. Д. Мамарасулова**

Джизакский государственный педагогический университет, Ш. Рашидова-4,  
Джизак, 130100, Узбекистан

## Аннотация

Солнечная энергия преобразуется в электрическую непосредственно с помощью полупроводниковых материалов, используемых в фотоэлектрических (PV) панелях. Несмотря на большие достижения в технологии полупроводниковых материалов, в последние годы эффективность панелей остается достаточно низким. На эффективность панели влияет множество факторов, таких как угол наклона, затенение, пыль, уровень солнечной радиации, температура и потери в проводнике. В настоящей работе было проведено предварительное исследование о влиянии осаждения пыли на производительность фотоэлектрической системы. Исследование включало моделирование панелей в помещении, а также эксперименты с панелями на открытом испытательном стенде. Влияние пыли на эксплуатационные характеристики панелей исследовали путем получения ВАХ идентичных панелей, находившихся в одинаковых условиях инсоляции и температуры окружающей среды, при этом одна из панелей сохраняла пыль на своей поверхности, а другая была очищена от пыли.

**Ключевые слова:** мощность и вольт-амперной характеристики фотоэлектрической панели, Солнечные фотоэлектрические электростанции, загрязнения, параметры окружающей среды

## Введение

Солнечные фотоэлектрические электростанции идеально расположены в регионах с высоким уровнем инсоляции. На фотоэлектрические характеристики влияют высокие температуры элементов, загрязнение, несоответствие и другие потери, связанные с балансом систем. Крайне важно понимать значение каждой из этих потерь для производительности системы. Загрязнение, во многом зависящее от условий установки, представляет собой сложную проблему, требующую точной количественной оценки. Оседание пыли на поверхности панелей может быть или не быть равномерным в зависимости от местности и факторов окружающей среды, таких как температура окружающей среды, ветер и осадки. Очень важно исследовать влияние оседания пыли на рабочие характеристики фотоэлектрических систем, чтобы лучше понять потери производительности, связанные с загрязнением. Вольт-амперные характеристики (IV) фотоэлектрических панелей дают обширную информацию, необходимую для анализа деградации панелей. В данной статье предпринята попытка понять потери производительности из-за пыли посредством динамического исследования IV-характеристик панелей при различных условиях загрязнения на открытом экспериментальном испытательном стенде. Кроме того, в этой статье обсуждаются

результаты исследования в помещении, моделирующего работу фотоэлектрических панелей при различных режимах осаждения пыли. Параметры окружающей среды, такие как температура окружающей среды, а также местные режимы ветра и пыли, могут существенно влиять на производительность системы. Влияние температуры окружающей среды и ячеек на производительность фотоэлектрической системы достаточно хорошо изучено теоретически и подтверждено моделированием в аэродинамической трубе. Однако потери производительности, связанные с осаждением пыли, являются проблемой, которая не рассматривалась всесторонне в предыдущих исследованиях, поскольку ее сложно точно определить количественно. Исследования [1, 2] показывают, что производительность может снижаться на 20% каждый месяц из-за накопления пыли на грязных поверхностях ячеек. Более того, эксперименты, проведенные в [3], показывают, что высокие скорости ветра способствуют накоплению пыли на поверхностях. Пока не проводилось исследований, позволяющих коррелировать количество осаждения пыли и, как следствие, снижение производительности фотоэлектрических систем.

Тропические регионы, такие как юго-запад Центральной Азии, особенно уязвимы к накоплению пыли на фотоэлектрических установках. Тем не менее, ухудшение характеристик фотоэлектрических систем из-за пыли сильнее в тропических регионах, где массивы установлены с меньшими углами наклона. Оседание пыли и песка на поверхности ячеек может быть равномерным или неравномерным в зависимости от размера фотоэлектрических массивов и рельефа местности. Панели меньшего размера могут иметь равномерное накопление пыли, и снижение производительности панелей может быть одинаковым для нескольких панелей в массиве. Однако характер накопления пыли может быть неодинаковым для панелей с большей площадью или панелей, расположенных на больших расстояниях друг от друга в модуле. Поэтому падение производительности панели из-за осаждения пыли может не быть одинаковым по всему массиву и следовательно, более сложно предсказать такую установку. Считается, что окружающий ветер и осадки являются естественными очистителями пыли с фотоэлектрических поверхностей. Напротив, видно, что ветер и дождь часто способствуют оседанию пыли на фотоэлектрических поверхностях. Высокие скорости ветра увеличивают склонность к осаждению пыли на поверхностях фотоэлектрических панелей и вызывают падение выходной мощности панели. Дожди способствуют очистке фотоэлектрических поверхностей, когда вода способствует удалению частиц пыли при стекании с поверхности [5]. Однако если дождевая вода испаряется с поверхности ФЭ, не стекая, это приводит к более сильному прилипанию пыли к поверхности. Крайне важно исследовать влияние оседания пыли на производительность фотоэлектрической системы, чтобы понять потери производительности, связанные только с загрязнением. Это помогло бы оценить масштабность проблемы осаждения пыли с точки зрения потенциальных потерь при подаче энергии в сеть и оценить экономические потери для электростанции. Такое расследование также облегчило бы технико-экономическое обоснование механизмов очистки и разработку соответствующих графиков очистки.

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 [4]. 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, полусухих 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. На данный момент в мировом производстве электроэнергии, солнечная энергетика занимает небольшую долю, однако её роль в энергетике стремительно растёт. Распространение солнечной энергетики в последнее время вызвано не только различными мерами государственной поддержки, но и результатами её проведения, например, экономической конкурентоспособностью. Похвастаться «солнечными» гигаваттами Россия пока не может, поскольку обсуждаемая отрасль находится в начальной стадии развития. Для строительства солнечных электростанций выбираются изолированные энергозоны, где их использование имеет высокую эффективность, а также регионы, характеризующиеся наиболее благоприятными природно-климатическими условиями [6].

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. Выбросы твердых частиц в окружающую среду представляют собой серьезную опасность для здоровья, вызывая ежегодно миллионы преждевременных смертей. Также широко известно, что твёрдые частицы влияют на поступающую солнечную радиацию, и поэтому они обычно учитываются в оценках изменения климата. Из этого логически следует, что твёрдые частицы будут также влиять на выработку солнечной энергии. Мы изучили воздействия окружающих и осажённых твёрдых частиц, включая пыль и антропогенные частицы на поверхность солнечных панелей. Нами были собраны образцы пыли с панелей солнечных батарей и помещены в чистые сухие контейнеры. Масса пыли определялась с помощью электронного баланса с нижним пределом обнаружения массы 200 мкг. Площадь осаждения собранных проб составила 1000x1640мм. Распределение по размерам нерастворимых в воде частиц измерялось на образцах с помощью лазерного дифракционного анализатора размеров частиц Cilas, модели 1190. Таким образом, они смогли определить не только общую массу осажённой пыли, но и фракцию углерода (в виде карбоната), связанную с пылью.

На рисунке 1 показано осаждение пыли на солнечных панелях за 1 месяц. Частично очищенные солнечные панели показывают, что твёрдые частицы перекрывают поверхность панели, тем самым могут влиять на производство солнечной энергии.

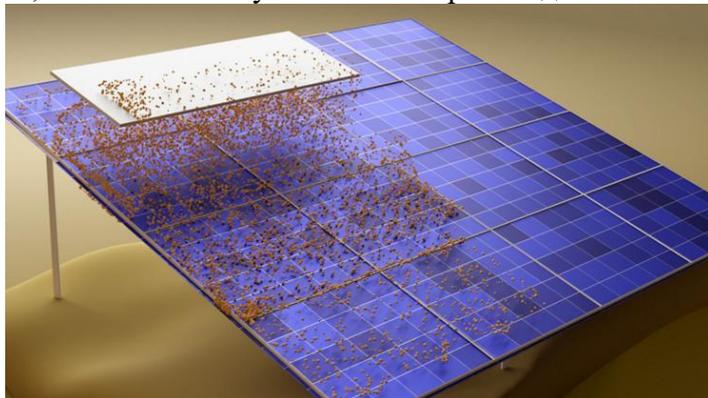


Рисунок 1- Загрязненные солнечные панели

На рисунке 1 видно, что при очистке поверхности солнечных панелей, каждые 25-30 дней, выработка электрической энергии увеличивается в среднем на ~ 55% после каждой очистки. Большая часть атмосферных твёрдых частиц зависит не только от ветров, а также от антропогенных источников загрязнения, таких как сжигание мусора, отходов, выбросов промышленных предприятий и выработки электроэнергии посредством сжигания ископаемого топлива. В связи с этим возникает необходимость повышения эффективности эксплуатации солнечных модулей. Для того чтобы сделать это, важно вовремя выявлять наличие инородных предметов и загрязнений различного характера на поверхности солнечных модулей, а также своевременно удалять их. Эффективность солнечных модулей и ресурс их работы главным образом зависит от степени их загрязнённости. Поскольку при идеально чистой поверхности и номинальных условиях выработка электрической энергии составляет 18%, любое загрязнение приводит к затенению части поверхности солнечных элементов, что способствует снижению поглощения ими солнечной энергии, а значит и количеству вырабатываемой электрической энергии. Поэтому очень важно, как минимум, поддерживать КПД на уровне номинального. Для этого нужно не допустить попадание на поверхность солнечных фотоэлектрических модулей механических частиц, либо регулярно очищать поверхность от них. На данный момент существует несколько способов защиты и очистки солнечных фотоэлектрических модулей от механических частиц. Все они имеют свои преимущества и недостатки.

#### *Ручная очистка*

Наиболее распространенным способом борьбы с запыленностью и загрязненностью солнечных модулей является ручная чистка обслуживающим персоналом с применением современного оборудования, представляющим собой длинные штанги со стационарными или вращающимися щетками, а также встроенным шлангом для подачи моющей жидкости. Моющая жидкость должна быть очищена, и содержать в себе минимум примесей, в этом случае, после высыхания, на солнечных модулях не будут оставаться разводы и следы от капель, что в противном случае приведёт к снижению их производительности. Способ ручной очистки солнечных модулей рационален и малозатратен, в том случае, если площадь электростанции невелика.



## Автоматизированная очистка

Автоматизация чистки роботизированной техникой позволяет экономить на рабочей силе и повышает эффективность очистки за счёт исключения человеческого фактора. Небольшие роботы устанавливаются на направляющих вдоль ряда панелей и совершают перемещение вдоль панелей, очищая их с помощью специальной щетки, разработанной таким образом, чтобы не повреждать солнечную панель.

Прямое влияние осаждения пыли на производительность фотоэлектрической системы можно оценить путем сравнения вольт-амперных характеристик (I-V) панелей с осаждением пыли на их поверхности и без нее. ВАХ можно рассматривать как зеркало исследуемого фотоэлектрического элемента, поскольку каждый фотоэлектрический элемент создает уникальную ВАХ-кривую, форма которой зависит от условий инсоляции, температуры окружающей среды, рабочей температуры элемента, воздействия ветра, загрязнения и потерь из-за несоответствия и других факторов. Потери, связанные с балансом системы в момент ее отслеживания. Следовательно, сравнение ВАХ двух идентичных панелей, сохраняющих все факторы окружающей среды одинаковыми, но изменяющихся, позволяет выделить влияние этого конкретного фактора на производительность системы. Этот сравнительный подход был принят в настоящем исследовании для изучения влияния осаждения пыли на рабочие характеристики фотоэлектрических модулей при условии, что панели подвергаются воздействию одинаковых параметров окружающей среды, но с разным количеством осаждения пыли.

## 2. Методы и аппаратура

Двойной метод был использован для получения ВАХ от двух идентичных панелей: одна панель с осаждением пыли, а другая панель без пыли. В первом методе показания I-V записывались с панелей, помещенных в помещении и освещенных галогенными лампами, имитирующими солнечный свет. Второй метод заключался в регистрации ВАХ с идентичных панелей, установленных на открытом экспериментальном стенде и подвергавшихся воздействию естественного солнечного света. Обе панели в обеих установках подвергались идентичным условиям окружающей среды и отличались только отложениями пыли.

Электрические характеристики солнечных модулей PS-P36 150 Вт	
Максимальная мощность (P <sub>max</sub> )	37.0 Вт
Напряжение при (V <sub>mm</sub> )	18.41 В
Напряжение холостого хода (V <sub>oc</sub> )	22,06 В
Ток при (I <sub>mm</sub> )	2.15 А
Ток короткого замыкания (I <sub>sc</sub> )	2.63 А
Температурный коэффициент I <sub>sc</sub> (KI)	0,058 А/°С
Количество ячеек в серии (N)	36



Для моделирования солнечной энергии в помещении две идентичные панели указанных номиналов были установлены рядом параллельно земле. Панели были помещены в темную комнату, и единственным освещением панелей была пара галогенных ламп, имитирующих солнце, интенсивность которых можно было изменять, подвешенных вертикально над каждой панелью, как показано на рис. 1. Одна из панелей оставалась свободной. пыли на протяжении всего моделирования солнечной активности, в то время как на поверхности другой панели отложилась пыль. На рис. 1 панель слева очищена от пыли, а панель справа — нет. ВАХ были построены и зарегистрированы с использованием анализаторов солнечных модулей MECO. Интенсивность ламп измерялась и устанавливалась с помощью измерителя солнечной энергии TENMARS, а инфракрасный термометр CENTER использовался для измерения нижней температуры поверхности, которая считается хорошим приближением к рабочей температуре элемента [6]. ВАХ для внутренней солнечной батареи настройки симулятора записывались двумя партиями показаний. С целью исключения влияния повышения рабочей температуры ячеек на работоспособность панелей в процессе эксплуатации был записан первый набор данных при варьировании интенсивности падающего на панели света от 200 Вт/м<sup>2</sup> до 800 Вт/м<sup>2</sup> при сохранении температура панелей постоянной. Таким образом, ВАХ, полученные таким образом в этом первом наборе, не зависят от влияния температуры элемента на характеристики двух панелей. Во втором наборе записей интенсивность падающего света снова изменялась от 200 Вт/м<sup>2</sup> до 800 Вт/м<sup>2</sup> с шагом 100 Вт/м<sup>2</sup>, позволяя при этом поверхностям клеток достигать максимальных температур при этих уровнях инсоляции. Результаты испытаний, проведенных на установке внутреннего солнечного имитатора, были представлены и обсуждены в следующем разделе.



Fig. 1. Indoor solar simulator setup.

Рисунок 2. Частично очищенные солнечные панели

### 3. Результаты и обсуждения

Установка в помещении способствовала лучшему контролю условий испытаний, чем испытательный стенд на открытом воздухе. Поскольку испытания в помещении проводились в темном закрытом помещении, падающий свет на панели можно было регулировать до желаемых значений и поддерживать постоянным в течение длительного



периода времени. Кроме того, выключив лампы, панели можно было вернуть к температуре окружающей среды в помещении, которая оставалась более или менее постоянной на протяжении всего периода исследований. Это позволило более всесторонне изучить явление пыли, влияющее на характеристики панели I-V. Моделирование солнечного излучения в помещении было повторено на открытом экспериментальном испытательном стенде, чтобы проверить, можно ли наблюдать подобное поведение в естественных условиях солнечного излучения и температуры окружающей среды. В обеих ситуациях IV-характеристики панели, накопившей пыль, сравнивались с характеристиками чистой панели.

### 3.1 Установка солнечного симулятора в помещении

Из двух панелей, использованных для моделирования в помещении, одна панель была полностью очищена от пыли, а на поверхности второй панели отложилось видимое количество пыли. На микроскопических изображениях на рис. 3 видно отложение пыли на панелях. Можно отметить, что почти 70% площади поверхности второй панели было покрыто частицами пыли. В первом наборе показаний ВАХ были построены при интенсивности 400 Вт/м<sup>2</sup> при двух различных температурах поверхности клеток, а именно. 40°C и 50°C (рис. 4), а во втором случае — когда температуры обеих панелей были близки к температуре окружающей среды в помещении. Интенсивность галогенных ламп увеличивалась с шагом 100 Вт/м<sup>2</sup>, начиная с 200 Вт/м<sup>2</sup> до 800 Вт/м<sup>2</sup>, что было максимальной силой света ламп. Все показания записывались, когда температура панели достигала 30°C. ВАХ, полученные для двух панелей при 200 Вт/м<sup>2</sup>, 400 Вт/м<sup>2</sup>, 600 Вт/м<sup>2</sup> и 800 Вт/м<sup>2</sup>, воспроизведены здесь на рис. 5-8 соответственно. В таблице 2 выше приведены записи при различной интенсивности средней выходной мощности, тока короткого замыкания, напряжения разомкнутой цепи и температуры элементов, отмеченные при этой интенсивности.

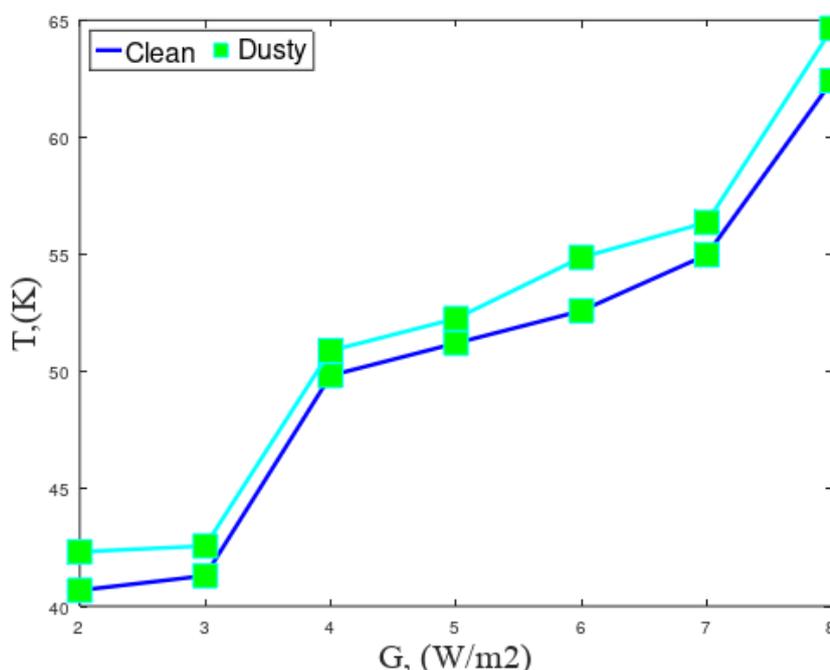
Таблица 2. Записи исследования моделирования в помещении

G (W/m <sup>2</sup> )	T (°C)		P (W)		I(A)		V(V)	
	Чистый	Пыль	Чистый	Пыль	Чистый	Пыль	Чистый	Пыль
200	40.68	42.32	0.84	0.58	0.073	0.048	17.72	17.64
300	41.30	42.57	0.98	0.64	0.082	0.054	17.86	17.69
400	49.84	50.90	1.84	1.11	0.157	0.097	18.26	18.07
500	51.22	52.27	2.83	1.69	0.233	0.136	18.59	18.33
600	52.60	54.88	3.31	1.96	0.269	0.158	18.63	18.38
700	54.99	56.37	3.86	2.33	0.312	0.181	18.62	18.39
800	62.42	64.65	3.97	2.47	0.339	0.195	18.36	18.13

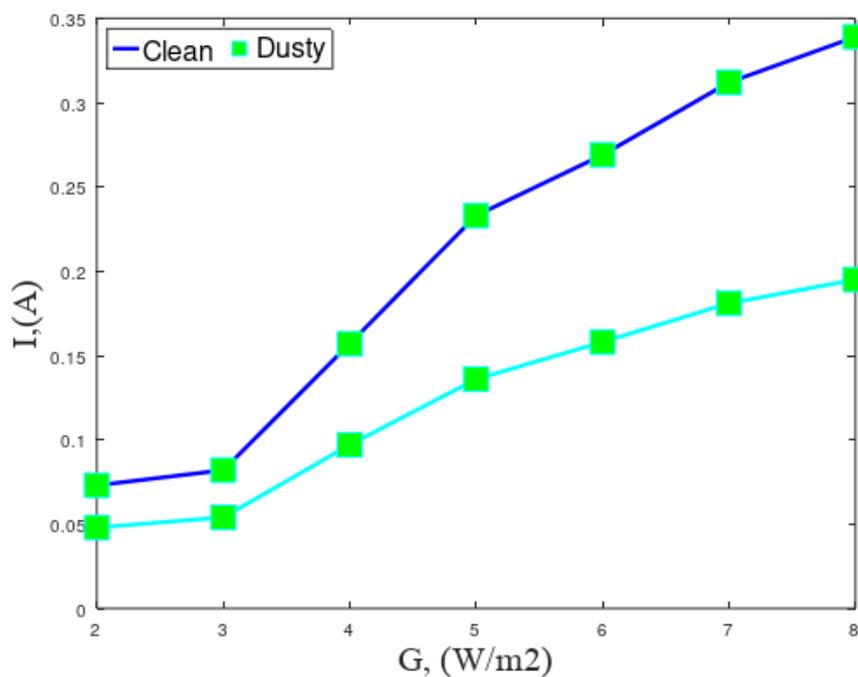
Из таблицы и соответствующих графиков можно сделать следующие наблюдения:

1. Отложение пыли на панелях влияет на рабочую температуру элементов. Было отмечено, что пыльная панель работает на 1-2°C выше, чем чистая панель при том же падении света. Это повышение температуры элемента из-за пыли еще больше снижает

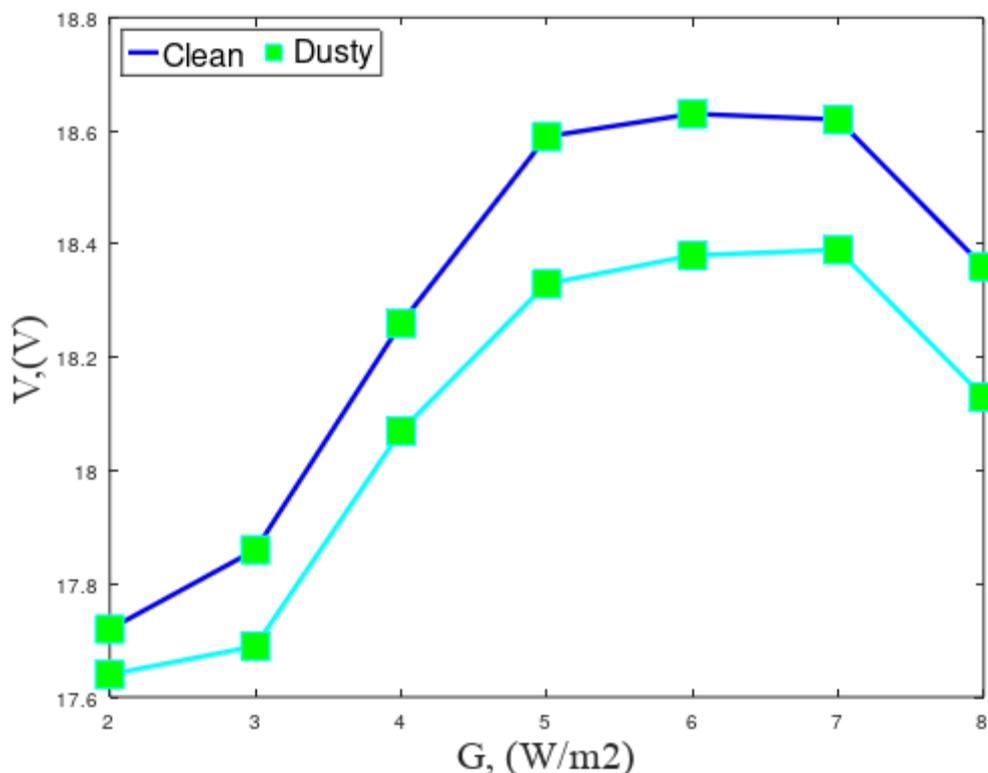
электрический КПД панели. Повышение температуры поверхности элемента с 40°C до 50°C привело к небольшому увеличению тока короткого замыкания как чистой, так и запыленной панели, что, однако, сопровождалось большим падением напряжения холостого хода, вызывающим общие потери выходная мощность из-за повышения рабочей температуры. Таким образом, совокупный эффект осаждения пыли и повышения температуры поверхности ячеек еще больше ухудшает производительность системы.



2. Однако пыль оказывает существенное влияние на ток короткого замыкания, создаваемый панелями. Чистая панель всегда давала более высокий выходной ток, чем пыльная панель. Эта разница в токовых выходах увеличивалась по мере увеличения интенсивности падающего света с 200 Вт/м<sup>2</sup> до 800 Вт/м<sup>2</sup>, т.е. токовая мощность пыльной панели уменьшалась с увеличением интенсивности падающего света, как можно видеть в предпоследнем столбце таблицы. Таблица 2, в которой указано соотношение тока короткого замыкания пыльной панели к току короткого замыкания чистой панели. Таким образом, отложение пыли оказывает существенное влияние на выходной ток фотоэлектрических систем.

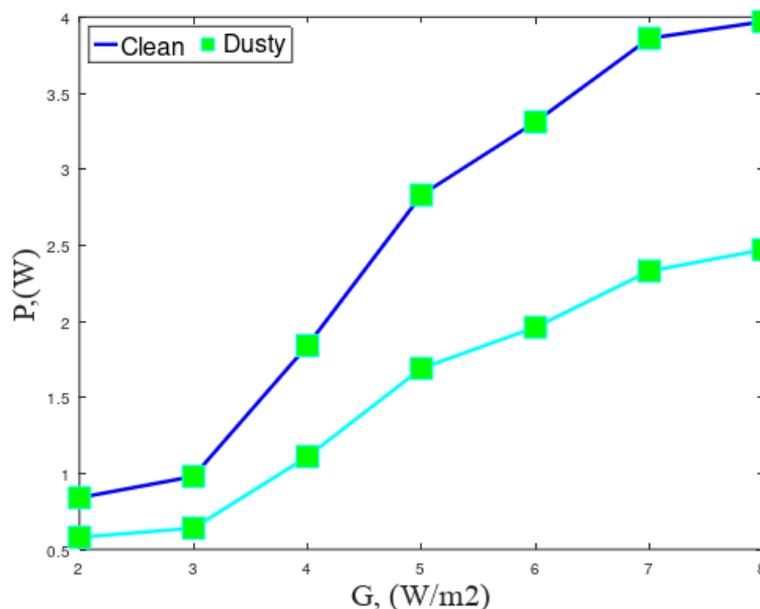


3. Из графиков можно отметить, что осаждение пыли не оказывает существенного влияния на напряжение холостого хода панелей. Напряжение холостого хода пыльной панели лишь немного ниже, чем напряжение чистой панели при любой интенсивности падения света.



Это подтверждается последней колонкой таблицы 2, где указано отношение напряжения холостого хода пыльной панели к напряжению холостого хода чистой панели. Это соотношение остается близким к 100% для всех интенсивностей падения света. Таким образом, предполагается, что пыль не оказывает существенного влияния на напряжение системы.

4. Замечена корреляция между плотностью осаждения пыли и потерями мощности, связанными с оседанием пыли на фотоэлектрических панелях. В случае экспериментальной установки на открытом воздухе, где плотность пыли составила 1,4 г/м<sup>2</sup>, потери мощности из-за пыли составили 5-6% от максимальной выходной мощности, тогда как в случае установки для моделирования в помещении, где пыль плотность составила 7,155 г/м<sup>2</sup>, связанные с этим потери мощности составили 45-55% от максимально возможной выходной мощности чистой панели. Эта корреляция заслуживает дальнейшего исследования.



5. Никаких существенных различий в рабочих температурах элементов из-за осаждения пыли на испытательном стенде не наблюдалось.

#### 4. Выводы

В настоящей работе было проведено предварительное исследование о влиянии осаждения пыли на производительность фотоэлектрической системы. Исследование включало моделирование панелей в помещении, а также эксперименты с панелями на открытом испытательном стенде. Влияние пыли на эксплуатационные характеристики панелей исследовали путем получения ВАХ идентичных панелей, находившихся в одинаковых условиях инсоляции и температуры окружающей среды, при этом одна из панелей сохраняла пыль на своей поверхности, а другая была очищена от пыли. Сравнительный анализ ВАХ привел к пониманию явления потери мощности из-за накопления пыли на фотоэлектрических поверхностях. Было замечено, что осаждение пыли существенно не изменяет напряжение холостого хода фотоэлектрических систем. Однако на ток короткого замыкания влияет отложение пыли: 30–40 % в помещении и 4–5 % на открытом стенде. Это падение выходного тока и, как следствие, падение выходной мощности из-за пыли представляет собой огромную потерю электроэнергии и экономический ущерб для фотоэлектрических электростанций, учитывая масштаб электростанций.

#### Литература

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..
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.



3. Goudie A.S. Dust storms: recent developments . Journal of Environmental Management. 2009. Vol. 90. Iss. 1. P. 89-94.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Алиев, Г. М.-А. Техника пылеулавливания и очистка промышленных газов..Г. М.-А. Алиев - М.: Metallurgiya, 1986. - 544 с.
8. Белоусов, В. В. Теоретические основы процессов газоочистки: учебник для вузов. В. В. Белоусов - М.: Metallurgiya, 1988. - 256 с.
9. Способ очистки газов от пыли: пат. № 1758938 Рос. Федерация: МКИ6 В03С3/00/ Дуров В. В., Вавилов В. А., Медведев О. А. НПО Союзстромэкология. БИ№3, 1993.
10. Ужов, В. Н. Очистка промышленных газов от пыли. В. Н. Ужов, А. В. Вальдберг, Б. И. Мягков, И. К. Решидов. - М.: Химия, 1981. - 392 с.
11. Deutsch W. Bewegung und Ladung der Elektrizitatstrader im Zylinderkondensator - Annalen der Physik. 1922, Bd68, №12 - P.335-344
12. Mike, H. Large Reductions in Solar Energy Production Due to Dust and Particulate Air Pollution. H. Mike, J. James, T. Drew, and oth. . Environ. Sci. Technol. Lett. - 2017. - V. 4(8). - P. 339-344.