

УДК 621.311.26

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ ОТ ПЫЛЕВЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

И.М. Кирпичникова, В.В. Шестакова

В статье исследуются проблемы снижения выработки электроэнергии солнечными электростанциями из-за загрязнений поверхности солнечных модулей частицами пыли, атмосферными осадками, промышленными отходами и биологическими загрязнениями в различных климатических условиях. В статье представлен расчет эффективности улавливания частиц пыли в зависимости от скорости воздушного потока. Представленные результаты исследований могут быть приняты во внимание при строительстве и эксплуатации солнечных электростанций, что приведет к значительному увеличению выработки электроэнергии и снизит экономические затраты на эксплуатацию и обслуживание.

Ключевые слова: солнечная панель, загрязнение, очистка, эффективность.

Введение

Установки на основе возобновляемых источников энергии плотно вошли в нашу жизнь и поставляют электрическую и тепловую энергию как крупным предприятиям, так и частным потребителям.

На сегодняшний день солнечная энергия – это одна из немногих абсолютно чистых альтернатив для ископаемого топлива. К сожалению, энергия солнца используется далеко не повсеместно. Несмотря на то, что возможности солнечного источника энергии и тепла обширны и доступны, есть обстоятельства, которые не позволяют использовать его на 100 %.

Одной из основных проблем, сдерживающих широкое внедрение солнечных электростанций, является низкий коэффициент преобразования солнечной энергии в электрическую [1]. Эффективность использования солнечного модуля может падать по ряду причин, вызывных как природными, так и техногенными факторами. Природные загрязнения и промышленная пыль, которые обитают практически во всех уголках нашей планеты, оседают на поверхности солнечного модуля и снижают КПД его работы на 25–30 % из-за затенения поверхности и снижения поглощения ею солнечных лучей [2].

Таким образом, встает вопрос о непосредственном выборе способа очистки поверхности солнечных модулей. Он должен быть экономически целесообразным, экологически чистым и не должен нарушать нормы здравоохранения.

На данный момент отсутствуют промышленные комплексные технологии по очистке поверхностей солнечных модулей. В основном используется ручной способ с применением от части автоматических систем и роботов.

1. Все эти способы не могут считаться эффективными, так как требуют затрат человеческого ресурса и больших капиталовложений, их потенциал рассчитан на обработку небольших локальных электростанций, но никак не на огромные солнечные электростанции, занимающие площади в десятки квадратных километров.

На основании вышесказанного, целесообразно предпринять меры по защите поверхностей солнечных панелей от частиц, мешающих преобразованию солнечной энергии независимо от температурных и погодных условий и при отсутствии обслуживающего персонала, с возможностью установки и использования данной системы на уже существующих солнечных панелях. Технический результат должен обеспечить эффективную защиту поверхности солнечной панели и снизить периодичность очистки до 1–2 раза в год.

1. Устройство для защиты солнечных модулей от пылевых частиц

Исследования загрязнений с использованием химического анализа, проведенные Майклом Бергином в Индии, показали, что 92 % их составляет естественная пыль, она легко удаляемая и не наносит серьезных повреждений модулям. Оставшиеся 8 % загрязнений появляются в результате жизнедеятельности человека [3]. Отложение их на поверхности модуля даже в виде тонкой пленки, значительно снижает проникновение солнечных лучей, и, следовательно, снижает производство энергии. Поэтому лучше не допускать загрязнения поверхности модуля, чем затрачивать средства и время на их очистку.

Предлагаемое нами устройство предназначено не для очистки уже загрязненных поверхностей, а для защиты их от мелкодисперсной пыли с размерами частиц от 0,2 до 5 мкм [4]. В качестве метода очистки рассматривается ранее не использовавшаяся в области возобновляемых источников энергии электронно-ионная технология.

Устройство представляет собой систему из сетки горизонтально расположенных тонких проволок, действующей по принципу осадительных пластин, которая расположена над поверхностью солнечного модуля (рис. 1). Чередуюсь, на каждую из проволок сетки подается отрицательный потенциал от источника высокого напряжения (ИВН), а на соседней происходит заземление, тем самым на ней создается положительный потенциал. В качестве солнечной панели, на которой будет установлено устройство очистки, используем модуль PSM4-150 [5].

Частицы пыли, имея биполярный положительный или отрицательный заряд, приближаясь к поверхности модуля, попадают в электрическое поле, создаваемое заряженной сеткой (горизонтально расположенной сетью

проволок). Под действием электрических сил этого поля частицы оседают на проволоке противоположного ее заряду знака.

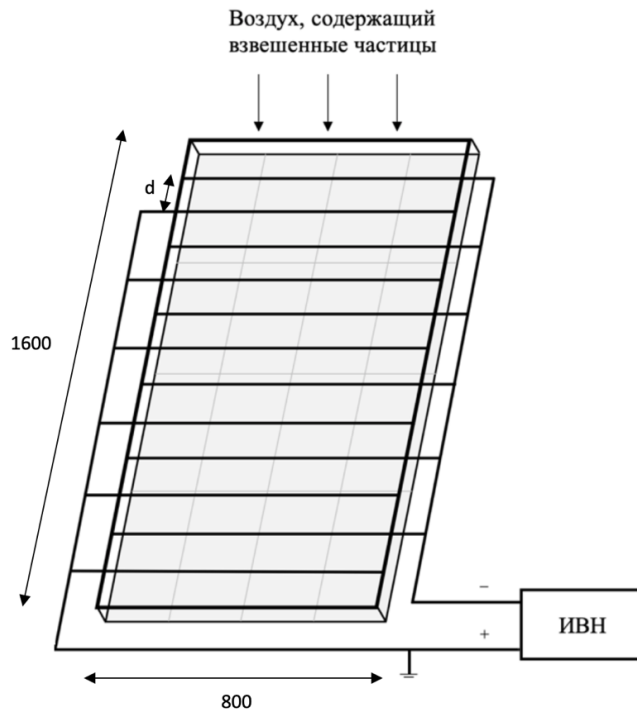


Рис. 1. Устройство защиты солнечного модуля от загрязнения, приведенное для фотоэлектрического модуля PSM4-150

Осаждение пылевых частиц происходит за счет нескольких сил: сила тяжести F_T , кулоновская сила F_K , пандеромоторная сила F_E , определяемая неравномерностью распределения напряженности электрического поля, и сила сопротивления среды F_C , она определяет установившуюся скорость движения частиц. Все эти силы устанавливают законы, по которым частицы движутся в зоне действия устройства.

Эффективность осаждения частиц пыли в устройстве определяется формулой Дейча (1):

$$\eta = 1 - e^{-\frac{v_c \cdot l}{v_B \cdot d}} \quad (1)$$

где v_c – скорость дрейфа пылевой частицы, м/с; l – активная длина осадительных пластин, м; v_B – скорость движения воздушных масс, м/с; d – расстояние между осадительными пластинами, м.

В результате математических преобразований была получена формула (2) для расчёта степени очистки воздуха улавливающим устройством.

$$\eta = 1 - e^{-\frac{(E \cdot q + 2\pi\epsilon_0 a^3 \cdot \frac{\epsilon-1}{\epsilon+2} \cdot \text{grad} E^2) \cdot (1 + \frac{A \cdot l \cdot m}{a}) \cdot l}{6\pi \cdot \mu \cdot a \cdot (1 + \frac{b \cdot a}{x}) \cdot d \cdot v_B}} \quad (2)$$

Для построения теоретической зависимости $\eta = f(v_B)$ эффективности улавливания пылевых частиц от скорости движения воздушных масс, произведем расчет по последней формуле.

Исходные данные для расчёта:

- а) напряжение питания $U_{\text{п}} = 12000 \text{ В}$;
- б) межэлектродное расстояние $d = 0,123 \text{ м}$;
- в) длина электродов $l = 0,8 \text{ м}$;
- г) размер пылевой частицы $a = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$;
- д) электрическая постоянная $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$;
- е) напряженность электрического поля в фильтре $E = 14814,81 \text{ В/м}$;
- ж) градиент напряженности поля $\text{grad}E = 1,08 \cdot 10^9 \text{ В/м}$;
- з) постоянная, зависящая от свойств поверхности $A = 0,7$;
- и) эквивалентная длина свободного пробега частиц $l_m = 0,942 \cdot 10^{-7} \text{ м}$;
- к) коэффициент динамической вязкости среды $\mu = 18,1 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$;
- л) коэффициент расположения осадительных проволок $b = 0,56$;
- м) расстояние до осадительной проволоки $x = 0,4 \text{ м}$;
- н) диэлектрическая проницаемость пыли $\varepsilon = 2,7$;
- о) заряд частицы $q = 2,47 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ – естественный заряд частицы.

С помощью программы Excel произведем расчёт степени очистки воздушных масс электростатическим устройством (рис. 2).

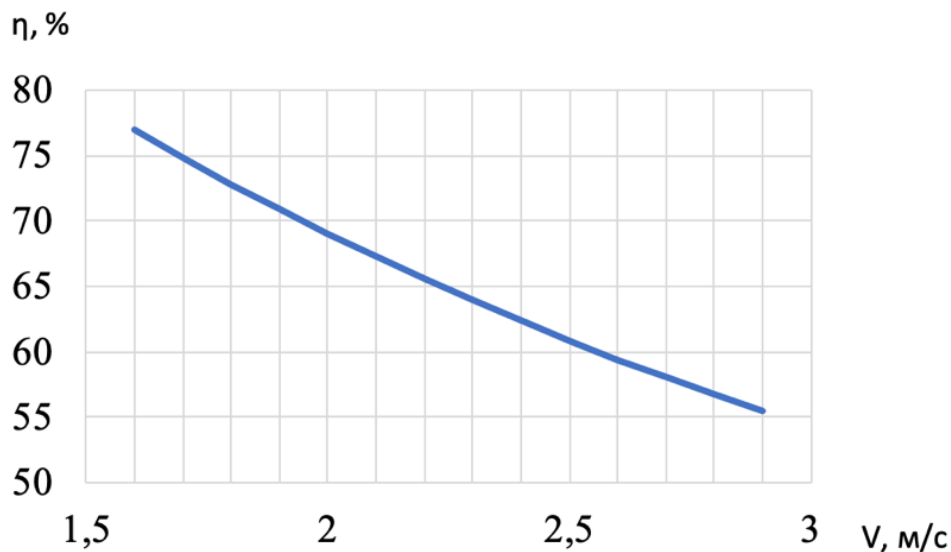


Рис. 2. Результаты расчёта и график зависимости эффективности очистки электростатическим устройством от скорости движения воздушных масс, проходящих над модулем PSM4-150 для частиц размером 2 мкм

На рис. 2 видно, что с увеличением скорости воздушных масс эффективность осаждения снижается, при порывах ветра она может снизиться до нуля. При заданных параметрах эффективность составляет не более 77 %.

Важно правильно выбирать место установки солнечных модулей: максимально открытое для солнечных лучей и закрытое от ветров.

Для создания электрического поля между осадительными проволоками требуется напряжение порядка 9–12 кВ. Оно создается с помощью специального разработанного источника высокого постоянного напряжения. Предлагаемый источник высокого напряжения более устойчив в работе, имеет меньшие габаритные размеры и вес по сравнению с аналогами. Возможность регулировки выходного напряжения, скважности и частоты импульсов, позволит более тщательно изучить на практике степень очистки воздушных масс от пылевых частиц.

2. Эффективность работы устройства защиты солнечных модулей от пылевых загрязнений

Эффективность не более 77 % является недостаточной. На основе теоретических положений из анализа сил и исходя из расчета улавливания пылевых частиц можно сделать вывод, что именно значения естественного заряда частиц недостаточно для высокой эффективности устройства. Чем выше заряд частицы пыли, поступающей в поле действия заряда устройства, тем выше вероятность осаждения частицы на заряженной проволоке.

Необходимо увеличить эффективность устройства за счет увеличения заряда частиц. Предложением по повышению эффективности улавливания частиц выступает создание в устройстве коронирующей системы для искусственного увеличения заряда поступающих частиц. Конструктивным решением в таком случае будет установка на сетке из проволоки, расположенной над поверхностью солнечного модуля, коронирующих «иголок» (рис. 3).

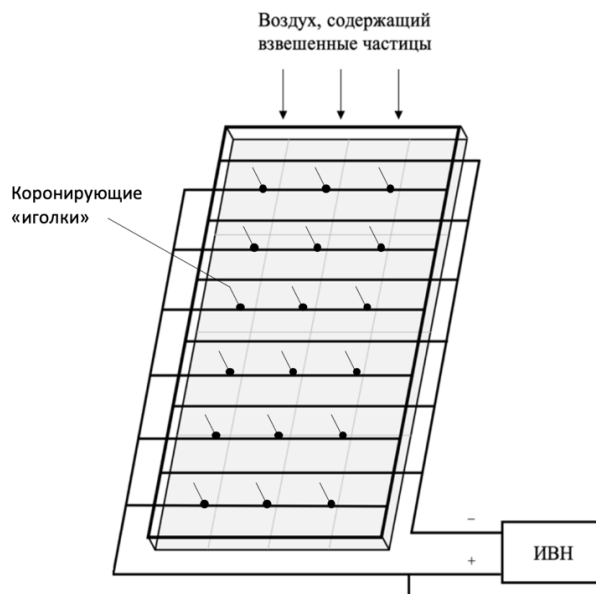


Рис. 3. Устройство защиты солнечного модуля от загрязнения с коронирующими «иголками»

Так как большинство частиц имеет положительный заряд, примем допущение, что все частицы имеют положительный заряд.

Положительные частицы подлетают к «иголке», на острие которой за счет импульсного источника высокого напряжения создается большой потенциал и появляется характерное свечение, попадают в поле положительного коронирующего заряда и приобретают дополнительный искусственный положительный заряд, который не позволяет пылинкам быть пропущенными очистительной системой.

Частица осаждается на проволоке противоположного заряда (отрицательного), тем самым повышая эффективность работы солнечной панели (рис. 4).

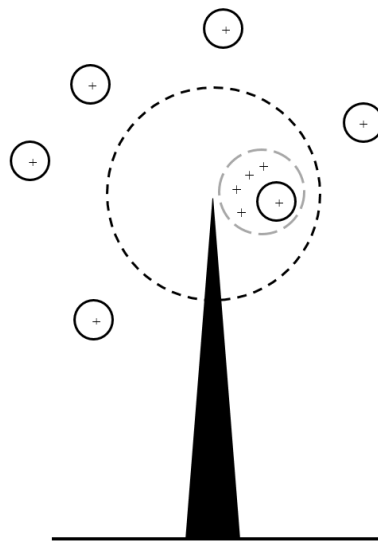


Рис. 4. Генерирование положительного заряда коронирующей «иголкой»

Данная система будет эффективна в условиях эксплуатации солнечных панелей, так как не будет затенять их поверхность, безопасна для обслуживающего персонала и экономически выгодна, так как не требует значительных капиталовложений.

Осаждение пылевых частиц, обусловленное только кулоновской силой, как это традиционно принималось, является неэффективным и составляет в среднем не более 20–30 % от эффективности устройства с коронирующими «иголками».

Необходимо определить, какая эффективность устройства будет при создании искусственного заряда пылевой частицы. Эффективности улавливания должна составлять не менее 90 %.

Произведем повторный расчет, но теперь частица будет обладать искусственным зарядом. Теперь частица будет обладать искусственным зарядом, составляющим $q = 2,47 \cdot 10^{-14}$ Кл.

Исходные данные для расчёта:

- а) напряжение питания $U_n = 12000 \text{ В}$;
- б) межэлектродное расстояние $d = 0,123 \text{ м}$;
- в) длина электродов $l = 0,8 \text{ м}$;
- г) размер пылевой частицы $a = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$;
- д) электрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$;
- е) напряженность электрического поля в фильтре $E = 14814,81 \text{ В/м}$;
- ж) градиент напряженности поля $\text{grad}E = 1,08 \cdot 10^9 \text{ В/м}$;
- з) постоянная, зависящая от свойств поверхности $A = 0,7$;
- и) эквивалентная длина свободного пробега $l_m = 0,942 \cdot 10^{-7} \text{ м}$;
- к) коэффициент динамической вязкости среды $\mu = 18,1 \times 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$;
- л) коэффициент формы расположения осадительных проволок $b = 0,56$;
- м) расстояние до осадительной проволоки $x = 0,4 \text{ м}$;
- н) диэлектрическая проницаемость пыли $\epsilon = 2,7$;
- о) заряд частицы $q = 2,47 \cdot 10^{-14} \text{ Кл}$ – искусственный заряд частицы.

Вновь произведем расчёт степени очистки воздушных масс электростатическим устройством с коронирующими «иголками» (рис. 5) при искусственном заряде частиц.

Благодаря искусственному увеличению заряда частицы, попадающей в зону действия очистительного устройства, с помощью коронирующих «иголок», была получена эффективность улавливания 92 %, что на 16 % выше, чем при улавливании пылинок с естественным зарядом.

Самая опасная для поверхности модуля пыль – мелкодисперсная, так как она обладает наименьшим естественным зарядом, уловить такие частицы сложно, полностью очистить их практически невозможно [6].

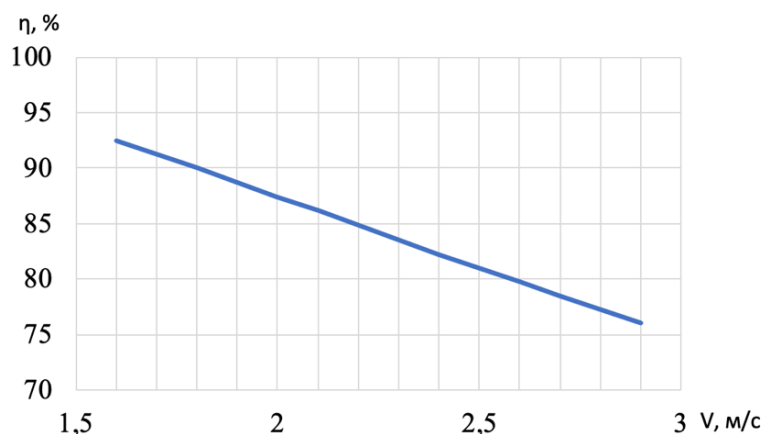


Рис. 5. Результаты расчёта и график зависимости эффективности очистки электростатическим устройством с коронирующими «иголками» от скорости движения воздушных масс, проходящих над модулем PSM4-150 для частиц с искусственным зарядом размером 2 мкм

Более того, осажденные мелкодисперсные пыли создают на поверхности солнечной панели пленку, которую трудно очистить. Намного эффективнее – это ее предотвратить.

Заключение

Расчет эффективности предложенного способа предупреждения осаждения частиц на поверхность солнечных панелей показал эффективность очистки воздушных масс. Для обеспечения работы защитного устройства разработан источник высокого напряжения.

Предложены рекомендации по изменению конструкции устройства и увеличению естественно заряда частиц (созданию большего искусственного заряда), попадающих в зону действия устройства, за счет использования коронного разряда.

Разработанное защитное устройство отвечает всем требованиям нормативно-технической документации и дает положительный экономический эффект в приемлемые сроки. Данный метод очистки, основанный на электронно-ионной технологии, может быть рекомендован к внедрению как на крупных солнечных электростанциях, так и на частных единичных солнечных модулях.

Библиографический список

1. Рустамов, Н.А. Стандартизация для развития энергетики на возобновляемых источниках / Н.А. Рустамов // Стандарты и качество. – 2015. – № 6(936). – С. 38–40.
2. Земсков, В.И. Возобновляемые источники энергии в АПК: учебное пособие для студентов вузов СПб и др. / В.И. Земсков. – Изд-во Лань, 2014. – 356 с.
3. Maxwell, D. Addressing the Rebound Effect. A project for the European Commission DG Environment. Final report. Ivry-sur-Seine, France: Bio Intelligence Service–Scaling sustainable development / D. Maxwell, P. Owen, L. McAndrew, K. Muehmel. 2011. – Accessed 17 Sep 2013. – URL: http://ec.europa.eu/environment/eusssd/pdf/rebound_effect_report.pdf.
4. Петренко, Ю.Н. Программное управление технологическими комплексами в энергетике: учебн. пособие / Ю.Н. Петренко, С.О. Новиков, А.А. Гончаров. – Минск: Выш. шк., 2013. – 407 с.
5. Солнечный модуль PSM4-150. – URL: <http://www.akkumulyator.ru/item2508.html>.
6. Шестакова, В.В. Изучение концепции эффекта отдачи на внедрение новых технологий по сокращению использования энергии / В.В. Шестакова, А.Л. Шестакова // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность: сб. науч. тр. – Севастополь: Изд-во СевГУ, 2018. – 1291–1295 с.

[К содержанию](#)