

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»



На правах рукописи

Юзикова Валерия Вячеславовна

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ С
РАЗРАБОТКОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ УСТРОЙСТВ
ЗАЩИТЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ**

2.4.5. Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2024

Работа выполнена на кафедре «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Кирпичникова Ирина Михайловна

Официальные оппоненты: **Тягунов Михаил Георгиевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии;

Велькин Владимир Иванович, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор кафедры атомных станций и возобновляемых источников энергии;

Сироткин Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, ООО «Инсмартавтоматика», г. Челябинск, технический директор

Защита диссертации состоится «28» марта 2024 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.07.17 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»: <https://dissovnet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=5659>.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ташлыков Олег Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В мире быстро и повсеместно внедряются установки на основе возобновляемых источников энергии: ветровые, солнечные, гидроэлектростанции плотно вошли во все сферы нашей жизни и обеспечивают электричеством и тепловой энергией как крупные предприятия, так и частных потребителей.

К концу 2022 г. всемирные генерирующие мощности установок ВИЭ составили 3372 ГВт, благодаря росту на рекордные 295 ГВт, 9,6%. Из общего объёма электроэнергетических мощностей 83% пришлось именно на возобновляемые источники энергии, что является впечатляющим показателем.

С точки зрения энергетики, сегодня энергия Солнца – одна из немногих абсолютно чистых альтернатив для ископаемого топлива без загрязнения воздуха, почвы или воды. Она не приводит к глобальным изменениям климата на планете и не вызывает угрозы для общественного здравоохранения. Главной проблемой для широкого внедрения солнечных электростанций является низкий коэффициент преобразования солнечной энергии в электрическую из-за загрязнения поверхности солнечных модулей.

Без ежемесячной очистки солнечный модуль может терять до 30% эффективности работы. Если это рассматривать в масштабах электростанций мощностью 150 МВт, снижение мощности из-за загрязнения на 1% может привести к потере около 200 тысяч долларов в год. Сокращение на 3-4% ведет к уже более серьезным убыткам, которые могут составить от 3,3 до 5 миллиардов долларов.

В результате изучения литературы, отражающей тенденции разработки устройств защиты солнечных модулей от загрязнений для обеспечения их эффективной работы, был сделан вывод, что, несмотря на очевидное разнообразие методов очистки поверхности солнечных модулей, поиск наиболее эффективных и экологически чистых способов и устройств продолжается и сегодня. Известны работы и исследования, в которых электрические свойства пыли используются по тому же принципу, что и в электрических фильтрах, но это другая область исследования.

Использование устройства, предотвращающего загрязнение солнечных модулей, позволит избежать колоссальных финансовых и экономических потерь и поддерживать поверхность модулей в рабочем состоянии на уровне номинальной выработки энергии.

Настоящая работа посвящена разработке устройства, предотвращающего загрязнение солнечных модулей и снижению их деградации.

Актуальность темы исследования подтверждена патентом на полезную модель № 218045 на тему «Устройство для предотвращения загрязнения и деградации солнечных модулей».

Степень разработанности темы исследования. Общим проблемами развития солнечной энергетики посвящены работы Стребкова Д.С., Безруких

П.П., Щеклеина С.Е., Велькина В.И., Тягунова М.Г., Елистратова В.В., Амерханова Р.А., Григораша О.В. и др. Значительный вклад в развитие систем очистки модулей внесли Федиев С.Л., Архипов С.Л., Корнилов В.В., Альв, Шахзада, Гандидасан, Паланичами, Шридата Паната, Крипа Варанаси. Анализ данных исследований показал, что практически все работы посвящены методам очистки уже загрязненных солнечных модулей, которые не исключают их последующих загрязнений.

Цель исследования – разработка эффективного устройства предотвращения загрязнения солнечных модулей от пылевых загрязнений и защита их от деградации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ существующих методов защиты поверхности солнечного модуля от пылевых загрязнений.
2. Провести теоретическое исследование физических и электрических характеристик частиц пыли, оказывающих влияние на работу солнечного модуля.
3. Изучить процесс улавливания пылевых частиц в электрическом поле солнечного модуля.
4. Разработать высоковольтное устройство для предотвращения осаждения частиц пыли на поверхность солнечного модуля, провести исследование разработанного устройства на рабочем солнечном модуле и оценить эффективность его работы.
5. Провести расчет экономической целесообразности использования разработанного устройства в качестве метода защиты солнечных модулей от пылевых загрязнений.

Объект исследования – совокупность факторов, влияющих на процесс осаждения частиц на осадительные электроды высоковольтного устройства, установленного на поверхности солнечного модуля, при его эксплуатации в условиях промышленного региона.

Предмет исследования – закономерности и взаимосвязи различных факторов, влияющих на эффективность работы высоковольтного устройства в процессе предотвращения загрязнения солнечных модулей.

Научная новизна:

1. Определен период работы солнечных модулей до снижения генерации в различных климатических условиях в зависимости от характеристик и состава пыли поверхность.
2. Впервые использованы электрические свойства пыли для разработки устройства, предотвращающего ее осаждение на поверхность солнечного модуля за счет параметров электрического поля высокого напряжения, основным из которых является его напряженность.
3. На основе морфологического анализа определены режимные и конструктивные параметры устройства, принципиально отличающегося от существующих методов защиты, т.к., предотвращает осаждение пыли на поверхности модулей, а не очищает уже загрязненную поверхность.

4. Получена зависимость эффективности улавливания пылевых частиц за счет сил электрического поля высоковольтного устройства, подтвержденная экспериментальными исследованиями.

Теоретическая значимость. Полученный результаты диссертационного исследования расширяют представление о способах очистки солнечных модулей от пылевых загрязнений.

Практическая значимость заключается в использовании результатов научных исследований в регионах с проблемой запыления поверхности солнечных модулей различными видами загрязнений. Полученные теоретические и экспериментальные зависимости и методика расчета конструктивных и режимных параметров могут быть использованы производства устройства в промышленных масштабах и внедрения на небольших частных, а также крупных солнечных электростанциях.

Методология и методы исследования. Использовались теоретический и экспериментальный методы исследования: проведен анализ сил, действующих на частицу пыли при её осаждении на поверхность солнечного модуля, исходя из полученных данных, определены режимные и конструктивные параметры устройства предотвращения загрязнения поверхности солнечных модулей; теоретические положения были подтверждены экспериментальными исследованиями, которые проводились на промышленной базе ООО «ДИМАНД» г. Челябинск с использованием действующих солнечных модулей.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований по определению периода снижения генерации солнечными модулями при их запылении в различных климатических условиях.

2. Результаты исследования сил электрического поля, действующих на заряженные частицы пыли при их осаждении на поверхности солнечного модуля.

3. Принципиально новая конструкция устройства, предотвращающего загрязнение поверхности солнечного модуля мелкодисперсной пылью, его режимные и конструктивные параметры.

4. Зависимость эффективности улавливания частиц пыли в межэлектродном промежутке разработанного устройства от его режимных и конструктивных параметров, подтвержденная экспериментальными исследованиями.

5. Экономический эффект использования устройства по предотвращению запыления поверхности солнечных модулей от мелкодисперсной пыли для индивидуальных солнечных установок и в масштабах крупных солнечных электростанций.

Достоверность результатов, научных положений, результатов работы и выводов обосновываются корректностью постановки задач, применения математического аппарата, методики и программы экспериментов и подтверждением теоретических положений экспериментальными исследованиями.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета). Высоковольтное устройство для предотвращения загрязнения и деградации солнечных модулей внедрено на ООО «ДИМАНД», г. Челябинск при использовании фотоэлектрических модулей для получения электроэнергии на собственные нужды предприятия. Результатом внедрения является экономия ресурсов на очистку, снижение концентрации пыли на поверхности эксплуатируемых на предприятии солнечных модулей, что ведет за собой повышение эффективности работы модулей.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на конференциях аспирантов и докторантов ЮУрГУ (2020 - 2023 г.г.), научных конференциях профессорско-преподавательского состава ЮУрГУ (2019-2021 г.г.), научно-технической конференции «Электротехнические комплексы и системы» (UralCon) (23-24 сентября 2020 г.), научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (15-18 сентября 2020 г.), научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (18-22 мая 2020 г.), научной конференции «Возобновляемая и малая энергетика 2020. Энергосбережение. Автономные системы энергоснабжения стационарных и подвижных объектов. ВиМЭ-2020» (28-29 октября 2020 г.), научно-практической конференции с элементами научной школы «Федоровские чтения-2020» (17-20 ноября 2020 г.), научной конференции с международным участием и научной школе «Возобновляемые источники энергии» (23-26 ноября 2020 г.), международной конференции International Ural Conference on Measurements (UralCon) (2019 г.).

Публикации по теме диссертационной работы. Основное содержание диссертации опубликовано в 18 печатных работах, в том числе 8 статей в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, включая 5 статей, опубликованных в журналах, входящих в международную реферативную базу данных Scopus; получен 1 патент на полезную модель.

Соответствие научной специальности. Тема диссертационного исследования соответствует пунктам 2, 3 и 4 паспорта специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы.

Личный вклад автора заключается в постановке целей и задач исследования, исследовании энергетических характеристик пыли, анализе сил, действующих на частицы пыли в межэлектродном промежутке, разработке устройства защиты и экономической оценке результатов исследований.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка используемой литературы из 94 наименований (отечественных и зарубежных авторов). Общий объем диссертации составляет 133 страницы, в том числе 114 страниц основного текста, 42 иллюстрации, 5 таблиц и 19 страниц приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, степень разработанности вопроса, поставлена цель и сформулированы задачи исследования, отражена научная новизна и практическая ценность, методы и средства исследования, достоверность результатов, полученных в работе, представлены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Проблемы загрязнения поверхности солнечных модулей и современное состояние вопроса» рассмотрены основные проблемы загрязнения поверхности солнечных модулей и снижения эффективности их работы. Количество солнечной энергии, попадающей на фотоэлементы, при запылении уменьшается почти на 17 - 25% по сравнению с регионами, где воздух относительно чистый. В результате загрязнения солнечных модулей такие регионы, как Индия и Китай, теряют соответственно от 1 до 11 ГВт электроэнергии в год. Исследование времени оседания пыли и сопоставление толщины пылевого слоя с энергоэффективностью солнечных электростанций показало, как важно вовремя очищать солнечные модули. Например, если очищать модули каждые 20 - 30 дней, выработка энергии увеличивается на 50%.

Рассмотрено влияние осадков и биологических загрязнений на эффективность работы солнечных модулей. Основными негативными последствиями загрязнения атмосферного воздуха в урбанизированных районах, которые влияют на КПД солнечных модулей, являются: снижение солнечной ультрафиолетовой радиации до 30 %, уменьшение продолжительности солнечного сияния до 15 %, увеличение по сравнению с фоном газообразных примесей в 5 - 25 раз ядер конденсации молекул водяного пара и общей массы пыли – в 10 раз и больше, увеличение по сравнению с фоном аэрозольных примесей в 500 раз, повышение времени облачности и туманов летом на 30 %, зимой – на 200 %, температура суточного минимума на 1,0 - 9,0°C выше, скорость ветра: среднегодовая на 20 - 30 % меньше, сильные порывы – на 10 - 20 % меньше, штили – на 5 - 10 % больше, в аэрозолях промышленных ландшафтов урбанизированных районов содержание токсичных тяжелых металлов и канцерогенного вещества в среднем увеличилось на 4 - 5 раз по сравнению с общим фоном и другие.

Изучены современные способы очистки поверхности солнечных модулей и сделаны выводы об их эффективности. На данный момент на электростанциях в основном используется ручной способ очистки солнечных модулей. Крупные корпорации совместно с учеными создают специализированные автоматические установки, которые упрощают очистку модулей. Предприниматели вместе с учеными разрабатывают различные вариации роботов для очистки поверхности солнечных модулей от загрязнений. Но на данный момент ни один из существующих способов не может считаться эффективным, так как требует больших затрат на создание внушительного количества агрегатов очистки площадей СЭС, иначе они подходят только для очистки небольших локальных

электростанций, занимающих площади не более нескольких сотен квадратных метров. Чистку солнечных электростанций из-за значительных финансовых и временных затрат в целях экономии человеческого ресурса и финансовых средств проводят как можно реже. Притом такие меры ведут за собой неминуемые потери электроэнергии из-за затенения поверхности солнечных модулей.

Был сделан вывод, что на данный момент отсутствуют промышленные комплексные технологии по очистке поверхностей солнечных модулей. Согласно вышесказанному, необходимо предпринять меры по защите поверхностей солнечных модулей от песка, промышленной пыли и техногенных выбросов и разработать эффективный способ защиты от осаждения загрязнений на поверхность солнечных модулей. Такая технология не должна зависеть от температурных и погодных условий, должна быть эффективна при отсутствии обслуживающего персонала на СЭС, не должна иметь сложный конструктив и высокую себестоимость. Итоговый результат должен обеспечить эффективную защиту поверхности солнечных модулей от пылевых и прочих загрязнений и снизить периодичность очистки.

Во второй главе «Теоретическое исследование процесса улавливания частиц пыли в электрическом поле солнечного модуля» проведено теоретическое исследование характеристик пыли в различных климатических условиях, изучен процесс их улавливания в электрическом поле солнечного модуля и сделаны выводы об эффективности использования предложенного метода предотвращения осаждения пыли на его поверхности.

Пыль представляет собой взвешенные мелкодисперсные аэрозоли размером в среднем от 10^{-4} до 10^{-1} мкм и обладает определенными физико-химическими и морфологическими свойствами, которые используются в технике пылеулавливания. Размер частиц и их форма определяет время нахождения пыли в воздухе и скорость ее оседания на поверхности оборудования, зданий и окружающее пространство. Чаще всего частицы имеют форму, отличающуюся от сферичной (рисунок 1).

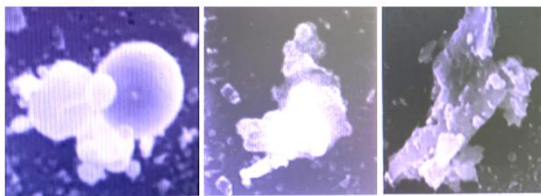


Рисунок 1 – Микрофотографии частиц аэрозолей

Электрический заряд частицы приобретают в результате трения вещества с поверхностью строений, машин, трения и соударения их друг с другом или абсорбцией ионов атмосферы. В момент образования пыли (бурение, дробление, измельчение твердых веществ) большинство частиц (85 - 95%) приобретает электрический заряд обоих знаков – положительный и отрицательный, а могут иметь и нейтральный заряд. Поверхностная проводимость повышается при

комнатной температуре, когда пыль начинает адсорбировать влагу, при этом сопротивление понижается.

При повышении температуры влага начинает испаряться, сопротивление возрастает, и при увеличении температуры до 100–180 градусов, из-за теплового возбуждения электронов вещества, происходит дальнейшее уменьшение сопротивления. Основным показателем работы солнечных модулей является его вольт-амперная характеристика (рисунок 2).

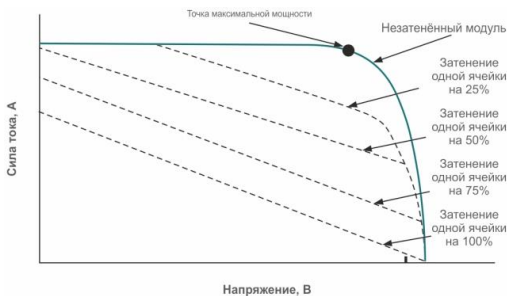


Рисунок 2 – Влияние запыления поверхности модуля на вольт-амперную характеристику

Даже небольшое запыление ячеек модуля приводит к снижению генерации из-за меньшего количества фотонов, проникающих в полупроводниковый слой. Чем больше загрязнена поверхность, тем больше снижение напряжения и, следовательно, меньше выходная мощность. Поэтому своевременная очистка модулей от запыления является важным этапом при их эксплуатации.

Движение заряженных частиц и осаждение их на конструкции устройства защиты происходит под действием нескольких сил: сила тяжести, сила сопротивления среды, кулоновская сила, пондеромоторная сила. Каждая из этих сил учитывается при разработке устройства защиты солнечных модулей от пылевых загрязнений.

Если солнечный модуль расположен горизонтально или наклонен на небольшой угол к горизонту, то частицы пыли будут оседать на стеклянной поверхности модуля в основном за счет сил тяжести F_T :

$$F_T = m \cdot g \tag{1}$$

На находящиеся в потоке воздуха пылевые частицы действует сила сопротивления среды F_C , которая определяет их установившуюся скорость:

$$F_C = \frac{-6\pi\mu aV_c}{1 + \frac{A_1 m}{a}} \tag{2}$$

Кулоновская сила является основной, действующей на частицу пыли при нахождении ее в электрическом поле. Ее значение определяется величиной напряженности электрического поля E и зарядом частицы q :

$$F_k = q \cdot E \tag{3}$$

Частицы, движущиеся в воздушном потоке, могут иметь самую разнообразную форму. От этого зависит величина силы, действующей на них.

Если электрическое поле неравномерно, то на частицу кроме силы F_K , обусловленной действием электрического поля, действует еще сила, определяемая его неравномерностью – пондеромоторная сила F_E , которая определяется:

$$F_E = 2\pi\epsilon_0 a^3 \frac{\epsilon-1}{\epsilon+2} \text{grad}E^2 \quad (4)$$

В природе не существует веществ, которые тем или иным образом не могли бы быть заряжены и в заряженном состоянии подвергнуты силовому воздействию окружающего электрического поля. Электрическая заряженность пыли определяет ее адгезию, или взаимодействие пылевых частиц с поверхностью солнечного модуля. При слипании они могут образовывать конгломераты пыли, которые могут либо осыпаться с поверхности модуля, либо задерживаться и надежно застревать в конструкции модуля, вызывая его деградацию.

В третьей главе «Разработка устройства защиты солнечных модулей от пылевых загрязнений» описано устройство, предназначенное для предотвращения осаждения частиц пыли на поверхность солнечного модуля. В целях упрощения конструкции устройства защиты (УЗ) и снижения до минимума его аэродинамического сопротивления были выбраны металлические проволочные электроды. Таким характеристикам соответствуют железные проводники, которые и были приняты для изготовления устройства. Компоновка проволочных электродов для осаждения – параллельное расположение с постоянным межэлектродным расстоянием. Для создания высокого напряжения следует рассмотреть высоковольтный источник напряжения с возможностью изменения его значения. Рассчитаны конструктивные параметры устройства. Для вертикальной ориентации электродов (рисунок 3а) количество электродов $N = 25$ шт., толщина $h = 0,001$ м, межэлектродное расстояние $d = 0,02$ м. Для горизонтальной ориентации электродов (рисунок 3б) количество электродов $N = 70$ шт., толщина $h = 0,001$ м, межэлектродное расстояние $d = 0,014$ м.

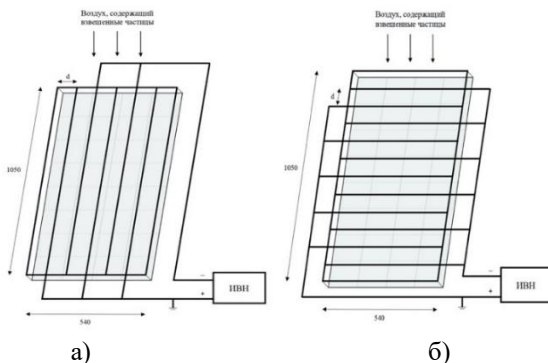


Рисунок 3 – Общий вид устройства защиты: а-вертикальная и б - горизонтальная ориентация.

Получена зависимость эффективности улавливания пылевых частиц за счет сил электрического поля высоковольтного устройства (5):

$$\eta = 1 - e^{-\frac{10^{-11} \cdot \left(\frac{U}{a+kH}\right)^2 \cdot \frac{r_{\text{ч}}}{\mu_0}}{f}} \quad (5)$$

На рисунках 4, 5 и 6 показаны зависимости эффективности улавливания пылевых частиц устройством от основных режимных и конструктивных параметров (напряжения, межэлектродного расстояния и расстояния устройства от стеклянной поверхности солнечного модуля). Зависимости построены для частиц размером $5 \cdot 10^{-6}$ м для вертикальной и горизонтальной ориентации осадительных электродов. Такой размер соответствует характеристикам мелкодисперсной пыли, которая чаще всего и осаждается на поверхность солнечного модуля.

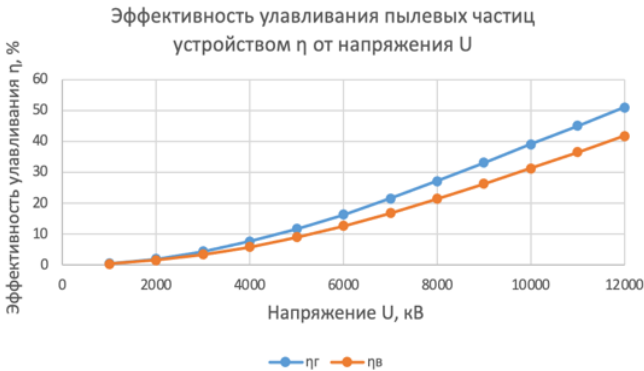


Рисунок 4 – Эффективность улавливания пылевых частиц устройством η от напряжения U (для горизонтальной и вертикальной ориентации электродов)

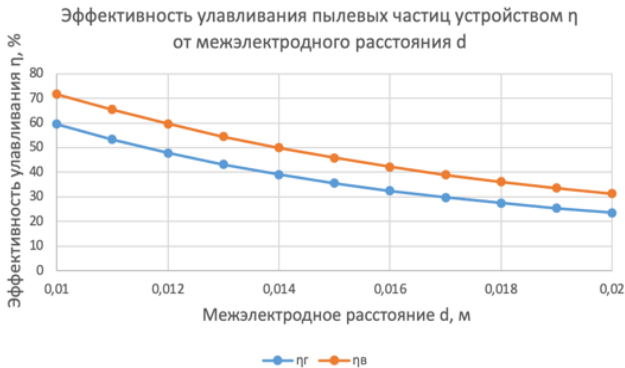


Рисунок 5 – Эффективность улавливания пылевых частиц устройством η от межэлектродного расстояния d (для горизонтальной и вертикальной ориентации электродов)

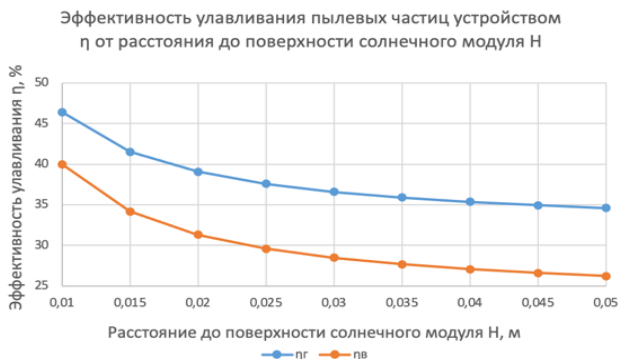


Рисунок 6 – Эффективность улавливания пылевых частиц устройством η от расстояния до поверхности солнечного модуля H (для горизонтальной и вертикальной ориентации электродов)

Исходя из всех теоретических расчетов, для экспериментального исследования эффективным с точки зрения обеспечения прочности воздушного промежутка являются напряжение U , подаваемое на устройство, от 6 до 12 кВ, межэлектродное расстояние d осадительных электродов от 0,014 до 0,02 м и расстояние до поверхности солнечного модуля H от 0,01 до 0,015 м. При данных параметрах эффективность улавливания пылевых частиц высоковольтным устройством составит от 40 до 50%, что является оптимальным.

В четвертой главе «Программа, методики и результаты экспериментальных исследований» описаны результаты проведения эксперимента.

Программой экспериментальных исследований предусматривалось:

1. Исследование времени загрязнения поверхности и периода работы модулей до критического значения снижения генерации;
2. Разработка экспериментальной установки для испытаний устройства предотвращения запыления солнечных модулей;
3. Исследование эффективности улавливания пыли разработанным устройством.

Для исследования времени загрязнения и периода работы СМ до критического значения снижения генерации в 2022 году совместно с учеными из Института энергетики Таджикистана при кафедре «Нетрадиционные возобновляемые источники энергии и тепловая энергетика» были проведены совместные исследования снижения генерации электрической энергии солнечными модулями в условиях запыленных местностей.

Исследования были проведены в Таджикистане, городе Бохтар, для которого характерны естественные загрязнения воздушной среды, пылевые бури и высокие температуры воздуха, и в промышленном городе Челябинск с большим количеством объектов с выбросами искусственных загрязнителей воздушной среды.

Местность, в которой было проведено исследование работы солнечной электростанции, расположена на высоте 419 метров над уровнем моря, широта 37,872, долгота 68,724. Фотоэлектрические преобразователи были установлены под углом наклона 45 градусов к стороне юго-запад на 12 градусов. 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 помощью инфракрасного термометра фиксировалась температура передней и задней поверхностей модулей каждый час в течение дня.

Для проведения исследования была создана экспериментальная установка (рисунок 7). Эксперименты выполнялись с 5 по 8 апреля 2022 года (начало пыльного сезона), в период с 11:00 до 16:00. Напряжение и ток электрических нагрузок (три последовательно соединенные галогеновые лампы 12V/60/80W), подключенные к обоим модулям, определялись с помощью цифрового мультиметра типа CHYVictorVC890D.



Рисунок 7 – Экспериментальная установка для определения генерации в условиях г. Бохтар

Среднее значение мощности для очищенного модуля составило 151,67 Вт. Мощность запыленного модуля за рассматриваемый период снизилась на 46,64% относительно заявленной производителем номинальной мощности солнечного модуля (рисунок 8).

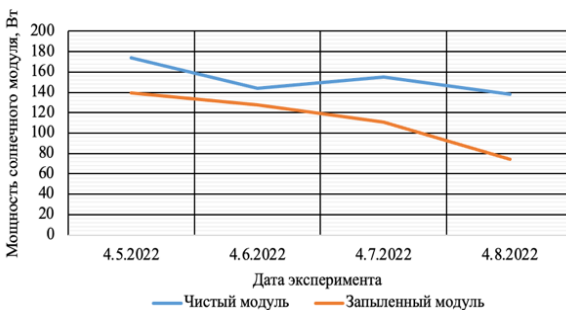


Рисунок 8 – Изменение мощности солнечных модулей в зависимости от уровня запыленности

Аналогичные эксперименты были проведены для другой зоны – города 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. В составе пыли, выбрасываемой предприятиями, часто присутствуют различные мелкодисперсные примеси, которые могут оказывать серьезное воздействие на работу и усложнять очистку солнечных модулей за счет сил адгезии и проникновения пыли во внутреннюю структуру модуля. Экспериментальные исследования проводились в апреле 2022 года (сухой, пыльный сезон), в будние дни в одно и то же время с 13:00 до 14:00 на промышленной базе одного из районов Челябинска. Местность расположена на высоте 260 метров над уровнем моря, климат – континентальный, широта 55.098, долгота 61.361. В эксперименте были использованы солнечные модули модели bps 32-100 бренда JINGYANGPV (количество ячеек: 32, размер: 1050 мм * 540 мм * 2,5 мм, материал: монокристаллический силикон, номинальная емкость: 100 Вт, максимальная мощность: 105Вт). Аналогично эксперименту в г. Бохтар, загрязнение поверхности одного из солнечных модулей происходило естественным образом, второй очищался в течение эксперимента. Для определения значения тока и напряжения определялись по цифровому мультиметру модели APPA 62, который подключался поочередно к каждому из солнечных модулей в соответствии с техническими рекомендациями. Экспериментальная установка показана на рисунке 9.

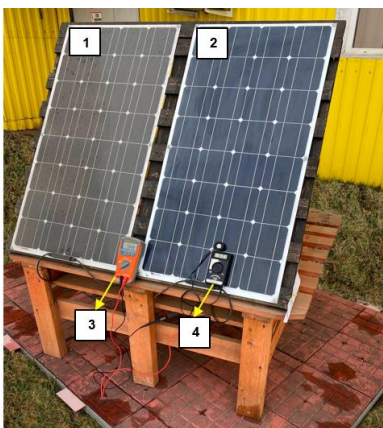


Рисунок 9 – Экспериментальная установка для определения генерации солнечных модулей

На рисунке 10 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 загрязнен в течение месяца, с 19 марта 2022 г. по 19 апреля 2022 г.

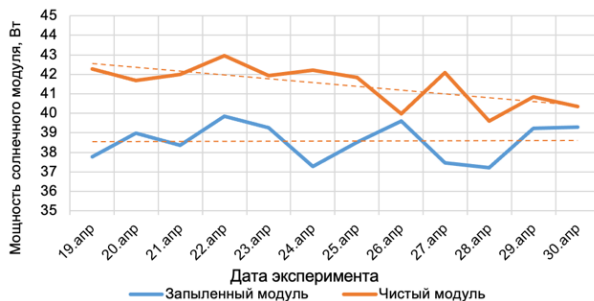


Рисунок 10 – Снижение выработки мощности солнечными модулями

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. 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. Для проведения экспериментальных исследований высоковольтного устройства защиты были использованы две одинаковые солнечные модули bps 32-100 бренда JINGYANGPV. Поверхность обоих модулей равномерно запылялась естественным путем при наличии напряжения на проволочных электродах устройства. Над поверхностью одного из модулей (№2) было установлено устройство, предотвращающее запыление, поверхность второго модуля оставалась открытой (рисунок 11).



а)

б)

Рисунок 11 – Общий вид экспериментальной установки: а – горизонтальная ориентации устройства, б – вертикальная ориентация устройства

Корпус устройства представляет из себя изолированную рамку размером 1050 мм на 540 мм. В качестве основы для крепления осадительных электродов были выбраны балки из диэлектрика (текстолит), толщиной 1 см.

Осадительные электроды с отрицательным потенциалом и потенциалом «земля» были протянуты через текстолитовые балки поочередно и подключены к источнику высокого напряжения и сети с помощью шин.

Контакты и стыки были изолированы эпоксидной смолой в целях избежания коронирующих разрядов и пробоев при подаче высокого напряжения на устройство.

Для использования в эксперименте был выбран источник высокого напряжения типа ВПСМ-М (рисунок 12).



Рисунок 12 – Источник высокого напряжения

Эффективность работы устройства определялась по энергетическим характеристикам солнечного модуля: току и напряжению с использованием цифрового мультиметра APPA 62.

Экспериментальное исследование (таблица 1) проводилось в течение двух недель в период с 8 по 21 мая 2023 года на местности – Челябинская обл., г. Челябинск; координаты – 55.098050, 61.361239 (территория промышленной базы ООО «ДИМАНД»), среднее количество солнечных часов – 2089 ч/год, на территории области отмечено радиоактивное загрязнение.

Конструкция располагалась в промышленной зоне (территория промышленных складских помещений) под прямыми солнечными лучами под углом 55° (в соответствии с географической широтой региона), ориентированы на юго-запад. В составе загрязнений преобладают: грунт, техническая промышленная пыль, выхлопные газы от автомобилей.

Устройство защиты работало ежедневно с 10:00 до 17:00 (период попадания прямых солнечных лучей на поверхность модулей, а также активный рабочий день), после чего снималось, очищалось и устанавливалось обратно.

В результате проведенного эксперимента были получены опытные данные по снижению выработки электроэнергии исследуемыми модулями (таблица 1). По данным таблицы 1 был построен график (рисунок 13).

Результаты эксперимента

| Дата | P1, Вт | P2, Вт | Дата | P1, Вт | P2, Вт |
|--------|---------|---------|--------|---------|---------|
| 8 мая | 38,031 | 37,989 | 15 мая | 35,1975 | 38,094 |
| 9 мая | 37,8499 | 37,389 | 16 мая | 34,6368 | 38,2543 |
| 10 мая | 37,2448 | 37,8708 | 17 мая | 34,2272 | 37,9753 |
| 11 мая | 36,6832 | 37,0845 | 18 мая | 34,368 | 37,146 |
| 12 мая | 35,86 | 37,1255 | 19 мая | 33,4917 | 37,1255 |
| 13 мая | 35,6598 | 37,4463 | 20 мая | 33,5956 | 36,9648 |
| 14 мая | 35,9593 | 37,829 | 21 мая | 34,3296 | 37,5856 |

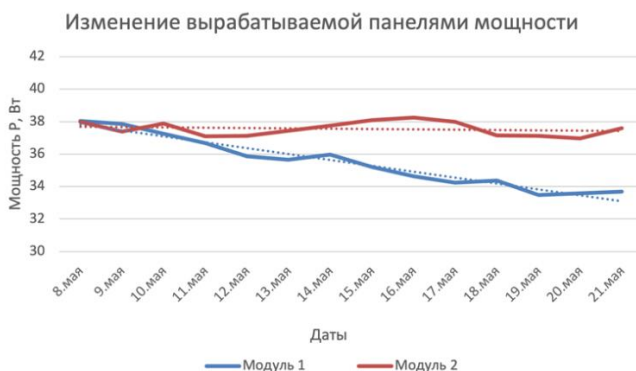


Рисунок 13 – Изменение вырабатываемой модулями мощности

Разработанное УПЗ имеет следующие параметры:

1. Размеры рамки устройства: 1050 мм * 540 мм;
2. Материал проволочных электродов: железо;
3. Толщина проволочных электродов: 0,001 м;
4. Количество проволочных электродов: 25 / 70 шт.;
5. Расположение электродов в устройстве: вертикально / горизонтально;
6. Расстояние между электродами: 0,02 м / 0,014 м;
7. Высота электродов над поверхностью солнечного модуля: 0,015 м;

При напряжении питания проволочных электродов 12 кВ такие параметры могут обеспечить эффективную работу солнечных модулей с увеличением периода между очистками, с несложным конструктивом и простым в эксплуатации, безопасным для обслуживающего персонала и рекомендуется для защиты солнечных модулей как частных, так и промышленных электростанций от пылевых загрязнений.

На «Устройство для предотвращения загрязнения и деградации солнечных модулей» получен патент. Устройство не подлежит обязательной сертификации. Монтаж и эксплуатацию УПЗ осуществляет персонал из числа штатных работников электростанции, имеющих IV группу по безопасности и навыки установки, эксплуатации, обслуживания и ремонта подобных устройств.

Устройство накладывается на корпус солнечного модуля на высоте от поверхности, равной 1 - 1,5 см, межэлектродное расстояние при горизонтальной ориентации проволочных электродов равно 1,4 см, а при вертикальном расположении – 2 см. Включение устройства в работу и подачу напряжения на осадительные электроды рекомендуется осуществлять в случае неблагоприятной экологической обстановки в местности, где будет эксплуатироваться устройство.

Демонтаж устройства производится при накоплении пыли на осадительных электродах и снижении генерации электроэнергии. После промывки устройства под струей чистой водопроводной воды и тщательной просушки, устройство вновь монтируется на корпус модуля. Период между очистками определяется визуально по скопившейся на электродах пыли и снижению генерации электроэнергии модулями.

При правильной эксплуатации и отсутствии механических повреждений устройство может безотказно работать в течение 10 - 15 лет.

Поскольку устройство не обеспечивает 100%-ной защиты поверхности модуля от запыления, то её также нужно периодически очищать от пыльных налетов. Периодичность очистки зависит от способа расположения модулей относительно земли.

В пятой главе «Оценка экономической эффективности использования устройства» приведены расчеты экономической целесообразности использования разработанного устройства в качестве метода защиты солнечных модулей от пылевых загрязнений.

По данным среднегодовые потери глобального масштаба от загрязнения солнечных модулей составляют от 3% до 4%. Эта цифра получена из предположения, что очистка всех солнечных систем осуществляется регулярно с определенной фиксированной частотой. Исходя из этого, общая стоимость потерь от загрязнения оценивается от 3 до 5 миллиардов евро. К концу 2023 года эта цифра может составить 4 - 7 млрд. евро. Для стран с дождливым климатом или длительными зимними периодами потери от запыления могут быть меньше, однако наличие снежного или ледяного покрова на поверхности модулей также ведет к затенению и снижению производительности солнечных установок.

Разработанное устройство защиты от загрязнения солнечных модулей принципиально отличается от всех рассмотренных способов, прежде всего своим назначением – предотвращать запыление солнечных модулей, а не очищать его от уже осевшей пыли. Использование устройства позволит избежать негативные моменты, связанные с очисткой уже запыленных модулей, поскольку не требует привлечения рабочей силы и дорогостоящего водного ресурса.

Годовая экономическая эффективность и срок окупаемости устройства, предотвращающего загрязнение солнечного модуля рассчитаны для предприятия ООО «ДИМАНД», г. Челябинск, на территории которого размещены солнечные модули для энергообеспечения собственных нужд и равны:

1. Годовой экономический эффект $\Theta = 15\,146$ руб.;
2. Срок окупаемости $T = 0,74$ года.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что УПЗ очень экономично, удобно в использовании и позволяет сохранить чистоту поверхности модулей на протяжении длительного времени эксплуатации. Устройство защиты модулей от загрязнений, на основании расчета окупаемости и экономического эффекта принято к внедрению на челябинском предприятии ООО «ДИМАНД».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании анализа существующих методов защиты поверхности солнечного модуля от пылевых загрязнений сделан вывод, что на сегодняшний день отсутствуют совершенные, на 100% эффективные и экономически-выгодные промышленные комплексные технологии по очистке поверхностей солнечных модулей. Проблема снижения выработки электроэнергии и деградации солнечных модулей, в том числе от загрязнений, все еще требует решения.

2. Теоретическое исследование физических и электрических характеристик пылевых частиц показало, что такие характеристики как их размер, масса, состав, диэлектрическая проницаемость и наличие биполярного электрического заряда, оказывают влияние на работу солнечного модуля и это необходимо учитывать при расчете и разработке устройства, предотвращающего осаждение пыли на поверхности модуля.

3. Процесс улавливания пылевых частиц при их попадании в электрическое поле, созданное высоковольтным источником, происходит под действием сил этого поля: силы сопротивления среды, кулоновской силы и пондеромоторной силы, обусловленной неравномерным распределением напряженности электрического поля. Кулоновская сила, определяемая значением естественного заряда частиц, незначительная и ею можно пренебречь.

4. Разработанное устройство для предотвращения осаждения частиц пыли на поверхность солнечного модуля принципиально отличается от известных методов очистки, т.к., не очищает уже загрязненную поверхность модуля, а предотвращает подобное загрязнение. Экспериментальное исследование разработанного устройства на работающих солнечных модулях показало эффективность его работы на мелкодисперсной пыли по сравнению с незащищенным модулем, генерация которого за период исследований снизилась на 10%. Это подтвердило теоретические положения по определению эффективности разработанного устройства.

5. Срок окупаемости устройства защиты составляет менее 1 года, что говорит об его экономической эффективности и целесообразности использования, как для индивидуальных установок, так и в масштабах крупных солнечных электростанций. Устройство является безопасным, устойчивым в работе, имеет небольшие габаритные размеры и вес, не требует особых навыков установки, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования. Предложены рекомендации по совершенствованию разработанного устройства как в

конструкции, так и в определении режимных параметров и используемых материалов, разработке специального источника высокого напряжения для питания УПЗ, проведению моделирования процессов осаждения пыли на поверхность СМ для уточнения теоретических и экспериментальных результатов, разработке систем автоматизированного управления работой устройств с использованием специальных датчиков и сенсоров, разработке устройств для предотвращения загрязнений крупнодисперсными пылевыми частицами, мелким мусором, пометом птиц и др., применению разработанных устройств в других областях народного хозяйства (например, в ЖКХ для защиты оконных стекол от запыления).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ

1. Кирпичникова И.М. Снижение генерации электрической энергии солнечными модулями в условиях запыленности местности / И.М. Кирпичникова, И.Б. Масхумов, **В.В. Шестакова** // iPolytech Journal. – 2023. – Т.27, №1. – С. 83-93; 0,63 п.л. / 0,31 п.л.

2. Кирпичникова И.М. Результаты научных исследований и подготовки специалистов по возобновляемой энергетике в Южно-Уральском государственном университете / И.М. Кирпичникова, В.А. Заварухин, А.Ю. Сологубов, **В.В. Шестакова** // Вестник Московского энергетического института. – 2022. – №4. – С. 90-97; 0,44 п.л. / 0,11 п.л.

3. Kirpichnikova I.M. Electrical Properties of Dust and their Influence on the Operation of Solar Modules / I.M. Kirpichnikova, **V.V. Shestakova** // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2022). – Sochi, Russia, 2022. – P. 206-213, № 9787100; 0,44 п.л. / 0,22 п.л. (Scopus).

4. Кирпичникова И.М. Электрические свойства пыли и их влияние на работу солнечных модулей / И.М. Кирпичникова, **В.В. Шестакова** // Энергосбережение и водоподготовка. – 2021. – №4 (132). – С. 10-14; 0,31 п.л. / 0,16 п.л.

5. Kirpichnikova I.M. System for Cleaning the Surface of Solar Modules from Dust Pollution / I.M. Kirpichnikova, **V.V. Shestakova** // 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – Chelyabinsk, Russia: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (IEEE), 2020. – P. 349-355, № 9216252; 0,44 п.л. / 0,22 п.л. (Scopus).

6. Kirpichnikova I.M. Problems of using solar photovoltaic panels and ways of increase their efficiency / Kirpichnikova I.M., **V.V. Shestakova** // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2020). – Sochi, Russia: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (IEEE), 2020, № 9112044. (Scopus).

7. Kirpichnikova I.M. Electron-ion technology as a protection of solar modules from contamination / I.M. Kirpichnikova, **V.V. Shestakova** // Lecture Notes in Electrical Engineering, V. 641. – Chelyabinsk, Russia: Springer Nature Switzerland AG, 2020. – P. 554-562; 0,44 п.л. / 0,22 п.л. (Scopus).

8. Kirpichnikova I.M. Development of effective device for protection solar modules from contamination / A.V. Akimov, I.M. Kirpichnikova, **V.V. Shestakova** // 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon 2018). – Chelyabinsk, Russia: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (IEEE), 2018. – P. 86-89, № 8544297; 0,25 п.л. / 0,08 п.л. (Scopus).

Патенты, свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

9. Заварухин В.А., Кирпичникова И.М., **Шестакова В.В.** Устройство для предотвращения загрязнения и деградации солнечных модулей. Пат. 218045 РФ. 2023.

Публикации в других изданиях

10. Кирпичникова И.М. Исследование влияния пылевых загрязнений на эффективность работы фотоэлектрических модулей / И.Б. Масхумов, И.М. Кирпичникова, **В.В. Шестакова** // Материалы международной научно-практической конференции: «Инженерные исследования, инновации и инвестиции в области энергетики и промышленности» / Институт энергетики Таджикистана 2023. – Таджикистан: Институт энергетики Таджикистана, 2023. – С. 40-47; 0,43 п.л. / 0,15 п.л.

11. **Шестакова В.В.** Исследование влияния производства и эксплуатации ВИЭ на окружающую среду // Вести в электроэнергетике. – Москва, Россия: АО НТФ «Энергопрогресс», 2020. – № 5. – С. 64-70; 0,43 п.л.

12. Кирпичникова И.М. Расчет эффективности работы устройства защиты солнечных модулей от пылевых загрязнений / И.М. Кирпичникова, **В.В. Шестакова** // Наука ЮУрГУ. Секции технических наук. Материалы 72-й научной конференции. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск, Россия, 2020. – С. 383-391; 0,5 п.л. / 0,25 п.л.

13. Кирпичникова И.М. Повышение эффективности улавливания частиц устройством защиты солнечных модулей от пылевых загрязнений / И.М. Кирпичникова, **В.В. Шестакова** // Возобновляемые источники энергии: материалы Всероссийской научной конференции и XII молодежной школы с международным участием: сборник. – Москва, Россия: Наука, 2020. – С. 442-450; 0,56 п.л. / 0,28 п.л.

14. **Шестакова В.В.** Изучение последствий производства и эксплуатации солнечных фотоэлектрических панелей // Фёдоровские чтения – 2020: 50 международная научно-практическая конференция с элементами научной школы

(Москва, 17-20 ноября 2020 г.) / под общ. ред. Ю.В. Матюниной. – Москва, Россия: Издательский дом МЭИ, 2020. – С. 387-391; 0,31 п.л.

15. **Шестакова В.В.** Исследование влияния производства и эксплуатации возобновляемых источников энергии на окружающую среду на примере солнечных фотоэлектрических панелей // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы XI Международной научно-технической конференции, 15-17 сентября 2020, Ставрополь. – Ставрополь, Россия: Северо-Кавказский федеральный университет, 2020. – С. 29-30; 0,13 п.л.

16. Кирпичникова И.М. Особенности эксплуатации солнечных энергоустановок в различных климатических условиях / И.М. Кирпичникова, И.Б. Махсумов, А.Ю. Сологубов, **В.В. Шестакова** // Энергоэффективность. Ценология. Экология и Энергобезопасность: материалы научной конференции (г. Астрахань, 16-19 сентября 2020 г.) / под науч. ред. д-ра пед. наук, проф. Зайнутдиновой Л.Х. и д-ра техн. наук, проф. Тягунова М.Г. – Астрахань, Россия: Издатель: Сорокин Роман Васильевич, 2020. – С. 46-55; 0,94 п.л. / 0,23 п.л.

17. Кирпичникова И.М. Конструктивные и режимные параметры устройства для защиты солнечных модулей от пылевых частиц / И.М. Кирпичникова, **В.В. Шестакова** // Электроэнергетика: XV Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2020»: материалы конференции. – Иваново, Россия: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2020. – Т.3. – С. 147; 0,06 п.л. / 0,03 п.л.

18. **Шестакова В.В.** Изучение особенностей производства и использования солнечных фотоэлектрических панелей // Энергетика в современном мире: материалы IX Всероссийской научно-практической конференции. Забайкальский государственный университет / ответственный редактор А.В. Лесков. – Чита, Россия: ЗабГУ, 2019. – С. 12-15; 0,25 п.л.

19. Kirpichnikova I.M. Energy-efficient lighting with the help of mechanical power accumulation / I.M. Kirpichnikova, **V.V. Shestakova** // Sino-Russian ASRTU Conference «Alternative Energy: Materials, Technologies, and Devices». – Ekaterinburg, Russia: Ural Federal University, 2018. – P. 85-86; 0,13 п.л. / 0,06 п.л.

Юзикова Валерия Вячеславовна

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ С
РАЗРАБОТКОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ ОТ
ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Специальность 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать ____. ____. 2024. Формат 60x84 1/16 Печать цифровая
Усл.печ. л. 1... Уч.-изд. Л.1,0. Тираж 100 экз. Заказ ____

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76