

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Южно-Уральский Государственный Университет  
(национальный исследовательский университет)»

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание научной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Кирпичникова И.М.

Челябинск 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 ПРОБЛЕМЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	14
1.1 Загрязнение солнечных модулей пылевыми частицами.....	14
1.2 Осадки и биологические загрязнения, влияющие на эффективность работы солнечных модулей.....	24
1.3 Климатические условия, влияющие на эффективность работы солнечных модулей.....	29
1.4 Современные способы и технологии очистки солнечных модулей от загрязнений.....	30
1.4.1 Ручная очистка солнечных модулей.....	30
1.4.2 Автоматизированная очистка солнечных модулей.....	34
1.4.3 Роботизированная очистка солнечных модулей.....	37
Выводы по главе 1.....	39
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УЛАВЛИВАНИЯ ЧАСТИЦ ПЫЛИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ СОЛНЕЧНОГО МОДУЛЯ.....	41
2.1 Основные свойства и характеристики частиц пыли.....	41
2.1.1 Электрические характеристики частиц пыли.....	43
2.2 Анализ сил, действующих на частицы пыли в электрическом поле солнечного модуля.....	52
2.3 Определение степени улавливания пылевых частиц в электрическом поле солнечного модуля.....	58
Выводы по главе 2.....	60
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ ОТ ПЫЛЕВЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ.....	62
3.1 Морфологический анализ технического решения.....	62
3.1.1 Материал осадительных электродов.....	63
3.1.2 Компоновка проволочных электродов.....	63
3.1.3 Напряжение на проволочных осадительных электродах.....	64

3.2 Конструктивные параметры устройства.....	64
3.2.1 Режимные параметры устройства .....	71
3.3 Расчет эффективности улавливания пылевых частиц.....	72
Выводы по главе 3.....	79
<b>ГЛАВА 4 ПРОГРАММА, МЕТОДИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ</b> <b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>80</b>
4.1 Программа экспериментов .....	80
4.2 Исследование времени загрязнения поверхности и периода работы модулей до критического значения снижения генерации.....	80
4.3 Разработка экспериментальной установки для испытаний устройства предотвращения запыления солнечных модулей .....	87
4.3.1 Условия проведения эксперимента .....	89
4.3.2 Выбор источника высокого напряжения для питания устройства, предотвращающего загрязнение модулей .....	90
4.3.2.1 Требования к источнику высокого напряжения .....	90
4.3.3 Результаты экспериментальных исследований .....	90
4.4 Рекомендации по использованию устройств предотвращения запыления солнечных модулей при эксплуатации для безопасной работы гелиоэнергетических установок .....	95
4.5 Направления дальнейших исследований по использованию устройств, предотвращающих загрязнение солнечных модулей.....	97
Выводы по главе 4.....	99
<b>ГЛАВА 5 РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ</b> <b>ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСТРОЙСТВА.....</b>	<b>100</b>
5.1 Технико-экономический и энергетический эффект от применения УПЗ солнечных модулей.....	101
5.2 Расчет экономической эффективности использования УПЗ СМ на предприятии Челябинской области.....	102
Выводы по главе 5.....	103
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>104</b>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	106
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 .....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 .....	123
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 .....	124
ПРИЛОЖЕНИЕ 6 .....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ 7 .....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ 8 .....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ 9 .....	130
ПРИЛОЖЕНИЕ 10 .....	131
ПРИЛОЖЕНИЕ 11 .....	132

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность и степень разработанности темы.** Около 120 лет назад возникло понятие «энергия». Кратко историю потребления электроэнергии можно изложить так: люди начали бережно использовать возобновляемые источники энергии, но постепенно перешли к безрассудному повсеместному использованию невозобновляемых источников. С развитием промышленности, быстрым ростом населения и уровня его жизни увеличивается и количество энергии, необходимой человеку.

Сейчас ситуация в энергетической политике всего мира меняется – появляется необходимость перехода на возобновляемые источники энергии. Их эффективное развитие решает важные для стран задачи: экономия топливного ресурса, энергоснабжение отдаленных территорий, увеличение рабочих мест, выполнение странами обязательств по охране окружающей среды и сокращение потребления электроэнергии в глобальном масштабе. В России развитие возобновляемых источников энергии имеет большое значение для энергетической безопасности страны, решения социальных и экономических проблем, а также повышения качества жизни населения. Именно поэтому сегодня актуальной является проблема энергосбережения, часто звучит вопрос о том, где найти источник чистой и дешевой энергии, как сохранить и преумножить то количество энергии, которая будет необходима человечеству в долгосрочной перспективе.

В мире быстро и повсеместно внедряются установки на основе возобновляемых источников энергии: ветряные, солнечные, гидроэлектростанции плотно вошли во все сферы нашей жизни и обеспечивают электричеством и тепловой энергией как крупные предприятия, так и частных потребителей. При этом использование возобновляемых источников энергии не должно противоречить основным положениям Федерального закона РФ 12.03.2003 №35-ФЗ «Об электроэнергетике» [1], ГОСТ Р 51595-2000 (Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Коллекторы солнечные. Общие технические условия) [2] и ГОСТ Р 55993-2014/IEC/TS1836:2007 (Национальный стандарт Российской

федерации. Системы фотоэлектрические. Термины, определения и символы) [3]. В докладе Международного энергетического агентства (International Energy Agency, IEA) от 6 декабря 2022 года [4] говорится о росте мощности возобновляемых источников энергии в мире на 75% (или на 2400 ГВт) в период 2022 - 2027 гг. Доля ВИЭ в глобальной выработке электроэнергии вырастет с 25% до 38%. К началу 2025 г. ВИЭ обгонят угольные ТЭС и станут крупнейшим источником электроэнергии в мире, выработка электроэнергии на СЭС вырастет к 2027 г. на 1500 ГВт, на ВЭС – на 570 ГВт. Согласно «Сборнику статистических данных о генерирующих мощностях, работающих на основе ВИЭ 2023», опубликованному Международным агентством по возобновляемым источникам энергии (IRENA) [5], возобновляемая энергетика продолжает расти рекордными темпами, что подтверждает тенденцию к снижению выработки электроэнергии из ископаемого топлива. К концу 2022 г. всемирные генерирующие мощности установок ВИЭ составили 3372 гигаватт (ГВт) благодаря росту на рекордные 295 ГВт, или 9,6% (рисунок 1). Из общего объёма электроэнергетических мощностей 83% пришлось именно на ВИЭ, что является впечатляющим показателем.

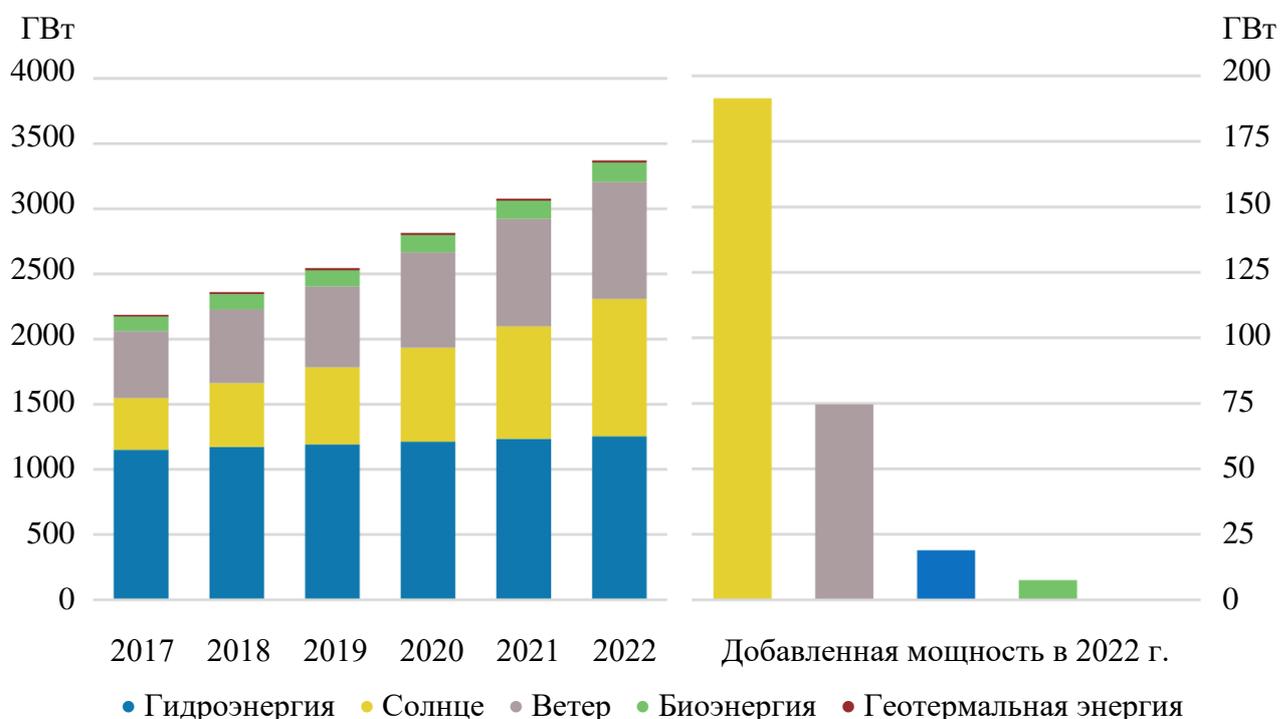


Рисунок 1 – Рост мощности возобновляемых источников энергии в мире

Несмотря на то, что наибольшая доля в общемировом объеме генерирующих мощности ВИЭ приходится на гидроэнергетику (1250 ГВт), самой перспективной прежде всего остается солнечная энергетика. В 2022 году общая вырабатываемая мощность устройств, преобразующих солнечную энергию в электрическую, значительно выросла (в основном за счет увеличения мощностей самих солнечных фотоэлектрических установок) и составила 1053 ГВт. Прирост составил 191 ГВт, что на 22% больше в сравнении с предыдущим годом.

Солнечная радиация – это ресурс, который обладает огромным потенциалом. На протяжении веков Солнце выступало источником тепла, благодаря которому люди могли совершать различные бытовые действия. При этом никто не подозревал о том огромном потенциале, который еще остался скрытым. Только через тысячелетия современные ученые начали считать Солнце источником электрической энергии.

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 глобальному засорению окружающей среды и не вызывает угрозы для общественного здравоохранения [6]. Из исследований американского космического агентства NASA можно сделать заключение, что в среднем 18 солнечных дней на Земле содержат энергию равную той энергии, которая содержится во всех запасах угля и нефти. А пространство вне атмосферы хранит около 1,300 кВт на квадратный метр солнечной мощности [7]. Когда радиация достигнет оболочки атмосферы, приблизительно треть отразится обратно в космос, но остальная продолжит следовать к поверхности Земли.

В среднем по всей поверхности планеты квадратный метр собирает 4,2 киловатт-часов энергии каждый день, что приблизительно равно энергетическому эквиваленту почти барреля нефти в год. Пустыни, с очень сухим воздухом и небольшим количеством облачности, могут получить более чем 6 киловатт-часов в день на квадратный метр в среднем в течение года [8]. Сегодня энергия солнца используется не везде, большинство стран пока еще не готовы внедрять альтернативные источники энергии в качестве основы для городских

электростанций. Независимо от того, насколько обширны возможности солнечной энергии и тепла для каждого человека, есть обстоятельства не позволяющие использовать ее на 100%.

Главной проблемой для широкого внедрения солнечных электростанций является низкий коэффициент преобразования солнечной энергии в электрическую из-за загрязнения поверхности солнечных модулей [9-10]. Эту проблему исследуют ученые-физики, разработчики энергетических технологий и предприниматели всего мира. На сегодняшний день в этом вопросе достигнуты существенные результаты.

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 продолжается и сегодня.

Ряд авторов (Федиев С.Л., Архипов С.Л., Корнилов В.В.) предлагает различные способы повышения устойчивости к механическим и термомеханическим нагрузкам, например, отказ от необходимости обслуживания в процессе эксплуатации благодаря самоочистке поверхности фотоэлектрических модулей, подвесу их на пружинах, создающих постоянные колебания и возможность изгиба фотоэлектрических модулей одновременно в нескольких направлениях. Другие авторы (Смирнов А.В. Васильев А.И., Кочаков В.Д. и др.) предлагают разработку устройств мониторинга и контроля за состоянием поверхности солнечного модуля, для точной фиксации времени, когда именно нужно производить ее очистку. Многие авторы (Альв, Шахзада Памир (Абботабад, Пакистан), Гандидасан, Паланичами (Дахран, ЮАР) предлагают механические системы очистки поверхностей солнечных панелей в несколько этапов: роликовыми щетками, сдуванием загрязнений воздухом и путем статического притяжения оставшегося мусора. Ряд ученых (Шридата Паната и Крипа Варанаси (США) предлагают очищать солнечные панели при помощи электродвигателя, который перемещается вдоль поверхности и заряжает частицы

пыли. Но важным условием для повышения эффективности данного устройства стала влажность воздуха выше 30%, а, значит, устройство эффективно далеко не во всех регионах. Таким образом, проблема очистки солнечных панелей от загрязнений остается актуальной на сегодняшний день, на 100% эффективного решения на данный момент ученым найти не удалось.

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

Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие **задачи исследования**:

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 рабочей солнечной панели 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 конструкцию 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 пыли.
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.

**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.

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

**Практическая значимость.** Результаты 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.

**Методология и методы исследования.** Использовались теоретический и экспериментальный методы исследования. Теоретические методы включали 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.

При экспериментальных исследованиях использовались известные методики проведения экспериментов. Теоретические положения были подтверждены испытаниями устройства, 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 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.

**Апробация результатов работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на ежегодных конференциях аспирантов и докторантов ЮУрГУ (2020 - 2023 г.г.), ежегодных научных конференциях профессорско-преподавательского состава ЮУрГУ (2019 - 2021 гг.), 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, получен 1 патент на полезную модель.

**Соответствие научной специальности.** Тема диссертационного исследования соответствует пунктам п.2 (Математическое моделирование, численные и натурные исследования физико-химических и рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии, их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии), п.3 (Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий и оборудования для производства электрической и тепловой энергии, использования органического и альтернативных топлив, и возобновляемых видов энергии,

водоподготовки и водно-химических режимов, способов снижения негативного воздействия на окружающую среду, повышения надежности и ресурса элементов энергетических систем, комплексов и входящих в них энергетических установок), п.4 (Разработка научных подходов, методов, алгоритмов, технологий конструирования и проектирования, контроля и диагностики, оценки надежности основного и вспомогательного оборудования энергетических систем, станций и энергокомплексов и входящих в них энергетических установок) 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, списка используемой литературы из 94 наименований (отечественных и зарубежных авторов) и 11 приложений. Общий объем диссертации составляет 133 страницы, в том числе 114 страниц основного текста, включающего в себя 42 иллюстрации, 5 таблиц и 19 страниц приложений.

# ГЛАВА 1 ПРОБЛЕМЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

## 1.1 Загрязнение солнечных модулей пылевыми частицами

По различным причинам, вызванными как природными, так и техногенными факторами, эффективность работы солнечного модуля может снижаться. Природные загрязнения и промышленные пыли оседают на поверхности солнечных модулей и снижают КПД его работы на 25 - 30% из-за затенения поверхности и снижения поглощения ею солнечных лучей [11-12].

Это проблема возникает в любом регионе, где используются солнечные энергоустановки. Во многих южных странах загрязнение возникает вследствие пылевых бурь и оседания пыльцы, падения листьев растений, а также загрязнения птицами и животными [13]. Для промышленных районов основной проблемой выступают осадки, содержащие смеси с выбросами от промышленных предприятий или транспортных средств. Пыль и загрязнения существенно снижают эффективность солнечных электростанций из-за затенения [14-16].

Количество твердых пылевых частиц в воздухе так сильно влияет на поступающую солнечную радиацию, что воздействие пылевого экрана учитывают при оценке изменений климата.

Американские ученые совместно с индийскими и китайскими коллегами в 2017 году провели исследования по практической потере электроэнергии солнечными электростанциями из-за пыли на участках солнечных панелей. В течение некоторого времени ученые собрали два образца пыли с участков солнечных панелей электростанций [17]. Затем, после взвешивания при помощи лазерной дифракции, был определён точный размер частиц. Благодаря масс-спектрометрии в составе было установлено точное содержание углерода, азота и водорода. Таким образом, определены не только общие характеристики пылевых частиц на солнечных панелях, но и доля карбонатов и силикатов в составе пыли. Это говорит о высокой степени загрязнения воздуха промышленными выбросами,

ионными аэрозолями, продуктами сгорания угля и нефти и другими продуктами деятельности человека, что позволяет оценить его значительный «вклад» в загрязнение воздуха и, как следствие, в энергетические потери солнечных электростанций. Также аэрозольные частицы, находящиеся в воздухе, рассеивают солнечное излучение, при переходах от относительно низких к высоким уровням аэрозольной нагрузки в загрязненных районах доля рассеивания света увеличивается с 15 до 40% [18].

При сравнении лабораторных данных с мировой климатической моделью CMIP5 было установлено, что в регионах с высоким содержанием твердых частиц и продуктов горения в воздухе (антропогенных углеродных компонентов) доступность солнечной энергии ниже, чем в районах с чистым воздухом.

Основной причиной потери солнечной энергии выступает оседание пыли на поверхности солнечных панелей. Количество солнечной энергии, попадающей на фотоэлементы, при этом уменьшается почти на 17 - 25% по сравнению с регионами, где воздух относительно чистый. В результате загрязнения солнечных панелей такие регионы, как Индия и Китай, теряют соответственно 1 и 11 ГВт электроэнергии в год. Для сравнения мощность Владимирской ТЭЦ-2 – всего лишь 596 МВт [19-20].

Исследование времени оседания пыли и сопоставление толщины пылевого слоя с энергоэффективностью солнечных электростанций показало, как важно вовремя отмывать солнечные панели. Например, если очищать панели каждые 20 - 30 дней, выработка энергии увеличивается в среднем на 50% [21]. Вышеописанные факты касаются в основном солнечных станций небольшой мощности, расположенных вблизи или непосредственно в городах (в крупных населенных пунктах).

Иная ситуация обстоит с промышленными крупными электростанциями, в географическом расположении которых основным фактором является количество солнечных дней в году. Поверхность Земли не полностью подчиняется широтной зональности, что объясняется различиями в облачности и прозрачности атмосферы (рисунок 1.1).

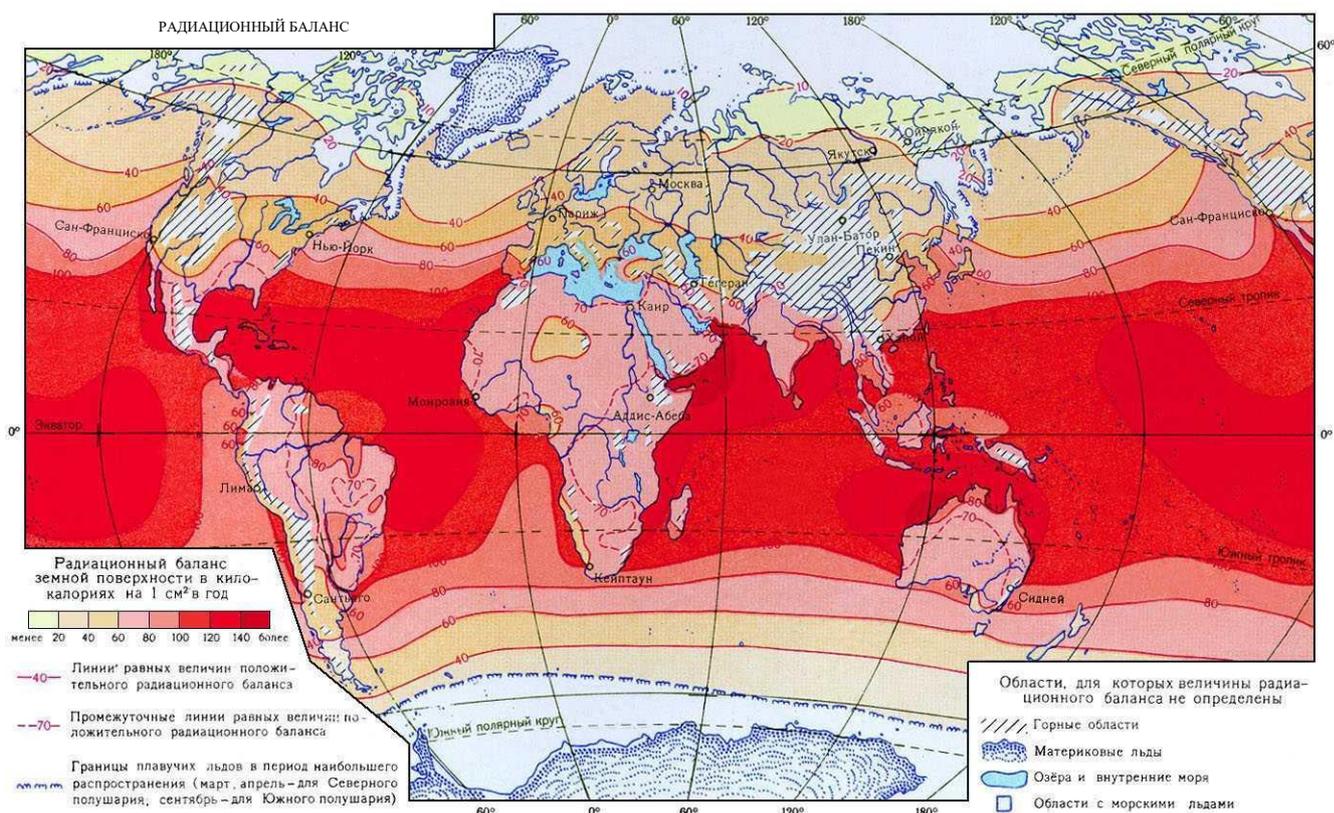


Рисунок 1.1 – Среднегодовое количество солнечной радиации

В тропиках и субтропиках среднее годовое количество радиации составляет более 5,9 тыс. МДж/м<sup>2</sup>. Особенно оно велико в малооблачных субтропических пустынях, а в Северной Африке достигает 8,4 - 9,2 тыс. МДж/м<sup>2</sup>. Рекордным является значение радиации в 9218 МДж/м<sup>2</sup>, наблюдаемое на юге Египта. Для этого района характерна и максимальная продолжительность солнечного сияния – 4300 часов в год, что составляет 97% от максимально возможной. В приэкваториальных лесных областях, например, в бассейнах рек Амазонки и Конго, Индонезия, величина суммарной радиации сокращается до 4,2 - 5,0 тыс. МДж/м<sup>2</sup>, что связано с высокой облачностью. В умеренных широтах (примерно на 60° широты обоих полушарий) количество поступающей радиации снижается, достигая минимума в 2,5 - 3,3 тыс. МДж/м<sup>2</sup>. И далее снова происходит незначительный рост в Северном полушарии и очень существенный в Южном. В глубине Антарктиды суммарная радиация достигает 5,0 - 5,4 тыс. МДж/м<sup>2</sup>, это близко к тропическим значениям и превышает экваториальные.

Над сушей суммы радиации больше, чем над океаном. Например, на территории бывшего СССР годовая сумма радиации колеблется от 2514 - 3352 МДж/м<sup>2</sup> на севере и до 6704 МДж/м<sup>2</sup> в Средней Азии [22-23].

Поэтому крупнейшие солнечные электростанции (СЭС) обычно расположены в пустынях или на больших равнинах с максимальным количеством солнечных дней в году, минимальным количеством выпадающих осадков, возможностью увеличения площади и, соответственно, увеличением мощности.

Самая большая СЭС в мире находится в городской округе Чжунвэй Нинся-Хуэйского автономного района КНР и называется Тэнгер (Tengger Desert Solar Park), в переводе означает «Великая солнечная стена» (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Tengger Desert Solar Park (КНР)

Солнечная электростанция расположена на территории пустыни Тэнгер, занимает около 3,25% ее площади (43 км<sup>2</sup>.) Максимальная мощность СЭС составляет 1,547 ГВт, что можно сравнить с мощностью среднестатистического ядерного реактора [24].

В спике крупнейших СЭС мира также находится станция Datong Solar Power Top Runner Base, запущенная в эксплуатацию 2016 году (рисунок 1.3), ее максимальная мощность составляет 3 ГВт.



Рисунок 1.3 – Datong Solar Power Top Runner Base (КНР)

В числе первых десяти по величине СЭС находится и Kurnool Ultra Mega Solar Park в Индии (рисунок 1.4). Выдаваемая мощность составляет 900 МВт. Располагая более 5812 акрами пересохших ландшафтов в деревнях Гани и Сакунала, KUMSP имеет ошеломляющие 40 000 000 солнечных панелей по 315 Вт каждая, в настоящее время они вырабатывают 90% установленной мощности и подключены к четырем близлежащим станциям 220/33 кВ мощностью 250 МВт каждая, а также к сетевой подстанции 400/220 кВ через лабиринт кабелей длиной 2000 километров [25].



Рисунок 1.4 – Kurnool Ultra Mega Solar Park (Индия)

В Соединенных Штатах Америки первое место занимает СЭС Solar Star, расположенная в штате Калифорния с номинальной мощностью около 579 МВт (рисунок 1.5). На объекте насчитывается 1,7 млн солнечных панелей, которые могут обеспечить электричеством примерно 255 тысяч домохозяйств. С помощью этого и других проектов власти Калифорнии планируют к 2045 году полностью перевести штат на альтернативную энергетику [24].



Рисунок 1.5 – Solar Star (США)

Практически все районы размещения крупных электростанций подвержены воздействию песчано-пылевых бурь – сильные ветры поднимают большое количество песка и пыли с открытых сухих почв в атмосферу. Как правило, пыльные бури возникают в результате мощных гроз или циклонов, которые приводят к увеличению скорости ветра на большой площади. Сильные ветра поднимают огромное количество песка и пыли с земли в атмосферу, перенося их на сотни тысяч километров.

После отрыва от поверхности частицы пыли поднимаются выше посредством турбулентного перемешивания и конвективных восходящих потоков. Далее они могут переноситься ветрами в течение определенного времени в зависимости от их размера и метеорологических условий региона, прежде чем снова вернуться обратно на поверхность [26-27].

Более крупные частицы осаждаются достаточно быстро, но частицы меньших размеров в большей степени подвержены переносу. Средняя продолжительность пребывания частиц пыли с диаметром менее 1 мкм в атмосфере составляет от нескольких часов до 10 дней [28].

Аэрозоли и минеральная пыль в воздухе оказывают воздействие на погоду, региональный и глобальный климат на всей планете. Частицы пыли, особенно покрытые загрязнением, работают как ядра конденсации для формирования теплых облаков и как эффективные агенты ледяных ядер для образования холодных облаков. Такая способность пыли зависит от их размеров, формы, состава, что в свою очередь зависит от природы происхождения почвы, выбросов и процессов переноса.

Модификация микрофизического состава формируемых пылевыми частицами облаков изменяет его способность поглощать солнечное излучение, что также косвенно влияет на солнечную радиацию, которая достигает поверхности Земли [29]. Частицы пыли также влияют на рост облачных капель и кристаллов льда, что оказывает влияние на количество и местоположение осадков.

Можно сказать, что переносимая в атмосфере пыль оказывает то же действие, что и парниковый эффект – она поглощает солнечную энергию, рассеивает солнечную радиацию, в целом уменьшает количество радиации, достигающей до поверхности Земли, а также поглощает длинноволновую радиацию, отражающуюся от поверхности, переизлучая ее во всех направлениях [30].

Таким образом, пылевые частицы в воздухе представляют серьезную угрозу для восприятия световой волны светочувствительным фотоэлементом солнечного модуля как с точки зрения внешнего освещения, так и с позиции оседания на поверхности (рисунок 1.6).

Несколько спасает ситуацию высадка низкорослых кустарников. Однако не везде имеется такая возможность, также для этого необходима дорогая система полива. А на территории засухоустойчивых пустынь такое мероприятие становится практически невозможным.



Рисунок 1.6 – Запыленная панель СЭС

Поскольку солнечные электростанции занимают огромные площади, естественно, встает вопрос об экономической целесообразности их использования в целом – компенсирует ли увеличение вырабатываемой энергии расходы на очистку панелей.

По этой причине основная задача заключается в определении того самого момента, когда загрязнение поверхности солнечного модуля станет критическим и вызовет значительные потери генерации электроэнергии.

## **1.2 Осадки и биологические загрязнения, влияющие на эффективность работы солнечных модулей**

Природа способна самоочищаться, поэтому при попадании в атмосферу вредных веществ от техногенных источников они оседают на поверхности солнечных панелей и надолго задерживаются на агрегате. Все эти процессы происходят за счет ветра и зависят от температуры воздуха, солнечной радиации, атмосферных осадков и других метеорологических факторов.

Направление переноса примесей в верхние слои атмосферы определяется характером распределения температуры воздуха по высоте. Уровень изменения температуры с высотой зависит от вертикального градиента температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) на единицу высоты от поверхности почвы (обычно на 100 м) [31].

При равновесии атмосферы в ней длительно сохраняется устойчивое состояние, но чаще – неустойчивое. Степень устойчивости атмосферы определяется поведением воздушных частиц, вышедших из первоначального положения в выше- или нижележащий слой атмосферы.

В случае, если градиент температуры в сухой атмосфере будет равен  $1^{\circ}\text{C}$  на 100 м, то воздух на любой высоте будет находиться в равновесии. Тогда говорят, что атмосфера находится в состоянии безразличного равновесия или что наблюдается равновесная стратификация [32]. Как правило, в естественных условиях влажного воздуха равновесное состояние наблюдается при меньшем градиенте температуры (примерно  $0,6^{\circ}\text{C}$  на 100 м).

Согласно законам физики частица теплого воздуха поднимается вверх, а холодного – опускается вниз. Как правило, выбросы загрязняющих веществ из источников имеют более высокую температуру и поэтому поднимаются вверх, после чего постепенно охлаждаются и рассеиваются.

При вертикальном градиенте в несколько раз больше  $1^{\circ}\text{C}$  на высоте более 100 м в атмосфере возникают неупорядоченные движения воздуха – атмосферная турбулентность [33]. В результате происходит нарушение закономерности распределения температуры воздуха с высотой.

Повышение температуры с высотой называется инверсией температур, которая могут возникать у поверхности земли (приземная инверсия), или на определенной высоте (высотная инверсия), если инверсия происходит на небольшой высоте от земли, ее именуют приподнятой. Инверсия характеризуется вертикальной протяженностью (или мощностью), т.е. разницей высот от верхней до нижней границы инверсии, и интенсивностью, т.е. разницей значений температуры на верхних и нижних границах инверсии.

Приземные инверсии образуются вследствие выхолаживания воздуха над почвой. Инверсионные процессы свободной атмосферы развиваются в результате атмосферных циркуляционных процессов (циклонов и антициклонов, холодного воздуха и теплых воздушных фронтов).

Когда слой инверсии находится, например, над трубой источника промышленных выбросов, в приземном слое атмосферы могут создаваться опасные условия загрязнения. Инверсионный слой ограничивает подъем выбросов, препятствует их опусканию и накоплению в приземном слое.

Инверсия, находящаяся ниже уровня выбросов, препятствует их перемещению к земной поверхности. В этом случае слой инверсии выполняет полезную функцию.

Для городской среды, где существует множество низких источников выбросов, и при условии, когда температура выбросов близка к температуре окружающего воздуха, при приподнятых и приземных инверсиях создаются благоприятные условия для накопления вредных веществ и взвесей.

Максимальная концентрация обычно создается в пределах расстояния, кратного 10 - 20 высотам труб источника выбросов. Так что при проектировании размещения СЭС следует учитывать повторяемость направлений ветра (розу ветров), особенно со стороны предприятий, а также ориентацию и приближенность к источнику выбросов.

Принимать во внимание нужно не только направление, но и скорость движения ветра. В приземном слое скапливаются выбросы низкоорганизованных источников, которые образуются при слабом ветре. Наибольшую концентрацию примесей в городах можно обнаружить при скорости ветра 0 - 1 м/с [34].

Выбросы с промышленных предприятий, расположенных на высоте, создают значительные концентрации примесей у поверхности земли при так называемой опасной скорости ветра. Факел (воздушная смесь) вылетает с определенной скоростью из высоких труб. При температуре более высокой, чем окружающий воздух, смесь поднимается вверх, и вредные примеси уносятся в верхние слои атмосферы.

При слабом ветре подъем факела увеличивается, и примесь почти не достигает земли. Сильные ветра переносят примеси с большой скоростью на значительные расстояния, распространяя загрязнение с места выброса.

Но есть некая промежуточная скорость ветра, когда факел опускается к земле (создается эффект «задымления»), при этом в приземном слое формируется высокий уровень загрязнения. Такая скорость ветра и является самой «опасной». Ее величина определяется высотой, скоростью и температурой выбросов из источника, например для тепловых электростанций она равна 4 - 6 м/с [35].

В настоящее время наибольшую опасность представляют такие условия, как застой воздуха – это ситуация, при которой приземные инверсии температуры происходят при скорости ветра 0 - 1 м/с. В этот момент выбросы вредных веществ не могут подниматься в верхние слои атмосферы и уноситься от источника выхлопов. В случае застоя воздуха все вредные вещества собираются у источника выбросов.

В условиях тумана примеси поглощаются не только с поверхности, но и из более загрязненных слоев воздуха, что приводит к общей высокой концентрации загрязнений воздуха. Например, при растворении в каплях тумана диоксидов серы образуются капли более токсичной серной кислоты. В результате этого происходит увеличение общей массовой концентрации примеси, так как из 1 г двуокиси серы образуется 1,5 г серной кислоты. В атмосферных осадках также происходит переход двуокиси серы в серную кислоту, что является одной из причин кислотных дождей [36].

Туман, содержащий частицы дыма и вредных веществ, называется смогом. Часто в сообщениях СМИ можно прочитать информацию о наличии смога как раз таки в Уральском регионе и конкретно в городе Челябинске [37]. С появлением смогов связывают периоды особо высокого уровня загрязнения воздуха, которые сопровождаются ростом заболеваемости и даже смертности населения.

В процессе самоочищения атмосферы важную роль играют атмосферные осадки. Пыль, капли дождя или снежинки захватывают частицы пыли, сажи, дыма в атмосфере по пути следования и уносят к поверхности земли. Процесс

самоочищения происходит в облаках, где облачные капли захватывают пылинки, частицы сажи и дыма, а также при прохождении дождевых капель и снежинок через слой атмосферы. Высокая концентрация осадков обычно наблюдается после дождя, но не всегда это происходит в течение одного дня. Чем больше осадков выпало, тем чище атмосфера. Однако помимо процесса очищения атмосферы осадки способствуют загрязнению почвы и водоемов вредными веществами.

Определенно большую роль в формировании уровня загрязнения атмосферного воздуха играет и солнечная радиация. В южных районах при высокой интенсивности солнечного света происходит фотохимическая реакция: окисление диоксида серы с образованием сульфатных аэрозолей [38]. При наличии в атмосфере окислов азота и органических веществ в ясные солнечные дни возможны фотохимические процессы с образованием фотохимического смога. Самыми вредными продуктами фотохимической реакции являются ПАНы (пероксиацетилнитраты).

В атмосфере выбросы промышленных предприятий и других техногенных источников подвержены воздействию всех метеорологических факторов, которые и определяют уровень загрязнения. Сочетание метеорологических условий, обуславливающих накопление примесей в атмосфере, называют метеорологическим потенциалом загрязнения атмосферы (ПЗА), а обуславливающих их рассеяние – рассеивающей способностью атмосферы (РСА), которая в свою очередь влияет на коэффициент полезного действия солнечной панели. Воздействие различных составляющих ПЗА зависит от расположения источников, параметров выбросов и повторяемости компонентов ПЗА. При частых повторениях неблагоприятных условий увеличивается количество примесей, что приводит к возрастанию среднего уровня загрязнения. Повторяемость условий, благоприятных для рассеивания примесей существенно изменяется в течение года. В зависимости от вида источников и характера их размещения по территории города изменчивость концентрации примеси, обусловленная изменениями метеорологических условий, может быть весьма значительной.

Роль погоды в формировании среднего уровня загрязнения иногда может сильно преобладать по значимости над ролью количества и состава выбросов. Важно уделить особое внимание к климатическим условиям района при проектировании СЭС. Допустим, в ближайшее время прогнозируются неблагоприятные условия рассеивания, что приведет к увеличению количества примесей в воздухе города. На промышленное предприятие передается специальное предупреждение о возможном повышении уровня загрязнения. В такие периоды некоторые предприятия сокращают выбросы в атмосферу вредных веществ или приостанавливают запланированные ранее залповые выбросы, не отключают пылеочистные сооружения и другие устройства. Однако, чаще всего такие меры проводятся локально на отдельных предприятиях, когда остальные продолжают работу в штатном режиме, и в масштабах целого района они не приносят желаемого результата.

Особенное внимание стоит уделить факту того, что источниками загрязнения атмосферы являются совершенно новые, искусственно созданные вещества и соединения. По данным Всемирной организации здравоохранения, из 105 известных элементов таблицы Менделеева 90 используются на производствах и на их основе получено более 500 новых химических соединений. Почти 10% этих веществ попадают под определение вредных или особо опасных для здоровья [39].

Для того, чтобы систематизировать и понять процессы загрязнения солнечных панелей, следует выделить основные виды промышленных пылей в зависимости от механизма их образования:

- а) механическая пыль – образуется в результате измельчения продуктов производства в процессе технологического процесса;
- б) возгоны – образуются из-за объемной конденсации паров веществ при охлаждении газа, проходящего через технологическую установку или агрегат;
- в) летучая зола – это содержащийся в дымовом газе во взвешенном состоянии несгораемый остаток топлива, состоящий из минеральных примесей, остающихся после процесса горения;

г) промышленная сажа – это твердый высокодисперсный углерод, образующийся при неполном сгорании или термическом разложении углеводородов.

Самый важный параметр, который характеризует взвешенные частицы – это их размер. Он колеблется в достаточно широких пределах от 0,1 до 850 мкм. Наибольшее влияние оказывают частицы от 40 до 850 мкм, так как они самые тяжелые [40].

Наиболее распространенными источниками аэрозольных загрязнений воздуха являются теплоэлектростанции (ТЭС), потребляющие уголь высокой зольности, обогатительные фабрики и металлургические, цементные, магнезитовые и другие заводы. Аэрозольные частицы, поступающие в атмосферу от таких источников, имеют в составе большое химическое разнообразие. Чаще всего они содержат соединения кремния, кальция и углерода, в них чаще, чем в других, встречаются оксиды металлов: железа (магний), марганца или меди (никель), свинца, сурьмы, висмута, мышьяка, селена-хромокарбоната, натрия с кобальтом, а также асбеста [41]. Еще большее разнообразие свойственно органической пыли, включающей алифатические и ароматические углеводороды, соли кислот. Она образуется в результате сжигания остаточных нефтепродуктов, пиролиза на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и других предприятиях.

К постоянным источникам аэрозольного загрязнения относятся промышленные отвалы – искусственные насыпи из переотложенного материала, преимущественно вскрышных пород, образующихся при добыче полезных ископаемых или же из отходов предприятий перерабатывающей промышленности, ТЭС. Большая часть аэрозолей образуется в атмосфере при взаимодействии твердых и жидких частиц друг с другом или с водяным паром.

Производство цемента и других строительных материалов также влияет на загрязнение атмосферы пылью. Для сравнения, сжигание каменного угля и производство цемента дают суммарный выброс пыли в атмосферу, равный 170 миллионам тонн в год.

К причинам серьезного ухудшения качества атмосферы следует отнести и загрязнение ее радиоактивной пылью. В случае ядерного взрыва или аварии на

АЭС большая часть радионуклидов образуется в результате деления урана-235, урана-238 и плутония-239 [42]. За несколько десятков секунд после взрыва образуются около 100 различных радионуклидов, 29 из которых вносят наибольший вклад во радиоактивное загрязнение атмосферы через час, 20 – через сутки, а 3 – только через 100 лет [43].

Негативное влияние на поверхность солнечных панелей оказывают соединения серной кислоты и азота с последующим выпадением осадков в виде кислотных дождей. Кислотный дождь образуется из-за выброса в атмосферу оксидов серы и азота предприятиями топливно-энергетического комплекса, автотранспортом, а также химическими и металлургическими заводами, в результате чего образуются кислотные дожди. Основное внимание обращается на содержание катионов водорода, определяющих кислотность (рН), при анализе состава кислотного дождя. Для чистой воды водородный показатель  $pH = 7$ , что соответствует нейтральной реакции. Растворы с рН ниже 7 являются кислыми, выше - щелочными.

Из года в год все очевиднее становится влияние кислотных дождей на широкую гамму конструкционных материалов. Интенсивность разрушения материалов зависит от их пористости и ее удельной поверхности, от конструкционных особенностей, ведь при наличии различных выемок они являются коллекторами кислотных осадков, от условий эксплуатации (скорости ветра, температуры, влажности воздуха и т.д.) [44].

Если говорить о загрязнении атмосферы биологическими примесями, то выделяют две группы: патогенные микроорганизмы (бактерии, вирусы и грибы) и макроорганизмы (растения и животные). К первым относятся живые существа размерами меньше 500 мкм. Устойчивые к солнечной радиации колонии микроорганизмов могут оказывать особое негативное влияние на эффективность работы солнечной панели, вызывать адгезию на поверхности солнечных панелей, приводить к их общей деградации из-за нарушений технических условий эксплуатации агрегатов. Макроорганизмы оставляют продукты своей жизнедеятельности, также приводящие к ухудшению условий работы СЭС.

### **1.3 Климатические условия, влияющие на эффективность работы солнечных модулей**

Специфичную роль в миграции и концентрации загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы играют климатические факторы. Сейчас при большом разнообразии климатических факторов их количественный учет при экологических расчетах возможен лишь для некоторых из них. Это температура воздуха и выбросов, скорость ветра и его направление, стратификация приземной атмосферы, уровень осадков, влажность и некоторые другие.

Поэтому при сухой атмосфере тонкая и частично средняя пыль не осаждается в местах выброса и может попасть в воздушные потоки трансграничных региональных и глобальных загрязнений. Но при влажной атмосфере эти частицы могут как раз таки быть вымыты с осадками и оказаться на земной поверхности вблизи места выброса.

Газообразные поллютанты также выводятся из атмосферы и оседают на землю с дождем или снегом. Изучая снег в качестве депонирующей среды, необходимо помнить, что он не является абсолютно химически инертной средой, он участвует в реакциях обмена с прилегающим воздухом.

Масса загрязнённого воздуха на высоте 1000 - 3000 м покрывает территорию промышленного города. В ней эпизодически, но чаще непрерывно, увеличивается количество загрязняющих веществ, которые оседают на депонирующие среды (почва, снег, донные отложения), либо выносятся за городскую черту по розе ветров. Над городом и его окрестностями формируется пятно хронического загрязнения, которое накладывается поверх техногенного атмосферического купола тепла (до + 5 - 6 градусов) [45-46].

Основные негативные последствия загрязнения атмосферного воздуха в урбанизированных районах заключаются в следующих аспектах:

а) снижение солнечной ультрафиолетовой радиации до 30 %, уменьшение продолжительности солнечного сияния до 15 %;

- б) 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;
- в) увеличение по сравнению с фоном аэрозольных примесей в 500 раз;
- г) повышение времени облачности и туманов летом на 30 %, зимой – на 200 %;
- д) температура суточного минимума на 1,0 - 9,0 °С выше;
- е) скорость ветра: среднегодовая на 20 - 30 % меньше, сильные порывы – на 10 - 20 % меньше, штили – на 5 - 10 % больше;
- ж) 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;
- з) за счет различных видов химической, физико-химической и микробиологической коррозии повышается износ материалов конструкций, строений и памятников архитектуры;
- и) уменьшение площадей, покрытых растительностью, болезни деревьев;
- к) изменение климата, биохимические кругообороты основных компонентов атмосферы (воды и азота), увеличение количества осадков и преобладание среди них кислотных дождей;
- л) отдаленные последствия, связанные с генетическими изменениями человеческого вида.

## **1.4 Современные способы и технологии очистки солнечных модулей от загрязнений**

### **1.4.1 Ручная очистка солнечных модулей**

Очистка солнечных модулей имеет свои особенности: при мойке на поверхности PV элемента не должно оставаться царапин, разводов и остатков химических реакций (рисунок 1.7).

Неправильный способ мойки или плохая вода могут повредить солнечные батареи и другие комплектующие модуля и, как следствие, снизить их производительность.



Рисунок 1.7 – Пример ручной очистки поверхности солнечных модулей

Рассмотрим основные особенности, этапы и сложности, возникающие при ручной мойке солнечных панелей:

а) безопасность персонала: солнечные батареи соединяются последовательно и генерируют постоянный ток до 800 ампер; сколы в батареях или повреждения кабеля / штекерных соединений чрезвычайно опасны для мойщиков, особенно, когда батареи сухие, и даже во время низкой освещенности солнечные батареи продолжают производить опасные для технического персонала значения тока;

б) определенное, ограниченное, приемлемое для мойки солнечных панелей время: рекомендуемое время для мойки – это период низкой освещенности, время самой низкой генерации, а именно период от заката до рассветного времени, когда электростанции не работает, и риск поражения электрическим током минимален (но все также возможен);

в) качество воды: для мойки солнечных батарей необходимо использовать деионизированную воду, при отсутствии таковой можно использовать дождевую воду или же воду из крана; важно учитывать, что вода, которая поступает на панель, должна содержать низкое количество минеральных веществ с общей жесткостью не более 75 ppm; при использовании воды с минеральным составом более 75 ppm, но менее 200 ppm вода должна подаваться под давлением для предотвращения образования твердого осадка на поверхности солнечных батарей; воду с содержанием минералов более 200 ppm нельзя использовать; всегда необходимо быть уверенным, что используемая вода очищена от песчинок и физических примесей, которые могут сильно повредить поверхность солнечных модулей;

г) использование моющих средств: в сочетании с деионизированной водой возможно использование мягких, неабразивных моющих средств; использование абразивных чистящих средств или очистителей не допускается; также нельзя использовать кислотные и щелочные чистящие вещества;

д) удаления грязи: для удаления въевшейся грязи, такой как птичий помет, мертвые насекомые и т.д., используются мягкие губки, микроволоконные ткани или неабразивные щетки; этот этап требует особого навыка, затрачивает значительный человеческий ресурс, особенно, учитывая площадь крупных СЭС;

е) протирка: после мойки солнечных батарей следует вытереть панель с использованием замши или резиновых скребков с пластиковой рамкой; для удаления остатков воды с поверхности батареи, ее нужно протирать сверху вниз; этот этап также требует значительных затрат человеческого ресурса;

ж) давление воды: вода должна подаваться с давлением не выше 35 бар из распылительного устройства; при использовании шлангов высокого давления возможно избыточное давление, что повлечет за собой повреждение панели;

з) температура воды: температура жидкости, используемой для мойки, должна быть такой же, как и температура окружающей среды во время обслуживания; попку следует производить по мере охлаждения солнечных модулей, чтобы избежать теплового удара и трещин на поверхности агрегата.

Компания Karcher в рамках сотрудничества с футбольным клубом Freiburg в 2018 году помогла отчистить 280 солнечных модулей расположенные на крыше стадиона MAGE SOLAR Stadion в Фрайбурге, Германия (рисунок 1.8). Чистка проводилась при помощи специально разработанной насадки для профессиональных аппаратов высокого давления, для бережной чистки солнечных панелей – iSolar [47].

На очистку модулей высокотехнологическим оборудованием Karcher потребовалось времени около 1 месяца. Для сравнения, для ручной очистки СЭС Tengger Desert Solar Park специалистам Karcher потребовалось бы обработать площадь 43 км<sup>2</sup> (или 5688 стадионов в городе Фрайбурге) примерно за 15 - 16 лет.

Таким образом, на промышленном уровне ручная очистка солнечных модулей не может быть задействована ввиду очень низкой эффективности, большого риска здоровья обслуживающего персонала, необходимости наличия огромных запасов воды, химических средств очистки и, как следствие, высокой себестоимости производства работ.



Рисунок 1.8 – Фотоотчет по очистке солнечных панелей на стадионе Фрайбурге

## 1.4.2 Автоматизированная очистка солнечных модулей

Сейчас не существует единого подхода в автоматизированных системах очистки солнечных панелей от технологической и биологической пыли. Различные производители и инженерные компаний выпускают разнообразные механизмы очистки поверхностей.

Известна система очистки солнечных панелей [48], содержащая защитный корпус, устанавливаемый на солнечную батарею, с приводным устройством для движения вдоль панели чистящей щетки, при этом щетка располагается между шкивами (рисунок 1.9). В качестве дополнительных элементов на панели установлены резервуары с чистящей жидкостью и датчики, которые определяют загрязнение на защитной панели. При обнаружении загрязнений щетка запускается приводным механизмом, а затем распыляется спрей с чистящей жидкостью. Недостатками системы являются большие габариты, наличие дополнительных конструкций, невозможность использовать в зимнее время из-за низких температур и возможного оледенения, использование такой очистительной панели создает препятствие для прохождения солнечного потока, что снижает КПД всей системы, не автономность – в любом случае необходимо вмешательство сотрудника СЭС для залива чистящих средств, мытья щеток и пр.



Рисунок 1.9 – Автоматизированная система очистки панелей, содержащая защитный корпус и очистительные щетки

Известна система очистки солнечных панелей [49], которая включает в конструктив линию подачи жидкости, первый конец которой подключен к источнику водоснабжения, а второй конец – имеет множество сопел для распыления чистящей жидкости под давлением (рисунок 1.10). Также, система включает в себя насос-нагнетатель давления и емкость с очистительным веществом. В момент подачи жидкости химическое вещество смешивается с водой, и создается чистящая жидкость, которая позволяет растворять грязь и пыль на поверхности.

Недостатки данной системы заключаются в невозможности использования зимой из-за низких температур (возможного оледенения линий подачи жидкости), наличие дополнительных насосов, которые нуждаются в мощных источниках энергии и необходимость использования чистящих средств, которые в свою очередь стекают и впитываются в почву, загрязняя окружающую среду.

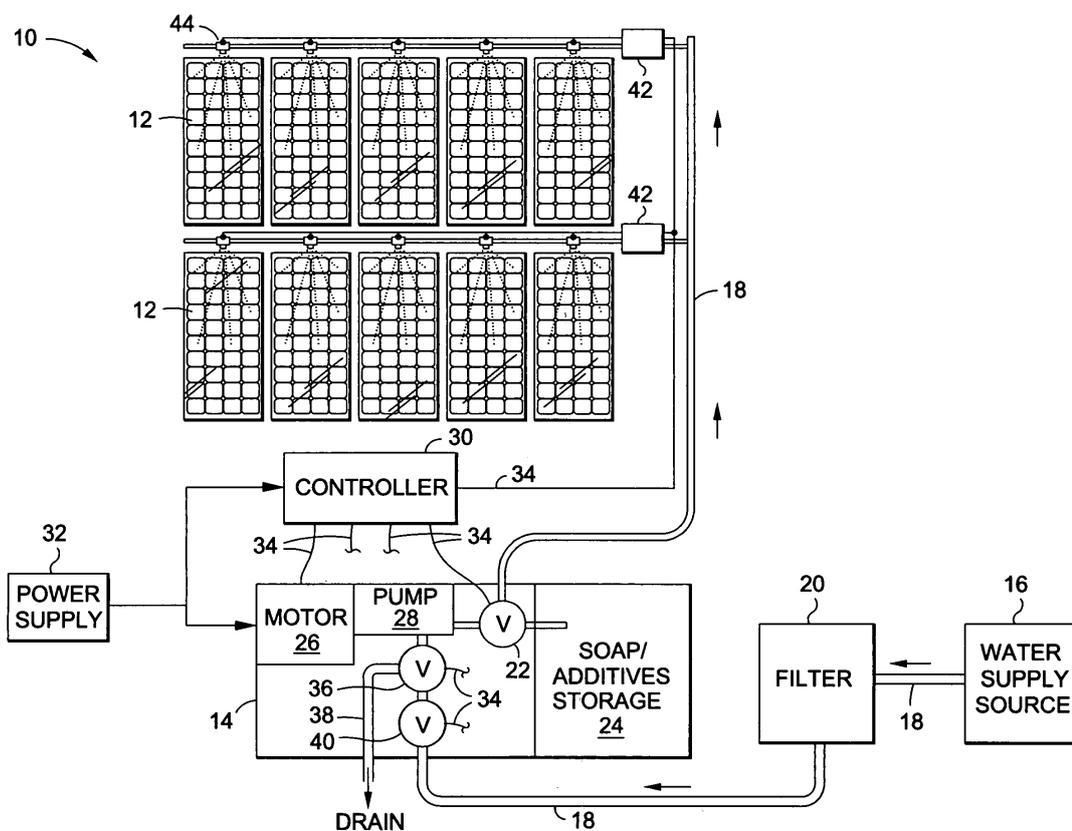


Рисунок 1.10 – Автоматизированная система очистки панелей, содержащая линию подачи жидкости

Известно устройство для очистки солнечных панелей, которое состоит из нагнетателя воздуха (компрессора), двух валиков, один из которых очищает механический слой поверхности солнечной панели, а второй статическим образом притягивает оставшиеся частицы пыли [50]. Движение устройства осуществляется по направляющим, установленным по всему линейному массиву панелей. Устройство приводится в движение за счет энергии от аккумуляторной батареи.

Основными недостатками данной системы являются огромные габариты, наличие дополнительных конструкций, по которым передвигается данное устройство и невозможность использовать ее зимой из-за низких температур и возможных оледенений конструкции.

Известно устройство для очистки солнечных панелей, представляющее из себя каретку, на которой установлены контролеры загрязнения, и щетки для чистки панелей [51]. Каретка движется по рельсам, которые установлены вдоль солнечных панелей, в течение движения происходит определение степени загрязненности. При обнаружении загрязнения на панелях каретка проводит процедуру очистки щетками с моющими средствами.

Среди минусов данной системы можно отметить невозможность использования в зимнее время из-за низких температур и возможных оледенений чистящих средств, большие размеры, наличие рельс, по которым передвигается устройство, не автономность устройства, необходимость применять чистящие средства.

Учеными разработана интеллектуальная самоочищающаяся солнечная панель, состоящая из высокопрозрачного полимера в качестве основного компонента, датчиков загрязнения и генераторов ультразвуковых волн, входящих в конструктив самой панели [52]. При обнаружении загрязнения ультразвуковые волны, создаваемые генератором, и очищают поверхность панелей.

Из недостатков данной системы стоит отметить необходимость изначальной специфичной заводской сборки солнечной панели, пока что невозможно установить такую систему в полевых условиях.

### 1.4.3 Роботизированная очистка солнечных модулей

Наряду с разработкой автоматизированных систем ведущие робототехнические компании также пытаются решить проблему загрязнения солнечных панелей, применяя при этом высокие технологии.

В Саудовской Аравии были представлены роботизированные установки NOMADD (NO-water Mechanical Automated Dusting Device) [53]. Устройство занимается удалением пыли с поверхности солнечных модулей без помощи воды. Один NOMADD может в течение суток очистить ряд панелей длиной около 200 метров (рисунок 1.11).

Основным минусом является необходимость установки такой системы на каждую панель в отдельности, и ее работа подразумевается все время только на одной и той же панели. В промышленных масштабах необходим большой парк роботизированных установок с соответствующими затратами на их производство и содержание.



Рисунок 1.11 – Роботизированная установка NOMADD (Саудовская Аравия)

Израильская компания «Ессориа» выпустила интеллектуальных роботов, которые способны автоматически очищать солнечные панели [54]. Сотня таких роботов была установлена и проверена в полевых условиях на солнечной электростанции Kibbutz Ketura (рисунок 1.12).



Рисунок 1.12 – Интеллектуальный робот Эссориа (Израиль)

Для проведения очистки робот использует ткань из микрофибры, контролируемый воздух, при этом не использует водопровод. Каждый робот может очистить 9,2 квадратных метров в минуту. Для сравнения, раньше солнечные панели на электростанции Kibbutz Ketura очищались девять раз в год – эта процедура была трудоемкой и энергозатратной. Роботы от Эссориа управляются дистанционно и работают одновременно, запускаются параллельно в одно и то же время на всех панелях, при этом они энергетически независимы друг от друга, поскольку имеют собственные солнечные батареи на корпусе. Основным недостатком, конечно, является высокая стоимость.

В Японии представлен робот для очистки панелей компании Miraikikai. Робот оснащен вращающейся щеткой, которая очищает поверхность панели без использования воды. Заряда встроенных аккумуляторов устройства хватает на 2 часа работы (рисунок 1.13).



Рисунок 1.13 – Робот Miraikikai (Япония)

Автоматические роботы не введены в промышленную эксплуатацию в полной мере и еще находятся в стадии доработки и совершенствования. Основной недостаток – наличие сложных конструктивов, высокая себестоимость с необходимостью дорогостоящего обслуживания.

Основным недостатком всех вышеописанных методов является то, что они очищают уже загрязненные модули, а не предотвращают их загрязнение, тем самым приближают деградацию модулей и уменьшают срок их эксплуатации.

Указанный недостаток частично устранен в прозрачном самоочищающемся пылезащитном экране [55], содержащем панель из прозрачного непроводящего (диэлектрического) материала со встроенными параллельными электродами.

Недостатком указанного метода является то, что он не подходит для крупных наземных солнечных электростанций и систем, поскольку требует дорогостоящих электродов ИТО и трехмерной конструкции на конце электрода.

## **Выводы по главе 1**

Технологии получения электрической энергии путем преобразования определенного спектра солнечной радиации в последнее десятилетие начали активно развиваться в сравнении с предыдущим столетием. Уже сегодня уровень выработки электроэнергии сравним с ядерными технологиями, что говорит о неминуемой перспективе развития этого направления. Но следует отметить, что в общем мировом количестве источников электроэнергии альтернативные электростанции (солнечные, ветровые, гидроэлектростанции и пр.) пока что составляют не более 10%.

При проектировании солнечных электростанций существует ряд проблем, приводящих к значительному снижению выработки электроэнергии и повышению эксплуатационных затрат, а именно, загрязнение поверхности модулей частицами пыли, атмосферными осадками, промышленными отходами и биологическими загрязнениями. Учитывая места на земном шаре с максимальным количеством солнечных суток и минимальным уровнем выпадающих осадков, как, например, в

малооблачных субтропических пустынях в Северной Африканской области или на юге Египта, а также возможность расширения зоны покрытия солнечными модулями, однозначно встает вопрос о технологии очистки солнечных панелей, которая должна быть эффективной и экономически выгодной.

На данный момент на электростанциях в основном используется ручной способ очистки солнечных панелей. 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 панелей от загрязнений.

Но на данный момент ни один из существующих способов не может считаться на 100% эффективным, так как каждый 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 [52]. При том такие меры ведут за собой неминуемые потери электроэнергии из-за затенения поверхности солнечных панелей.

Можно сделать вывод, что на данный момент отсутствуют промышленные комплексные технологии по очистке поверхностей солнечных модулей. Согласно вышесказанному, необходимо предпринять меры по защите поверхностей солнечных панелей от песка, промышленной пыли и техногенных выбросов и разработать эффективный способ защиты от осаждения загрязнений на поверхность солнечных панелей.

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 панелей от пылевых и прочих загрязнений и снизить периодичность очистки до 1 раз в год.

## ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УЛАВЛИВАНИЯ ЧАСТИЦ ПЫЛИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ СОЛНЕЧНОГО МОДУЛЯ

### 2.1 Основные свойства и характеристики частиц пыли

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. По источнику получения пыль бывает естественного происхождения и промышленная. В зависимости от материала, из которого пыль образована: органическая и неорганическая. Пыль промышленных районов обладает электрическими свойствами (заряженностью, проводимостью, диэлектрической проницаемостью и др.).

Энергетические характеристики солнечных модулей зависят от множества различных факторов (солнечная инсоляция, географическое положение, материал фотоэлементов и др.) В условиях эксплуатации основными факторами окружающей среды, влияющим на работу СМ являются такие, как скорость ветра, температура окружающей среды, влажность, осадки, интенсивность и спектр падающего солнечного излучения, осаждение пыли, загрязнение и затенение.

Проблема загрязнения модулей существует в различных регионах мира, но особенно она ощутима для стран, расположенных в песках или рядом с пустынями (Индия, Саудовская Аравия, Китай и др.) или в промышленных районах с развитой сетью ТЭЦ, заводов и других производств, связанных с большими выбросами в атмосферу загрязняющих веществ [57].

Как видно из рисунка 2.1, самыми пыльными странами являются страны Ближнего Востока и Северной Африки, а чем севернее, тем источников загрязнения становится меньше.

Территория Челябинской области, как и вся Россия, находится в зоне 2 с концентрацией (плотностью частиц пыли в объеме воздуха) 12-19 мг/м<sup>3</sup>. По сравнению с названными странами с высокой запыленностью это не очень большая плотность, однако, надо иметь в виду, что промышленные пыли могут иметь более серьезное воздействие на работу солнечных модулей, когда они накапливаются на их поверхности и проникают в его структуру, усложняя процесс очистки.

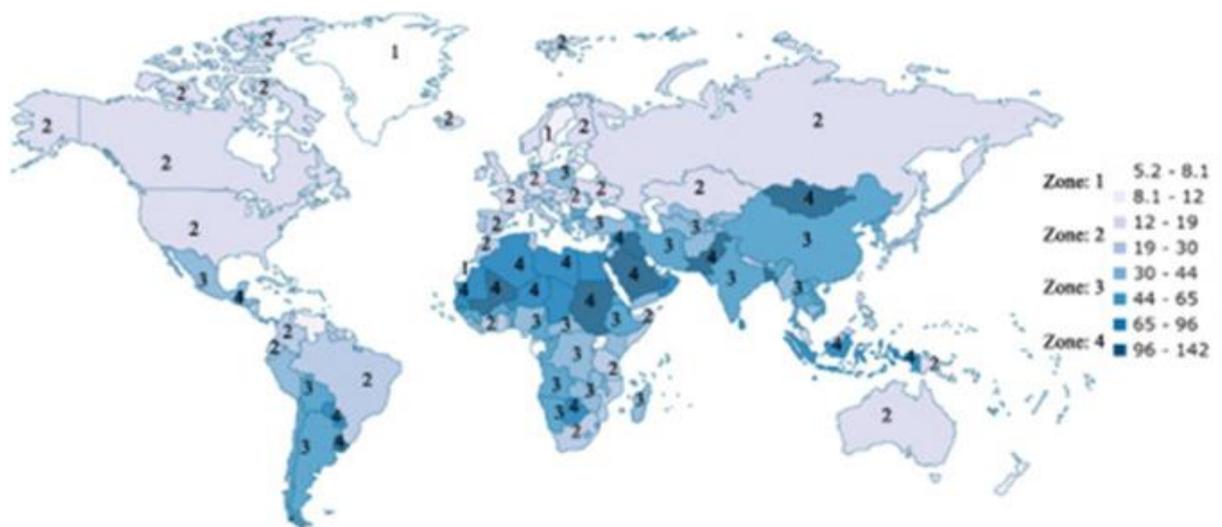


Рисунок 2.1 – Интенсивность распределения пыли в мире

Авторы [58] установили, что частицы пыли размером менее 5 мкм переносятся ветром на более далекие расстояния и могут долго находиться во взвешенном состоянии, частицы размером более 20 мкм, как правило, появляются из близких, местных источников. При этом установлено, что более мелкие частицы вызывают значительное ухудшение работы модуля, чем более крупные, при той же массе. В зависимости от степени загрязнения производительность солнечных модулей может снижаться от 17 до 25% при условии их ежемесячной очистки, и до 35% при более длительных перерывах между очистками [59].

Несмотря на то, что для повышения производительности модулей применяются различные технологии и устройства (системы трекинга, устройства для отслеживания точки максимальной мощности и др.), получить КПД выше,

чем стандартное значение преобразования солнечных лучей в фотоячейках (15 - 20%), не удастся [60]. Поэтому такое значительное снижение выработки электроэнергии при загрязнении наносит значительный ущерб генерирующим компаниям на базе солнечных электростанций (СЭС) и ставит серьезные вопросы перед учеными, разработчиками и эксплуатирующими организациями по обеспечению защиты модулей от загрязнения. Чтобы решить эти вопросы, необходимо изучить источники загрязнения, их состав, свойства и характеристики.

Для территории промышленного Челябинска загрязнителями могут быть такие вещества и взвеси, как асбестоцементная пыль, угольная пыль, пыль цементная, апатитная, фосфоритная, которые возникают при сжигания ископаемого топлива, работе транспортных средств, строительных и промышленных работах. Кроме того, в воздушной среде постоянно присутствуют взвешенные частицы от дорожных трасс, выбросов сельскохозяйственных, перерабатывающих производств, жилищно-коммунального комплекса и др.

### **2.1.1 Электрические характеристики частиц пыли**

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.

Соотношение числа нейтральных и положительно или отрицательно заряженных частиц в одном и том же объеме воздуха не постоянно. Отрицательными зарядами отличаются металлическая пыль, кальций, кварцевый песок, мука, оксид железа, оксид цинка, цинк и основные окислы  $\text{CaCO}_3$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $\text{MgCO}_3$ , положительными зарядами — неметаллическая пыль апатит, крахмал, мрамор, песок, уголь, сера и кислотные окислы и соли  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$  [58].

Разноименный заряд пылевых частиц способствует быстрой конгломерации и оседанию их из воздуха. Наличие разноименно заряженных частиц пыли приводит к укрупнению и выпадению частиц пыли из воздуха.

Электроразряженность пылевых частиц влияет на устойчивость аэрозоля и его биологическую активность. Величина заряда в значительной мере зависит от химической природы вещества и определяется размерами частиц, чем более крупные частицы, тем больший заряд они несут. Часть пыли заряжается за счет адсорбции ионов из воздуха или в результате трения частиц в пылевом потоке.

Простейшим устройством, работающим по принципу улавливания заряженных частиц в воздухе, можно считать электрофильтр очистки воздуха.

Электрофильтры – распространенный тип аппаратов, предназначенных для очистки промышленных газов от твердых и жидких загрязняющих веществ, выделяющихся при различных технологических процессах. Электрофильтры широко применяются почти во всех отраслях народного хозяйства: теплоэнергетике, черной и цветной металлургии, химии и нефтехимии, в строительной индустрии, при производстве удобрений и утилизации бытовых отходов, в атомной промышленности и др. Область применения электрофильтров непрерывно расширяется. Очистка воздуха является важным условием создания требуемого баланса воздушной среды в рабочих и жилых помещениях. Инновационные технологии дают возможность производить качественную очистку воздуха от различных загрязнений, не допускать размножение вредоносных бактерий, которые могут нанести большой вред здоровью человека.

Индустриализация и развитие промышленности в мире приводит не только к благотворным воздействиям. Кроме всего прочего, увеличивается количество вредных выбросов в атмосферу. Продукты сгорания топлива в котлах тепловых электростанций, выбросы химических предприятий и пыль от цементных заводов накрывают наши города. Увеличению загазованности и запыленности среды обитания способствует и увеличение количества транспортных средств на улицах городов. Воздух в помещениях может быстро загрязняться различными примесями. Этому способствует плохое качество облицовочных и строительных

компонентов, значительное количество электронной офисной техники, а также некачественная уборка помещений. Высокая влажность в помещении создает опасность возникновения количества вредных бактерий и плесени, что приводит к астме и аллергии. Загрязненный воздух понижает работоспособность человека, провоцирует появление у него усталости, вялости. Фильтры для очистки воздуха способны значительно снизить влияние негативных факторов, которые отрицательно влияют на самочувствие человека.

Для нормирования количества пыли или вредных веществ в атмосфере существует понятие предельно допустимой концентрации (ПДК). Для каждого химического элемента (ртуть, хлор) или соединения (аммиак, угарный газ) предписан свой ПДК в зависимости от степени вредного воздействия на организм человека и природу [61]. Предприятия, превышающие эти допустимые нормативы, штрафуют. Но обеспечить постоянный контроль наличия в воздухе всех веществ, вредных для человека, невозможно. А некоторые из них не могут быть обнаружены по запаху или цвету. Пыль тоже относится к вредным факторам, и для нее тоже существует норма ПДК.

В основу работы электростатического фильтра положена способность мелких частиц при попадании в электрическое поле ионизироваться – приобретать положительный или отрицательный заряд. Напряженность поля должна быть достаточно большой, в промышленных установках для этой цели применяют специальные преобразователи, формирующие для работы фильтра напряжение в десятки киловольт [62]. Чтобы обеспечить неизменное движение частиц в одну сторону напряжение выпрямляется.

Воздух прокачивается через фильтр при помощи вентилятора. Он забирает загрязненный воздух в месте, где его необходимо очищать. После прохода через фильтр он попадает в чистую зону. На пути его следования расположены осадительные пластины, собранные в секции. Между ними проходят нити металлической сетки. Между пластинами и сеткой прикладывается разность потенциалов, создающая электростатическое поле в ограниченном пространстве. Частицы пыли, проходя через поле, ионизируются (рисунок 2.2).

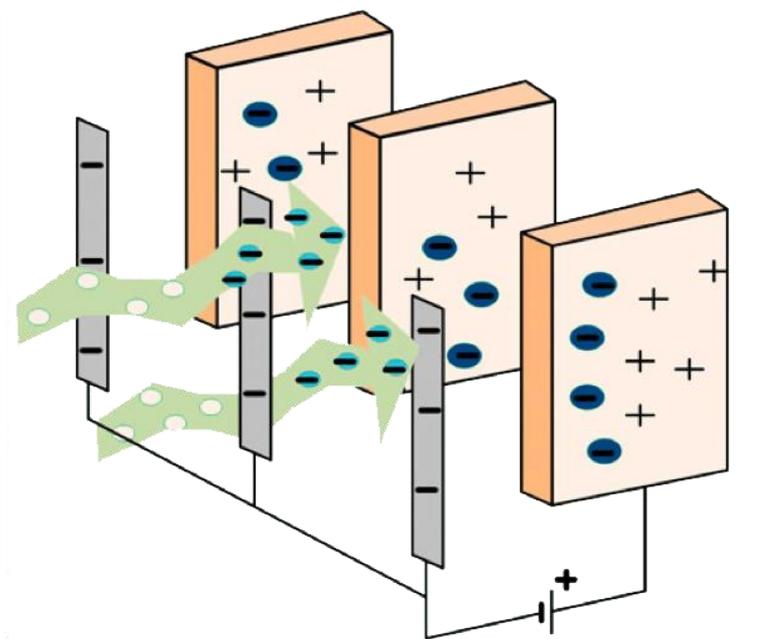


Рисунок 2.2 – Принцип очистки воздуха в электростатическом фильтре

Полярность подключения напряжения выбирается так, чтобы ионизированные частицы пыли притягивались к пластинам. В итоге пыль оседает на них и удерживается полем. Периодически пыль необходимо стряхивать с пластин, иначе зазор между ними перекроется, и фильтр перестанет пропускать воздух. Для этого используется специальный механизм, встряхивающий секции пластин по очереди, нанося по ним удары. Механизм встряхивания приводится в движение электродвигателем.

Попавшая в нижнюю часть фильтра пыль удаляется шнеком с электроприводом либо очистка фильтров осуществляется вручную. Далее пыль либо утилизируется, либо поступает на дальнейший цикл переработки. В общем случае, при внесении незаряженного диэлектрического тела в электростатическое поле в нем происходит перераспределение свободных и связанных электрических зарядов, что приводит к возникновению электрического вращающего момента, стремящегося сориентировать это тело длинной осью вдоль силовых линий поля, то есть перпендикулярно электродам. При повышении напряженности электрического поля между электродами до значения, при котором начинается интенсивная ионизация воздуха, возникает коронный (тлеющий) разряд у

поверхности электрода с меньшим радиусом кривизны. Этот разряд способен сообщать дополнительный электрический заряд частицам, находящимся на некотором расстоянии от коронирующего электрода.

Чтобы правильно спроектировать устройство для осаждения пылевых частиц, необходимо знать характеристику пылей местности (размеры, диэлектрическую проницаемость, шероховатость, дисперсность, плотность, смачиваемость, адгезионные свойства и др.), а также источник происхождения пыли. Взвешенные в воздухе частицы пыли, как правило, имеют либо положительный, либо отрицательный электрический заряд, а могут быть и нейтральными. Соотношение числа нейтральных и положительно или отрицательно заряженных частиц в одном и том же объеме воздуха не постоянно. Знаки заряда и их величина определяются свойствами исходного материала и временем витания их в воздухе (рисунок 2.3) [63].

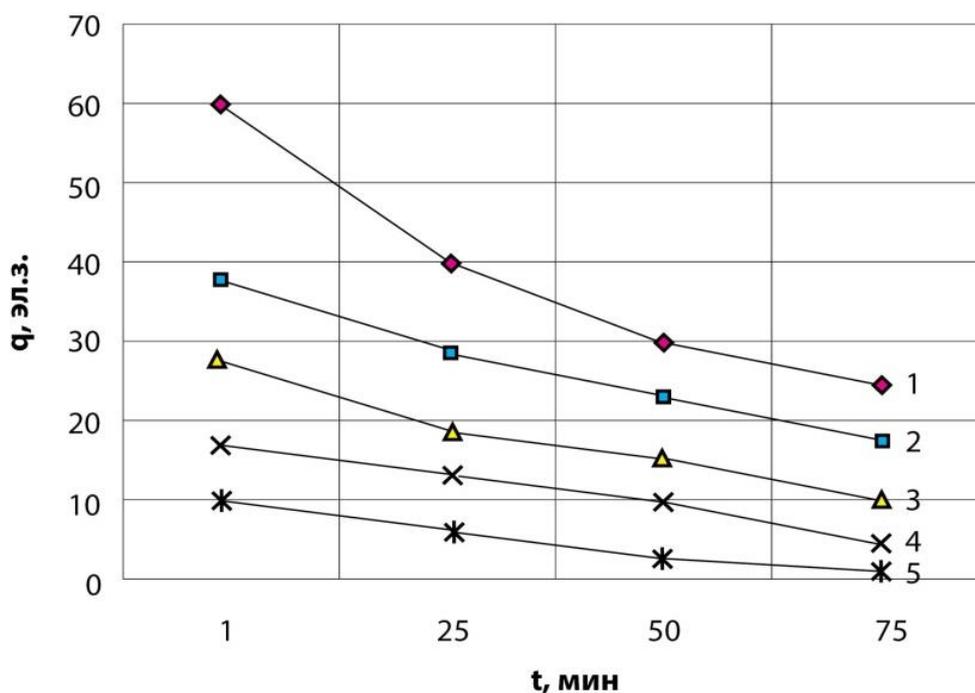


Рисунок 2.3 – Зависимость среднего естественного заряда частиц от времени витания в воздухе для разных размеров:

1-r = 5,6...11,2 мкм; 2-r = 2,8...5,8 мкм; 3-r = 1,4...2,8 мкм;

4-r = 0,7...1,4 мкм; 5-r = 0,45...0,7 мкм.

Как видно из зависимости, распределение зарядов на частицах указанных размеров в спокойном воздухе наступает соответственно через 10, 15, 20, 35 и 65 минут. У большинства частиц сохранение заряда наблюдается в течение нескольких часов. Таким образом, естественный электрический заряд частиц и их полярность являются одним из основных факторов, который нужно учитывать при разработке устройств защиты поверхности солнечных модулей. Принцип работы таких устройств должен быть основан на использовании электрических свойств аэрозолей для определения методов и параметров воздействия на них электрического поля устройства.

Частицы пыли относятся к аэрозольным частицам и, в зависимости от источника происхождения, могут иметь положительный или отрицательный электрический заряд или быть нейтральными. Источником заряда частиц могут быть процессы трения, диспергирования, адсорбции, взрыва или ионизации среды. Частицы получают заряд как в процессе этих явлений, так и после него, находясь во взвешенном состоянии.

Металлические частицы обычно заряжаются отрицательно, а неметаллические (диэлектрические) – положительно. Остальные могут иметь любой заряд того или иного знака, или нулевой (нейтральный). При этом, количество положительных и отрицательных частиц в определенном объеме воздуха примерно равно. Кроме того, некоторые пылевые частицы могут быть биполярными [64].

Другой важной характеристикой пыли является ее удельное электрическое сопротивление (УЭС), которое определяет электрическую проводимость слоя пыли. По этому параметру пыли можно разделить на три группы:

- а) хорошо проводящая пыль, с проводимостью менее  $10^2$  Ом·м;
- б) пыль средней проводимости  $10^2 - 10^9$  Ом·м;
- в) высокоомная пыль с проводимостью больше, чем  $10^9$  Ом·м.

Эти электрические параметры пылей очень важны при определении сил адгезии частиц к поверхности солнечного модуля и разработке эффективных устройств защиты от запыления или очистки уже осевшей пыли.

Электрическое сопротивление пыли зависит от температуры окружающей среды (рисунок 2.4), и это также необходимо учитывать при эксплуатации солнечных модулей в различных климатических условиях. 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 [65].

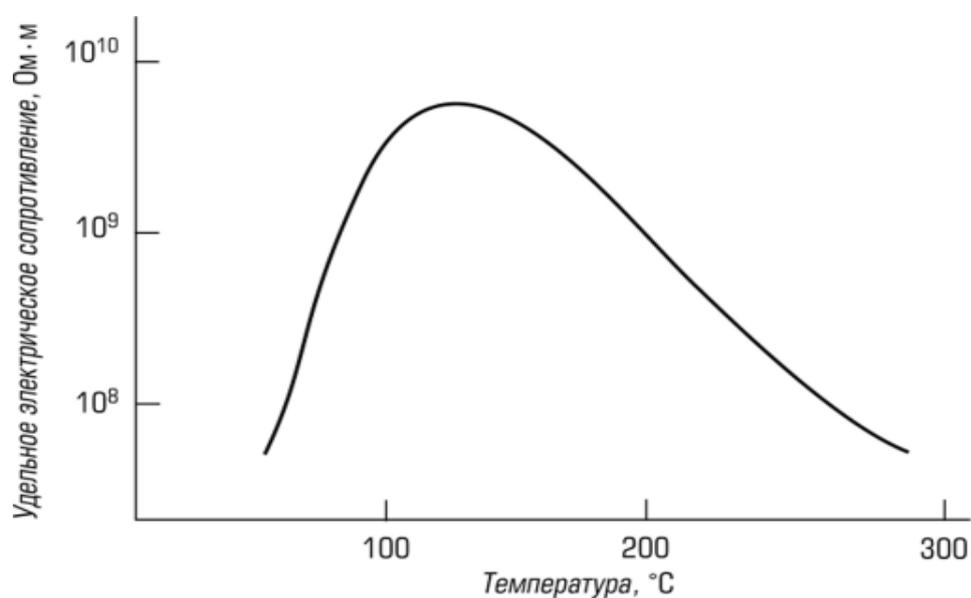


Рисунок 2.4 – Зависимость удельного электрического сопротивления слоя пыли от температуры

Используя зависимость, можно в определенных пределах влиять на проводимость пыли. Для регионов с повышенной температурой воздуха этот вопрос является достаточно актуальным.

Электрическая заряженность пылей определяет ее адгезию, или взаимодействию пылевых частиц с поверхностью модуля. Если заряженные частицы взаимодействуют между собой (аутогезия), то при слипании они могут образовывать конгломераты пыли, которые под действием силы тяжести и ветрового потока будут осыпаться с поверхности модуля.

Адгезия мелкодисперсной пыли к поверхности модуля – основная проблема при эксплуатации СЭС. Чем меньше размер имеют пылевые частицы, тем больше они проникают в места соединений, креплений и неровностей поверхности модуля, оставаясь там длительное время, и собирая на себя дополнительные загрязнения. В местах скопления пыли появляются неработающие участки солнечных элементов, которые через какое-то время деградируют. Если своевременно не очищать поверхность от подобных пылевых накоплений, проблема будет только усугубляться.

Основным показателем работы солнечных модулей является его вольт-амперная характеристика (рисунок 2.5). Даже небольшое запыление ячеек модуля приводит к снижению генерации из-за меньшего количества фотонов, проникающих в полупроводниковый слой. Как видно из рис. 4, чем больше загрязнена поверхность, тем больше снижение напряжения и, следовательно, меньше выходная мощность [66].

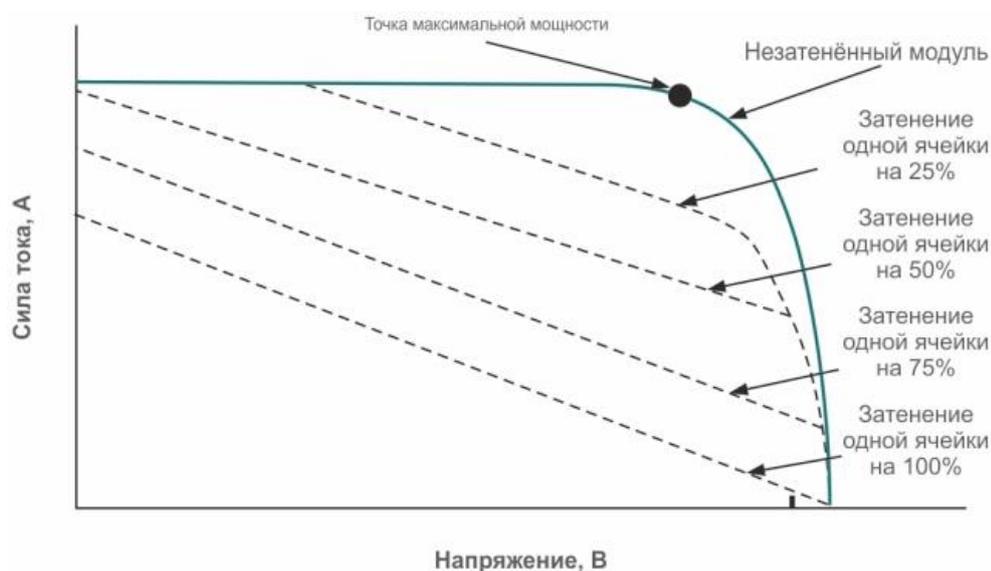


Рисунок 2.5 – Влияние запыления поверхности модуля на вольт-амперную характеристику

Поэтому своевременная очистка модулей от запыления является важным этапом при их эксплуатации. При индивидуальном использовании очищать загрязненные модули можно традиционным способом, как мытье окон в доме.

Исполнение этих рекомендаций сопряжены с использованием большого количества инструментов и средств очистки (губки, скребки, щетки с нежестким ворсом, моющие средства для очистки стекла — спирт / этанол / метанол). При этом обязательным является применение очищенной (неминерализованной) воды с созданием струи высокого напора для смыва загрязнения с поверхности модуля. Очистку необходимо проводить при строгом соблюдении правил электробезопасности и техники безопасности при проведении высотных работ с использованием страховки.

Поведение витающей в воздухе частицы пыли, имеющей естественный электрический заряд, зависит от многих факторов: размера частицы, электрических или магнитных свойств, величины заряда, условий окружающей среды (скорость ветра, влажность воздуха, место установки) и параметров самого солнечного модуля, к которым относятся: габариты модуля, ориентация, угол наклона модуля к горизонту, материал поверхности модуля. Эти параметры определяются с помощью известных приборов и не вызывают затруднений.

Зарядка частиц путем осаждения ионов на их поверхность наиболее часто используется в аппаратах электронно-ионной технологии. Это объясняется относительной простотой осуществления этого метода и большим зарядом, приобретаемым частицами. Препятствует движению частиц к поверхности сила отталкивания между ионами, находящимися на частице, и ионами, приближающимися к ее поверхности. Очевидно, зарядка частицы прекращается в тот момент, когда отталкивающая сила становится равной сумме всех притягивающих. При этом достигается максимальный, или, как его называют, предельный заряд.

Воздействие сил электрического поля осуществляется на отдельные частицы материала сколь угодно малых размеров. Отсюда следует необходимость и обусловленность непрерывности и поточности процессов электронно-ионной технологии, принципиальная возможность самого тонкого управления и регулирования потоками заряженных частиц материала подобно тому, как это происходит в электронных и ионных приборах с потоками электронов и ионов.

## 2.2 Анализ сил, действующих на частицы пыли в электрическом поле солнечного модуля

Чтобы определить схему устройства улавливания, необходимо разобраться в силах, которые могут действовать на частицу с учетом ее электрических свойств в поле солнечного модуля.

Движение заряженных частиц и осаждение их на конструкции устройства защиты происходит под действием нескольких сил.

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  $F_T$ :

$$F_T = m \cdot g, \quad (2.1)$$

где  $m$  - масса частицы;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

Очевидно, что чем больше размер частицы и ее масса, тем быстрее она будет оседать на поверхности модуля.

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

Наличие ветра и его скорости в месте расположения солнечных модулей также влияет на процесс осаждения пыли. Установившаяся скорость пылевых частиц, находящихся в потоке воздуха, определяется силой сопротивления среды и подчиняется закону Стокса. Для мелкодисперсной пыли с размерами частиц не более 1 мкм, в практических расчетах этой силы необходимо учитывать поправку Кенингема [67]:

$$F_C = \frac{-6\pi\mu a V_C}{1 + \frac{A l_m}{a}}, \quad (2.2)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости воздушной среды,  $\text{Н}\cdot\text{с/м}^2$ ;  $a$  – размер частицы, м;  $V_C$  - скорость дрейфа частиц, м/с;  $A$  – постоянная, зависящая от свойств поверхности (для жидких и гладких твердых сфер  $A=0,7$ );  $l_m$  – эквивалентная длина свободного пробега молекул, вычисленная по вязкости газа (для воздуха при  $t=23^\circ\text{C}$  и давлении  $p=101,3 \text{ кПа}$ ,  $l_m = 0,942 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ ), м.

В таблице 2.1 приведены значения поправки Кенингема для разных размеров частиц пыли.

Таблица 2.1

Поправки Кенингема

a	0,003	0,01	0,03	0,10	0,30	1,00	3,00	10,00
C <sub>к</sub>	90,00	24,30	7,90	2,90	1,57	1,16	1,03	1,00

Для повышения эффективности предотвращения запыления модулей целесообразно рассмотреть силу, обусловленную электрическим зарядом частиц (кулоновскую силу  $F_k$ ) и силу, обусловленную неравномерностью распределения напряженности электрического поля (пондеромоторную силу  $F_E$ ).

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  $q$ :

$$F_k = q \cdot E \quad (2.3)$$

Очевидно, чем больше величина заряда, тем больше воздействие этой силы. С этой целью в системах очистки обычно используется искусственная зарядка частиц. В нашем случае такая зарядка отсутствует, и значение  $F_k$  будет определяться величиной естественного заряда частиц  $q_{\text{ест}}$ :

$$F_k = q_{\text{ест}} \cdot E, \quad (2.4)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля в установке, В/м;  $q_{\text{ест}}$  – естественный заряд частицы, Кл.

Появление естественного заряда может быть вызвано диспергированием (разрушением исходного материала), когда у образующихся частиц возникает избыток или недостаток ионов того или иного знака, трением исходных материалов и частиц, столкновением или контактом разнородных тел (контакт электризацией, распылением порошкообразных материалов и т.д.). Одним из основных процессов, при котором частицы аэрозоля во взвешенном состоянии могут приобрести заряд, является захват газовых ионов.

Газовые ионы имеют один элементарный заряд. При приближении иона к частице на расстояние, соизмеримое с ее размерами, на него действует кулоновская сила зеркального отображения. В результате этого взаимодействия частицы приобретают заряд тех ионов, которые с ним соприкасаются.

Зарядка частиц в ряде непрерывно образующихся ионов обеих знаков происходит примерно в равных количествах и стремится к определенному установившемуся значению.

Явление электризации наблюдается при трении частиц о твердое тело (трибоэлектризация). Количество электричества, образующееся при этом, прямо пропорционально разности диэлектрических проницаемостей этих тел. В табл.2.2 приведены данные об электрозаряженности пылей различного вещественного состава [68].

Таблица 2.2

Электрозаряженность пылей различного вещественного состава

Исходный материал	Содержание частиц, %				
	Диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$	Всего заряженных	нейтральных	(+) заряженных	(-) заряженных
Уголь	4,5	88	12	46	42
Цемент	2,7	86	14	46	40
Глина	4,7	88	12	58	30
Кварц	2,0	89	11	40	49
Зола	4,0	89	11	43	46
Бронзовый порошок	-	85	15	59	23
Сажа	-	80	20	35	45

Зависимость величины заряда от размеров частиц проявляется незначительно, однако для одних и тех же размеров имеет значение характер вещества. Так, для частиц мела, сажи, дерева и зерна диаметром 10 мкм заряд может составлять от 600 до 1100 элементарных зарядов (ЭЗ) или  $9,6 \cdot 10^{-17} - 1,8 \cdot 10^{-16}$  Кл; частицы пыли кварца в диапазоне от 0,5 до 22 мкм имеют от 4 до 100 ЭЗ ( $6,4 - 160 \cdot 10^{-19}$  Кл). Максимальный заряд полимерных частиц, имеющих размеры от 30 до 80 мкм, составляет  $3 \cdot 10^{-15}$  Кл. Величина естественного заряда частиц размером 0,5-10 мкм составляет от 1 до 650 элементарных зарядов [69].

Величина естественного заряда  $q_{\text{ест}}$  по данным разных источников [64, 68, 70, 71] колеблется от 1 до 10% от величины искусственного  $q_{\text{иск}}$ , который может приобрести частица в поле коронного разряда. Столь малая величина заряда частиц аэрозоля не может существенно повлиять на значение  $F_k$ , однако пренебрегать ею не следует. Так естественный заряд частиц биполярен, т.е., может иметь как положительное, так и отрицательное значение, то частица, попадая в межэлектродный промежуток (между положительно и отрицательно заряженными проволочными электродами) ведет себя в соответствии с законами физики. То есть, положительно заряженная частица, отталкиваясь от одноименно заряженного провода, оседает на отрицательном; аналогично происходит и с отрицательно заряженными частицами.

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 [67]. Эту силу еще называют пондеромоторной, она определяется:

$$F_E = 2\pi\epsilon_0 a^3 \frac{\epsilon-1}{\epsilon+2} \text{grad}E^2, \quad (2.5)$$

где  $\epsilon_0$  - электрическая постоянная, Ф/м;  $a$  - размер частицы, м;  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость частицы;  $\text{grad}E$  - градиент напряженности электрического поля, В/м<sup>2</sup>.

Значительная неравномерность электрического поля наблюдается вблизи осадительных проволочных электродов и особенно в местах их крепления из-за наличия на их поверхности микровпадин и выступов.

Составляющая  $2\pi\epsilon_0 a^3 \frac{\epsilon-1}{\epsilon+2}$  представляет собой заряд поляризации, который появляется на частице при нахождении ее в электрическом поле. Диэлектрическая частица размером  $a$  в этом случае рассматривается как диполь.

Однако, чаще всего частицы имеют форму, отличающуюся от сферической. На рисунке 2.6 показаны микрофотографии частиц аэрозолей размерами до 10 мкм. Как видно из снимков, большинство частиц имеет неправильную форму.

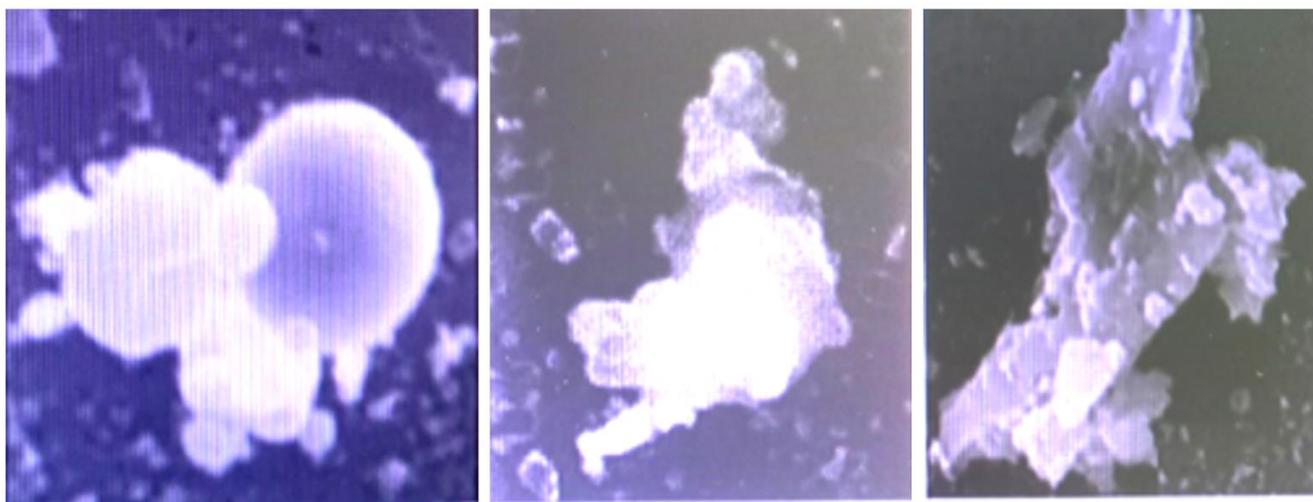


Рисунок 2.6 – Микрофотографии частиц аэрозолей

В этом случае не сферичная (например, эллипсоидальная) частица, попадая в электрическое поле, также поляризуется (рисунок 2.7). Однако в отличие от сферической частицы, она ориентируется вдоль силовых линий поля по своей длинной оси. При этом поляризация зарядов происходит неравномерно по окружности, как у шара, а концентрировано по концам эллипсоида. Вокруг этих зарядов появляется свое поле, искажающее основное поле межэлектродного промежутка. Основное поле, стремясь вернуть свое первоначальное положение, действует на частицу, выталкивая ее в сторону с большей напряженностью. Сила, с которой поле действует по отношению к этой частице – это сила, обусловленная неравномерностью поля.

Поэтому, чем больше частиц не сферической формы попадает в зону действия основного поля, тем больше его неравномерность и, соответственно, больше сила  $F_E$ , действующая на эти частицы.

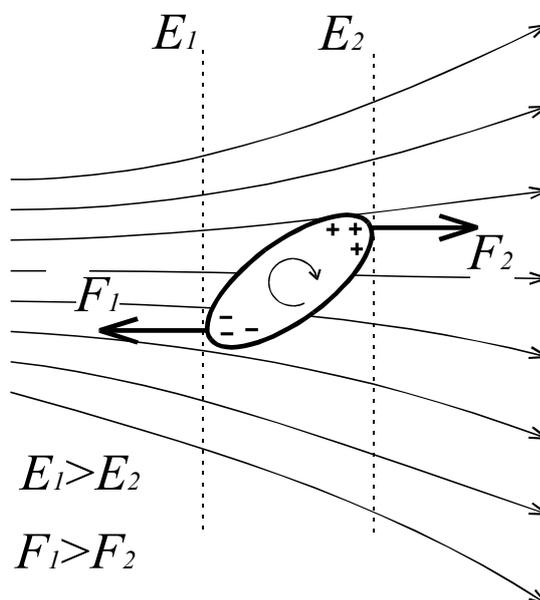


Рисунок 2.7 – Поляризация частицы в электрическом поле

Чем выше диэлектрическая проницаемость частицы, тем выше величина ее заряда. Кроме этого установлено, что заряд не сферичных частиц в 1,4 - 1,8 раз больше заряда шарообразных частиц [67].

На величину силы  $F_E$  влияет и шероховатость поверхности осадительных электродов. В местах впадин и выступов значение  $\text{grad}$  наибольшее.

Суммарное значение сил тяжести, кулоновской и пондеромоторной уравновешивается силой сопротивления среды:

$$F_T + F_k + F_E = F_C \quad (2.6)$$

Обычно для пылевых частиц размером до 1 мкм при скорости воздушного потока в замкнутом пространстве от 0,1 до 1,0 м/с, время их осаждения на поверхность солнечного модуля не превышает 0,05 с.

В реальных условиях эксплуатации скорость ветра обычно превышает указанное значение, тогда пылевые частицы малых размеров будут уноситься ветром и тогда силой тяжести в уравнении (2.6) можно пренебречь.

### 2.3 Определение степени улавливания пылевых частиц в электрическом поле солнечного модуля

Для подбора необходимого пылезащитного оборудования необходимо знать дисперсный состав пыли. Этот состав определяется размерами и скоростью оседания частиц и показывает долю по объему, массе и количеству частиц в любом диапазоне их размеров и скоростей оседания. В зависимости от размера мелкие частицы можно условно разделить на частицы менее 10 мкм и частицы с размером менее 2,5 мкм. Мельчайшие частицы (наночастицы) имеют размер менее 0,1 мкм [72].

Кроме физических и химических свойств, дисперсный состав определяет характер и условия распространения пыли в воздушной среде. Крупнодисперсная пыль оседает на небольших расстояниях от источников загрязнения, мелкодисперсная может переноситься потоками воздуха на значительные расстояния, распространяясь далеко от источников выброса, и оседает значительно медленнее, а особо мелкодисперсная практически вовсе не осаждается. Таким образом, рассеивание пылевых частиц в воздухе в значительной мере определяется дисперсным составом пыли.

Характер движения и осаждения аэрозоля можно разделить на три вида:

а) частицы с размером менее 1 мкм (ультратонкая пыль), имеют броуновское движение, которое преобладает над гравитационным осаждением;

б) частицы с размером от 0,1 до 10 мкм (пыль средней дисперсности), оседают в неподвижном воздухе с постоянной скоростью, зависящей от их размера и плотности согласно закону Стокса;

в) грубодисперсные частицы размером более 10 мкм, в них гравитационное осаждение преобладает над броуновским, частицы оседают в неподвижном воздухе с возрастающей скоростью [73].

Численные значения и скорости осаждения частиц в зависимости от дисперсного состава и источника генерации пыли имеет следующие значения (таблица 2.3) [74].

Скорость осаждения частиц пыли на поверхности

Группа пыли	Скорость осаждения (м/с)	
	Частицы 2,5 мкм	Частицы 10 мкм
Пыль органических материалов	0,00025-0,0005	0,0039 – 0,005
Зола от сжигания угля	0,0003 – 0,0005	0,007 – 0,009
Пыль, содержащая окислы железа	0,0006 – 0,0007	0,009 – 0,0117

По данным таблицы видно, что частицы размером 2,5 мкм под действием своего естественного веса оседают примерно на 0,9 - 2,5 метра в час. Для частиц размером 10 мкм осаждение происходит быстрее примерно в 10 раз.

Сила тяжести (гравитационная сила) и сила сопротивления среды участвуют в процессе осаждения пыли независимо от наличия устройства защиты и напряжения на электродах, и определяются химическими и электрофизическими свойствами пылевых частиц. Осаждение частиц пыли на электродах устройства под действием этих сил определяется площадью их поверхности, которая составляет не более 6-8% от общей площади поверхности модуля с учетом условия допустимого затенения модуля более для сохранения эффективной работы.

Зависимость скорости осаждения частиц к электродам определяется их заряденностью и напряженностью электрического поля. В таблице 2.4 показаны значения скорости дрейфа частиц к осадительным электродам устройства пылезащиты при различных напряженностях электрического поля [75].

Таким образом, скорость дрейфа при различной напряженности электрического поля в зависимости от размеров частиц пыли составляет от 0,0012 до 0,11 м/с, что в 4 и более раз больше, чем оседание частиц под действием сил тяжести.

Скорость движения заряженных частиц в электрическом поле  
при различной напряженности

Радиус частицы, мкм	Скорость движения частиц под действием кулоновской силы, м/с при		
	$E=1,5 \cdot 10^5$ В/м	$E=3 \cdot 10^5$ В/м	$E=3,3 \cdot 10^5$ В/м
0,2	0,0012	0,0025	0,0032
0,5	0,0013	0,0030	0,0055
1,0	0,0015	0,0060	0,011
5,0	0,00715	0,030	0,055
10,0	0,015	0,06	0,11

На скорость дрейфа частиц влияют и такие факторы, как гидравлические силы и осаждение частиц на электроды под действием турбулентных пульсаций воздушного потока, обусловленных большим градиентом его скорости вблизи осадительных проводов. Можно предположить, что в результате турбулентности увеличивается вероятность попадания большого количества частиц в зону непосредственной близости к осадительным электродам.

## Выводы по главе 2

Осаждение мелкодисперсной пыли на поверхности солнечного модуля – одна из основных причин снижения эффективности работы солнечных модулей. Пыль представляет собой взвешенные мелкодисперсные аэрозоли и обладает определенными физико-химическими и морфологическими свойствами, которые используются в технике пылеулавливания.

Частицы пыли, в зависимости от источника их происхождения, могут иметь положительный или отрицательный электрический заряд, а также могут быть нейтральными. Источником заряда частиц могут быть процессы трения,

диспергирования, адсорбции, взрыва или ионизации среды. Частицы получают заряд как в процессе этих явлений, так и после него, находясь во взвешенном состоянии.

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 пылей определяет ее адгезию, или взаимодействие пылевых частиц с поверхностью солнечного модуля. При слипании они могут образовывать конгломераты пыли, которые могут как осыпаться с поверхности модуля, так и могут задерживаться и надежно застревать в конструктиве модуля, вызывая его деградацию.

Даже небольшое запыление ячеек модуля приводит к снижению генерации из-за меньшего количества фотонов, проникающих в полупроводниковый слой. 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 (которой можно пренебречь), сила сопротивления среды, кулоновская сила, пондеромоторная сила. Каждая из этих сил учитывается при разработке устройства защиты солнечных модулей от пылевых загрязнений.

## ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ ОТ ПЫЛЕВЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

### 3.1 Морфологический анализ технического решения

Частицы пыли, находящиеся в воздухе, имеют естественный электрический заряд. Воздух в окружающем пространстве никогда не находится в покое, в нем существуют невидимые глазу течения, порожденные его нагреванием, охлаждением, влажностью и т.д. От нагревания (летом) воздух разрежается и, следовательно, становится легче; от охлаждения (зимой) уплотняется, становясь тяжелее. Таким образом, поведение и свойства частиц зависят от времени года, суток, географического расположения и других климатических условий [76]. Рассмотрев вопрос о воздушных потоках и естественных зарядах частиц [77], было решено разработать такое устройство предотвращения загрязнений (УПЗ), принцип действия которого было бы основано на использовании данных свойств.

Для выбора возможных технических решений конструкций такого устройства был проведен морфологический анализ.

В качестве функций проводимого анализа были выбраны следующие:

- а) осадительные электроды (ОЭ) (материал, конструкция, компоновка);
- б) источник питания (напряжение постоянное, переменное, высоковольтное, низковольтное, импульсное).

За критерий качества была принята эффективность улавливания пылевых частиц устройством. Учитывая, что частицы пыли имеют только естественный электрический заряд, повысить напряженность поля устройства улавливания можно за счет конструктивных и режимных параметров.

Тремя основными факторами, необходимыми для проведения морфологического анализа вариантов конструкции устройства являются:

- а) материал осадительных электродов;
- б) компоновка электродов;
- в) питающее напряжение.

### 3.1.1 Материал осадительных электродов

В качестве материала для ОЭ обычно используются металлические проводники, по форме в виде прямой или зигзаго- и волнообразные. В целях упрощения конструкции УЗ и снижения до минимума его аэродинамического сопротивления были выбраны металлические проволочные электроды. Проволочные металлические электроды должны отвечать следующим требованиям:

- а) иметь достаточную механическую жесткость и прочность;
- б) иметь гладкую поверхность без трещин, сколов и острых кромок;
- в) быть прямыми и ровными по всей длине электрода;
- г) иметь хорошие аэродинамические характеристики;
- д) иметь хорошие адгезионные свойства.

Таким характеристикам соответствуют железные проводники, которые и были приняты для изготовления устройства.

Железо, как проводник и диамагнетик, имеет следующие характеристики:

- а) удельное электрическое сопротивление  $\rho = 0,013$  мкОм·м;
- б) магнитная проницаемость  $\mu = 0,999990$ ;
- в) диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = \infty$ .

### 3.1.2 Компоновка проволочных электродов

Компоновка проволочных электродов для осаждения на них пыли может быть следующей:

- а) параллельное расположение с постоянным межэлектродным расстоянием;
- б) параллельное расположение с переменным межэлектродным расстоянием;
- в) непараллельное расположение с переменным межэлектродным расстоянием.

Последний вариант компоновки требует отдельного изучения, т.к., связан с изменением конструкции самих электродов. Переменное межэлектродное расстояние также нецелесообразно использовать, т.к. это будет значительно влиять на напряженность межэлектродного промежутка и, соответственно, на сам процесс улавливания пылевых частиц. Поэтому нами был выбран первый вариант компоновки, который является более простым и компактным.

### **3.1.3 Напряжение на проволочных осадительных электродах**

Напряжение, подаваемое на электроды, может быть переменным высоковольтным, переменным низковольтным, постоянным высоковольтным, постоянным низковольтным, импульсным и высокочастотным.

Постоянное низковольтное питающее напряжение не дает необходимой напряженности электрического поля, поэтому применение такого типа напряжения нецелесообразно. Импульсное и высокочастотное напряжение требует создание относительно дорогостоящих источников питания, что не соответствует требованиям к устройствам защиты. Для создания высокого напряжения следует рассмотреть высоковольтный источник напряжения с возможностью изменения его значения.

## **3.2 Конструктивные параметры устройства**

При расчете и выборе параметров устройства защиты от запыления поверхности солнечных модулей необходимо предусмотреть соответствие их критерию эффективности.

Критерий эффективности определяется таким соотношением геометрических размеров устройства и скорости воздушного потока и осаждения частиц, при которых бы обеспечивалась наибольшая степень очистки.

Площадь эффективной работы панели  $S_{эф}$  определяется разностью площади ее рабочей поверхности  $S_{р.л.}$  и площади защитного устройства,

представляющей собой суммарную площадь, создаваемую осадительными электродами устройства  $S_{о.э.}$ :

$$S_{эф} = S_{р.п.} - S_{о.э.} \quad (3.1)$$

Площадь рабочей поверхности солнечного модуля (площади, на которой происходит непосредственное преобразование солнечных лучей в электрическую энергию), определяется:

$$S_{р.п.} = F_{с.э.} \cdot n \cdot K_{зап}, \quad (3.2)$$

где  $F_{с.э.}$  – площадь одного солнечного элемента,  $m^2$ ,  $n$  – количество солнечных элементов в модуле;  $K_{зап}$  – коэффициент заполнения солнечными элементами площади солнечного модуля. Для прямоугольных и квадратных солнечных элементов  $K_{зап} = 0,99$ ; для псевдоквадратных  $K_{зап} = 0,95$ ; для круглых элементов  $K_{зап} = 0,85$ .

Суммарная площадь осадительных электродов защитного устройства определяется:

$$S_{о.э.} = a \cdot h \cdot N, \quad (3.3)$$

где  $a$  – активная длина солнечного модуля, м,  $h$  – толщина осадительного электрода;  $N$  – количество осадительных электродов.

Тогда площадь эффективной работы солнечного модуля будет равна:

$$S_{эф} = F_{с.э.} \cdot n \cdot K_{зап} - a \cdot h \cdot N \quad (3.4)$$

Поскольку защитное устройство представляет собой объект, создающий некоторое затенение, важно, чтобы оно не влияло на генерацию электрической энергии солнечными модулями.

По данным исследователей [78] плотность пыли на поверхности фотоэлектрических модулей от 1,0 до 5,0  $г/м^2$  соответствует низкому и умеренному отложению пыли. Более высокая концентрация пыли обычно рассеивается на поверхности фотоэлектрического модуля, и значения, превышающие эти, редко встречаются в реальных случаях. Максимальные потери производительности модулей при плотности осаждения пыли равной 1  $г/м^2$  находится в диапазоне 6–8% [79]. Поэтому для того, чтобы при использовании

защитного устройства не снижалось количество вырабатываемой энергии, необходимо выбрать такое количество электродов и их толщину, чтобы затенение модуля составляло не более 6-8%. Определить эти параметры можно из зависимостей  $S_{эф}=f(h)$  и  $S_{эф}=f(N)$ .

Рассчитаем площадь рабочей поверхности солнечного модуля  $S_{р.п.}$  по формуле (3.2). Примем условия, что размер одной классической ячейки солнечного модуля составляет 0,125 м \* 0,125 м, их количество – 32 шт., форма – псевдоквадрат.

В качестве примера для расчета была взята солнечная панель модели brs 32-100 бренда JINGYANGPV [80] (производство – Китай, количество ячеек: 32, размер: 1050 мм \* 540 мм \* 2,5 мм, материал: монокристаллический силикон, номинальная емкость: 100 Вт, максимальная мощность: 105 Вт). На момент проведения теоретического расчета панели доступны к заказу из Китая, а также они легки в установке и эксплуатации, все комплектующие выполнены из безопасных материалов.

$$S_{р.п.} = F_{с.э.} \cdot n \cdot K_{зап} = 0,125 \cdot 0,125 \cdot 32 \cdot 0,95 = 0,475 \text{ (м}^2\text{)}$$

Для определения суммарной площади осадительных электродов защитного устройства  $S_{о.э.}$  рассмотрим два варианта их ориентации – вертикальное и горизонтальное расположение.

Вид устройства с вертикальной ориентацией осадительных электродов представлен на рисунке 3.2 [81-82]. Далее все расчеты будут проведены для горизонтальной ориентации осадительных электродов.

Для определения суммарной площади осадительных электродов защитного устройства  $S_{о.э.}$  используем формулу (3.3), при условии, что активная длина солнечного модуля  $a = 1$  м.

$$S_{о.э.} = a \cdot h \cdot N = 1 \cdot h \cdot N = h \cdot N \quad (3.5)$$

Для определения параметров  $h$  и  $N$  необходимо построить зависимости  $S_{эф}=f(h)$  и  $S_{эф}=f(N)$  и учесть условие затенение модуля не более 6 - 8% для сохранения эффективной работы.

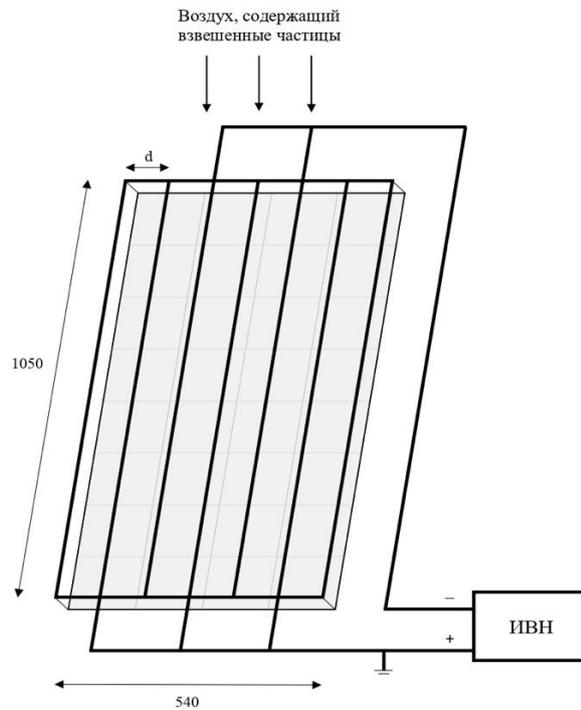


Рисунок 3.2 – Общий вид устройства защиты (вертикальная ориентация)

В формуле  $S_{эф}$  (3.4) присутствуют оба определяемых параметра. Поэтому для построения зависимости  $S_{эф}=f(h)$  примем  $N=20$  (рисунок 3.3).

В качестве материала осадительного электрода применяется тонкая железная проволока диаметром 0,001 м. Поэтому для зависимости  $S_{эф}=f(N)$  примем  $h=0,001$  м (рисунок 3.4).

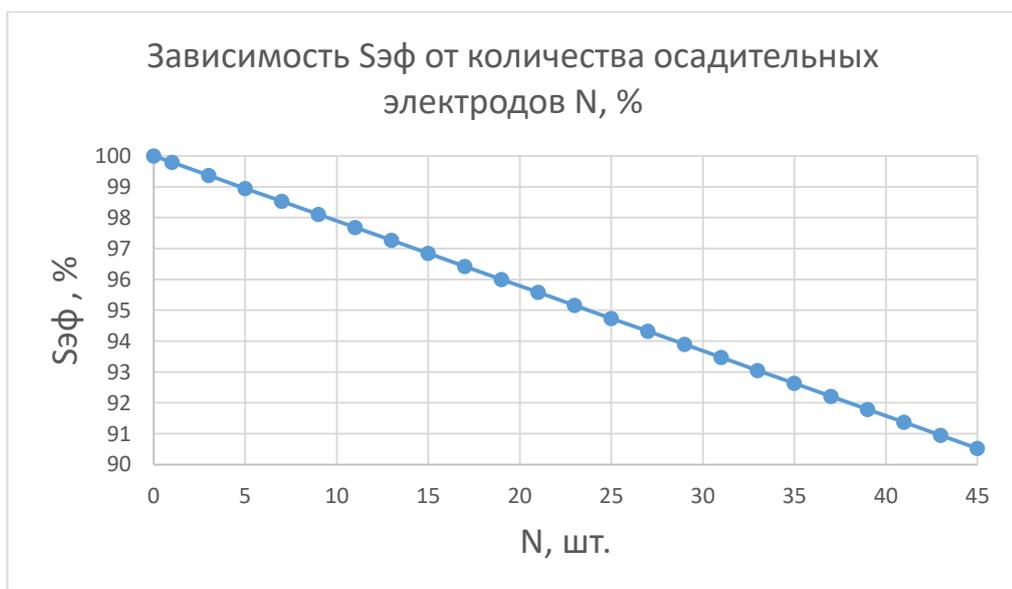


Рисунок 3.3 – Зависимость  $S_{эф}$  от количества осадительных электродов N, %

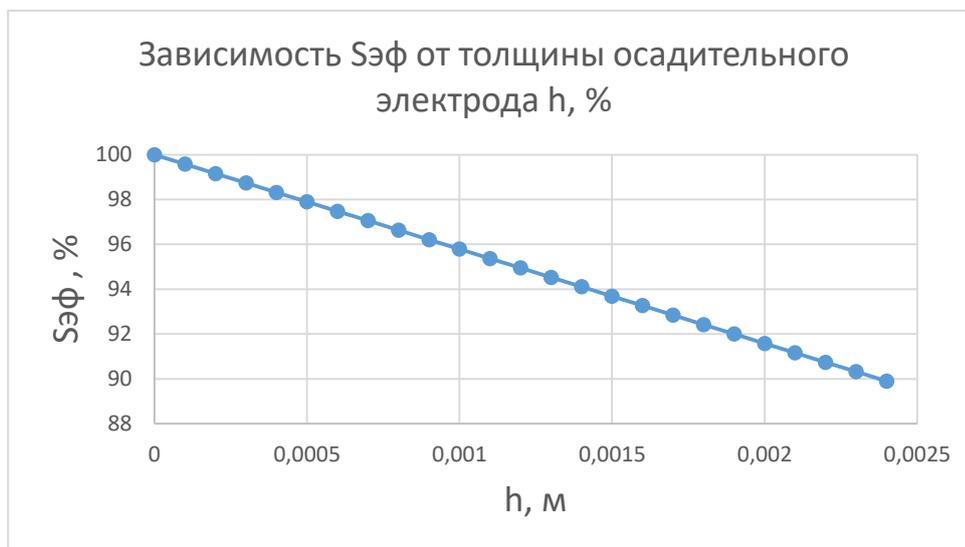


Рисунок 3.4 – Зависимость  $S_{эф}$  от толщины осадительного электрода  $h$ , %

По результатам, которые можно увидеть на зависимостях можно сделать вывод, что для соблюдения условия затенения модуля не более чем на 6 - 8%, оптимальным количеством осадительных электродов (при вертикальной ориентации) можно считать их количество  $N$  – до 28-30 шт. с толщиной  $h$  – до 1,3 мм. При соблюдении этих параметров солнечные панели смогут эффективно работать без значительной потери мощности. Для произведения дальнейших расчетов примем:  $N = 25$  шт.,  $h = 0,001$  м. Таким образом, площадь эффективной работы панели  $S_{эф}$  при вертикальной ориентации осадительных электродов устройства рассчитывается по формуле (3.4) и оставляет:

$$S_{эф} = 0,475 - 0,001 \cdot 25 = 0,45 \text{ (м}^2\text{)}$$

Межэлектродное расстояние  $d$  определяется по формуле (3.6):

$$d = \frac{b - (h \cdot N)}{N - 1}, \quad (3.6)$$

где  $b$  – активная ширина рабочей поверхности солнечного модуля,  $b = 0,5$  м.

$$d = \frac{0,5 - (0,001 \cdot 25)}{25 - 1} = 0,02 \text{ (м)}$$

Для произведения дальнейших расчетов примем  $d = 0,02$  м.

Теперь произведем расчет конструктивных параметров устройства при горизонтальной ориентации осадительных электродов. Вид устройства с горизонтальной ориентацией представлен на рисунке 3.5 [81-82].

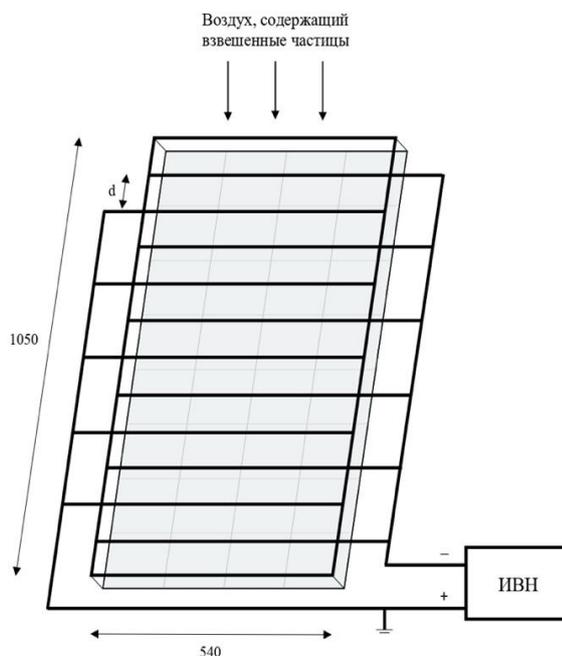


Рисунок 3.5 – Общий вид устройства защиты (горизонтальная ориентация)

Для определения суммарной площади осадительных электродов защитного устройства  $S_{о.э.}$  используем формулу (3.3), при условии, что активная ширина солнечного модуля  $b = 0,5$  м.

$$S_{о.э.} = 0,5 \cdot h \cdot N \quad (3.7)$$

Для построения зависимости  $S_{эф}=f(h)$  примем  $N=70$  (рисунок 3.6).

Для зависимости  $S_{эф}=f(N)$  также примем  $h=0,001$  м (рисунок 3.7).

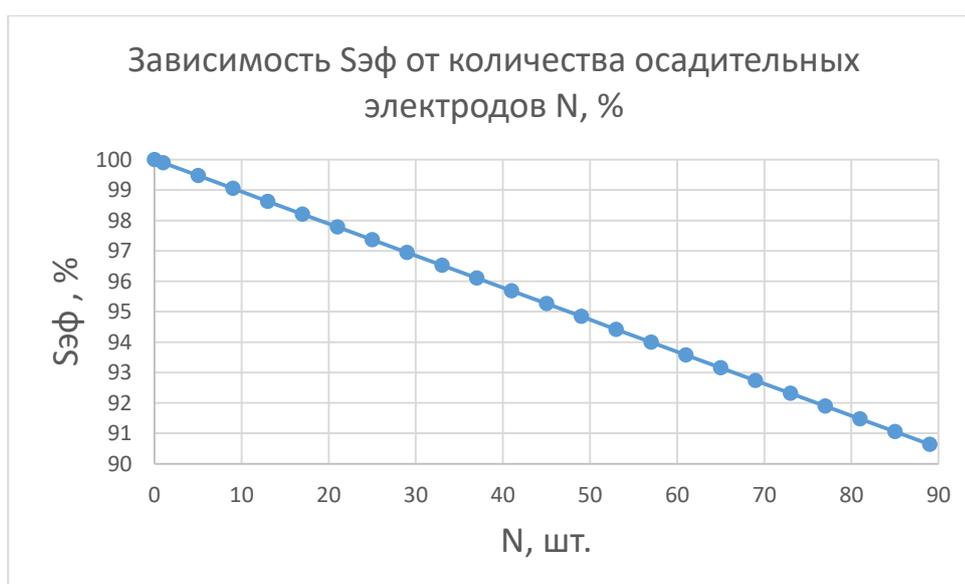


Рисунок 3.6 – Зависимость  $S_{эф}$  от количества осадительных электродов N, %

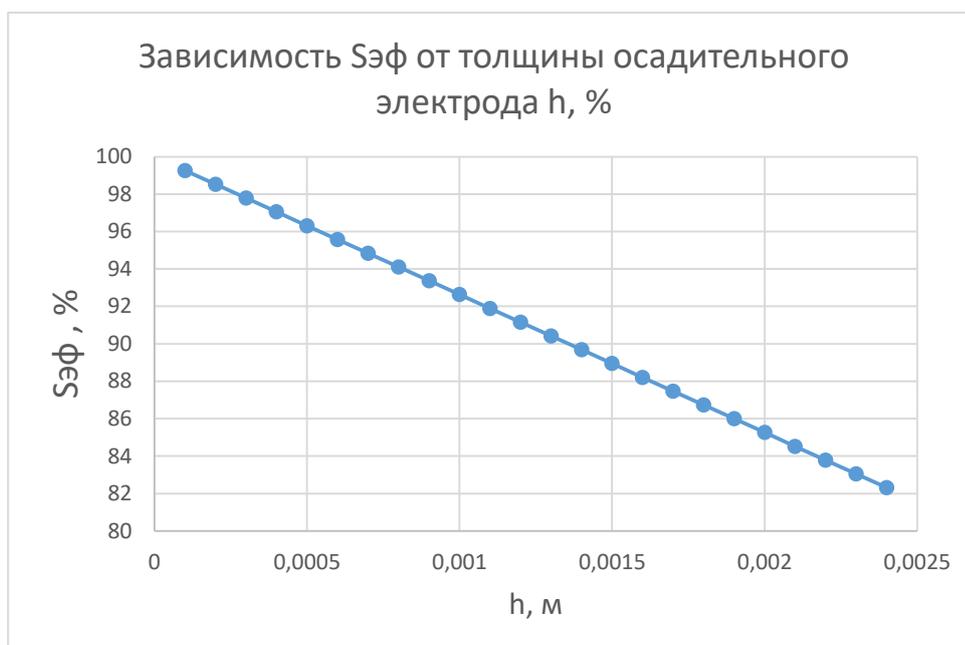


Рисунок 3.7 – Зависимость  $S_{эф}$  от толщины осадительного электрода  $h$ , %

По результатам, которые можно увидеть на зависимостях, можно сделать вывод, что для соблюдения условия затенения модуля не более чем на 6 - 8%, оптимальным количеством осадительных электродов (при горизонтальной ориентации) можно считать их количество  $N$  – до 73 - 77 шт., с толщиной  $h$  – до 1 мм.

При соблюдении этих параметров солнечные панели смогут эффективно работать без значительной потери мощности. Для произведения дальнейших расчетов примем:  $N = 70$  шт.,  $h = 0,001$  м.

Таким образом, площадь эффективной работы панели  $S_{эф}$  при вертикальной ориентации осадительных электродов устройства рассчитывается по формуле (3.4) и оставляет:

$$S_{эф} = 0,475 - 0,001 \cdot 70 = 0,405 \text{ (м}^2\text{)}$$

Межэлектродное расстояние  $d$  определяется по формуле (3.6), где  $b$  – активная длина рабочей поверхности солнечного модуля,  $b = 1$  м.

$$d = \frac{1 - (0,001 \cdot 70)}{70 - 1} = 0,014 \text{ (м)}$$

Для произведения дальнейших расчетов примем  $d = 0,014$  м.

### 3.2.1 Режимные параметры устройства

Для системы улавливания пылевых частиц их эффективность зависит от напряженности электрического поля, создаваемого осадительными электродами. Напряженность поля  $E$  определяется отношением приложенного к электродам напряжения  $U$  к расстоянию между ними  $d$ :

$$E = \frac{U}{d}, \text{ кВ/м} \quad (3.8)$$

Если принять, что основной силой, действующей на частицу пыли при ее осаждении, является кулоновская сила  $F_k = q_{есм}E$ , где  $q_{есм}$  – величина естественного заряда частиц, которая также пропорциональна напряженности поля, то эта сила будет иметь квадратичную зависимость от напряженности  $E$ .

Поэтому при проектировании устройств защиты от пыли необходимо увеличить напряженность поля в области осаждения до максимального значения. Однако эта напряженность ограничена электрической прочностью межэлектродного промежутка. При нормальных атмосферных условиях напряженность пробоя воздуха составляет  $E_{пр} = 3000$  кВ/м [83].

Необходимо учитывать тот факт, что при подаче напряжения могут возникнуть пробой межэлектродного промежутка и, прежде всего, у кромок электродов и мест их крепления к корпусу устройства. В этой части межэлектродного промежутка, вследствие наличия неоднородного поля воздух ионизируется, что может привести к созданию благоприятных условий для возникновения искрового разряда.

Для предотвращения пробоя межэлектродного промежутка напряжение на осадительных электродах должно быть таким, чтобы соблюдалось условие:  $E \leq E_{пр}$ .

Предлагаемая нами схема проволочных осадительных электродов, расположенных параллельно друг другу вдоль поверхности солнечного модуля на одинаковом расстоянии (с одинаковым межэлектродным расстоянием  $d$ ) может обеспечить повышенное напряжение на электродах, создаваемое высоковольтным источником напряжения (ИВН).

### 3.3 Расчет эффективности улавливания пылевых частиц

Основным параметром, влияющим на процесс осаждения пылевых частиц на осадительные электроды является напряженность электрического поля. Для зоны действия устройства защиты от загрязнений она определяется суммой напряженностей межэлектродного промежутка:

а) между потенциальными и заземленными проводами  $E_{M-M}$ ;

б) между проводами и стеклянной поверхностью солнечного модуля, представляющей собой диэлектрик  $E_{M-д}$ .

В первом случае напряженность определяется отношением приложенного к электродам напряжения  $U$  к расстоянию между проводами (электродами)  $d$ :

$$E_{M-M} = \frac{U}{d} \quad (3.9)$$

Напряженность между проводами устройства защиты и солнечным модулем будет иметь другое значение, поскольку между заземленным алюминиевым корпусом модуля, имеющим положительный потенциал и электродами устройства находятся ячейки солнечного модуля с воспринимающей солнечные лучи стеклянной поверхностью. В данном случае стеклянная поверхность представляет собой плоский осадительный электрод в виде пластины.

В современной технологии изготовления монокристаллических и поликристаллических солнечных модулей используются различные виды защитных стекол:

а) листовое «float»-стекло;

б) каленое;

в) антибликовое;

г) двойное стекло «Sandwich».

Все эти виды стекол выполняют защитную функцию, имеют высокий коэффициент прозрачности, толщину и прочность больше, чем у обычного оконного стекла [84].

Стекло относится к классу диэлектриков и имеет диэлектрическую проницаемость от 3,2 до 3,8. Эти значения необходимо учитывать при определении напряженности межэлектродного промежутка.

На рисунке 3.8 показаны зависимости напряженности поля от напряжения питания для различных электродов. Зависимости имеют линейный характер и описываются уравнением:

$$E_{M-D} = k \left( \frac{U}{H} \right), \quad (3.10)$$

где  $H$  – расстояние между рядом проволочных электродов и стеклянной поверхностью солнечного модуля;  $k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от диэлектрических свойств материала  $\epsilon$ .

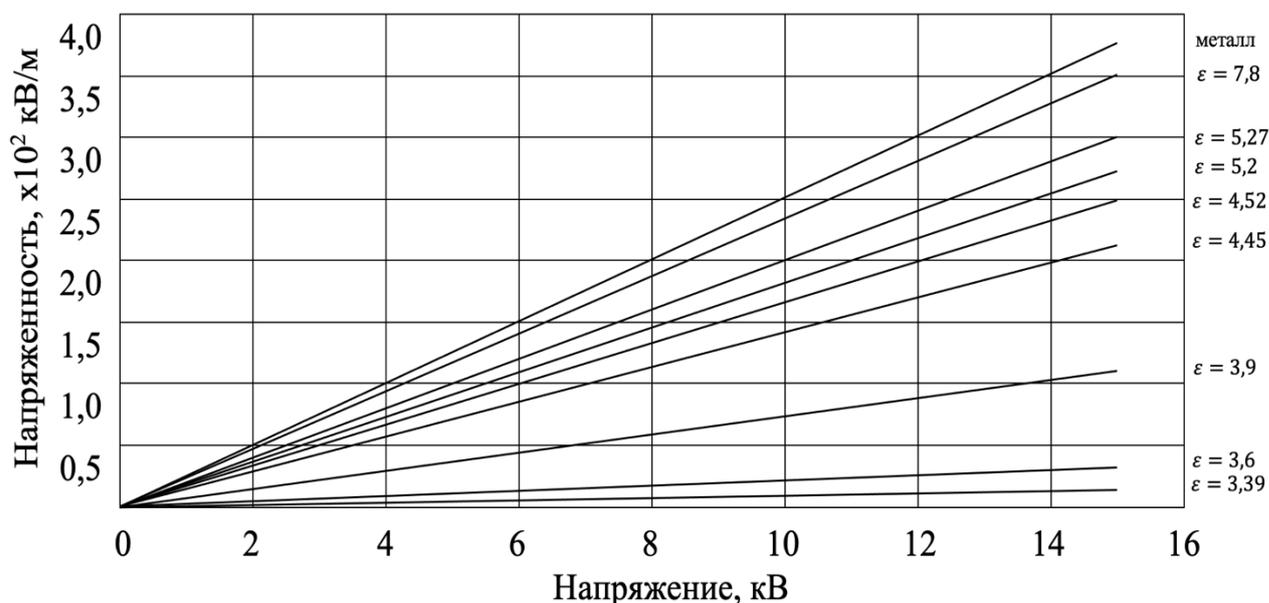


Рисунок 3.8 – Зависимость напряженности поля от напряжения питания для различных типов электродов

Для железных электродов  $\epsilon = \infty$ ,  $k = 1$ , для диэлектрических  $k < 1$ . Для стеклянного покрытия с  $\epsilon = 3,8$  напряженность электрического поля при приложенном напряжении 10 кВ будет равна  $0,65 \cdot 10^2$  кВ/м.

В соответствие с рисунком 3.9 при полученном значении напряженности коэффициент  $k = 0,2$ .

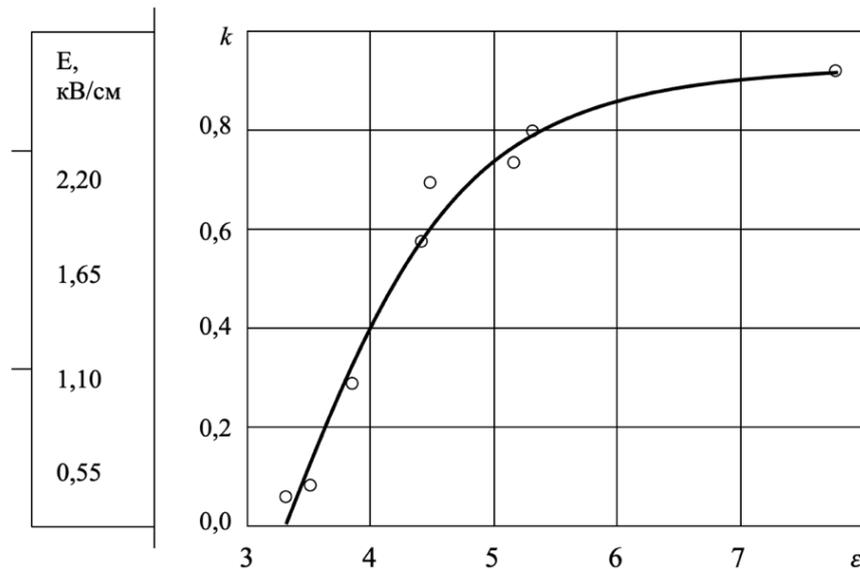


Рисунок 3.9 – Зависимость напряженности поля от диэлектрической проницаемости материала пластины

Общая напряженность области действия устройства будет равна сумме:

$$E = E_{M-M} + E_{M-D} = \frac{U}{d} + k \frac{U}{H}, \quad (3.11)$$

где  $H$  – расстояние между рядом проволочных электродов и поверхностью стеклянной пластины.

От напряженности электрического поля зависит скорость осаждения частиц на осадительных электродах.

Для частиц размером более 1 мкм она определяется:

$$v_1 = 10^{-11} E^2 \cdot \frac{r_{\text{ч}}}{\mu_0}, \quad (3.12)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля, В/м;  $r_{\text{ч}}$  – радиус частицы, м;  $\mu_0 = 18,1 \cdot 10^{-6}$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с.

Для мелкодисперсной пыли с размером частиц  $r_{\text{ч}} < 1$  мкм скорость равна:

$$v_2 = 0,17 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{E}{\mu_0} \quad (3.13)$$

Частицы пыли с такими размерами в отсутствие ветра будут долго витать в воздухе, не оседая на поверхности, поэтому далее в расчетах мы их не учитываем.

На рисунке 3.10 представлена зависимость скорости осаждения частиц размером  $r_{\text{ч}}$  более 1 мкм при напряженности электрического поля  $E = 3 \cdot 10^5$  В/м.

Из зависимости видно, чем крупнее частицы, тем быстрее они притягиваются к осадительным электродам за счет сил  $F_k$  и  $F_E$ .

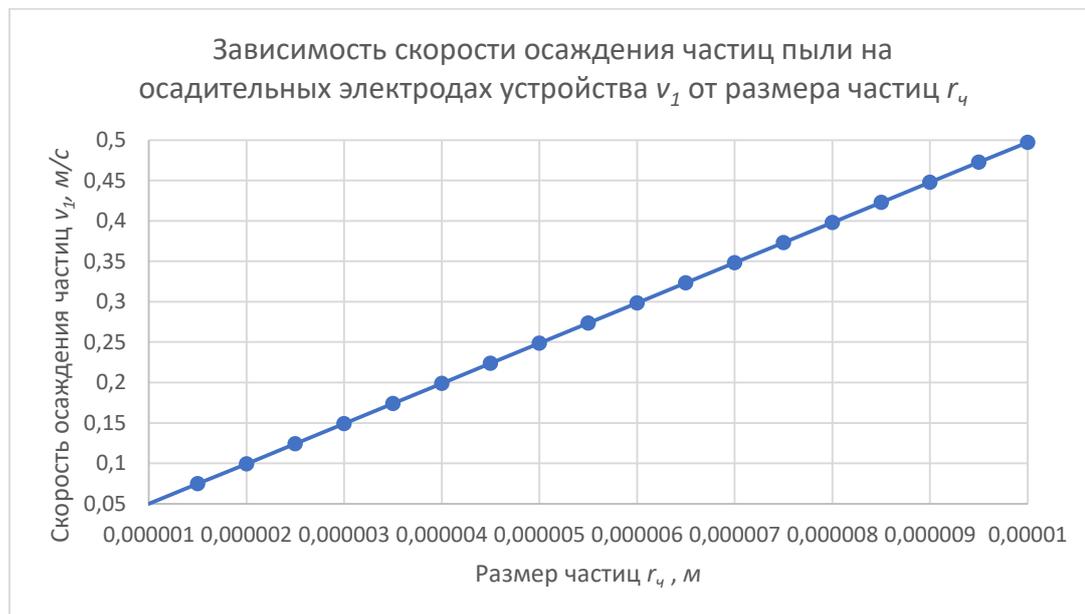


Рисунок 3.10 – Зависимость скорости осаждения частиц пыли на осадительных электродах устройства  $v_1$  от размера частиц  $r_ч$

На скорость дрейфа частиц влияют и такие факторы, как гидравлические силы и осаждение частиц на электроды под действием турбулентных пульсаций воздушного потока, обусловленных большим градиентом его скорости вблизи осадительных проводов. Можно предположить, что в результате турбулентности увеличивается вероятность попадания большого количества частиц в зону непосредственной близости к осадительным электродам.

Скорость дрейфа частиц входит в уравнение для определения эффективности очистки:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{v_ч}{f}}, \quad (3.14)$$

где  $f$  – удельная поверхность осаждения (поверхность осадительных электродов, приходящаяся на  $1 \text{ м}^3/\text{с}$  проходящего через устройство объема воздуха,  $\text{м}^2/\text{м}^3/\text{с}$ ).

Произведем расчет эффективности очистки для следующих значений:

- а) радиус пылевой частицы  $r_ч$  примем от  $0,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  до  $10 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ;
- б) коэффициент динамической вязкости воздуха  $\mu_0 = 18,1 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ .

Для расчета  $f$  необходимо учесть толщину осадительных проволок, их количество и длину по отношению к площади модуля и объема воздуха находящегося в пространстве устройства для двух вариантов ориентации осадительных электродов – вертикального и горизонтального.

Площадь рабочей поверхности солнечного модуля  $S_{р.п.}$ :

$$S_{р.п.} = F_{с.э.} \cdot n \cdot K_{зап} = 0,125 \cdot 0,125 \cdot 32 \cdot 0,95 = 0,475 \text{ (м}^2\text{)}$$

Тогда объем воздуха, находящегося в пространстве устройства  $V$ :

$$V = S_{р.п.} \cdot H = 0,475 \cdot H \text{ (м}^3\text{)}$$

Примем высоту  $H$ , на которой располагаются осадительные электроды над поверхностью солнечного модуля, в диапазоне от 0,01 до 0,05 м (при расчетах других параметров примем  $H=0,025$  м).

В качестве материала осадительного электрода применяется тонкая железная проволока диаметром  $h = 0,001$  м.

Вертикальная ориентация осадительных электродов.

Количество электродов  $N = 25$  шт. Длина  $l = 1$  м.

Суммарная площадь осадительных электродов защитного устройства (при их вертикальной ориентации)  $S_B$ :

$$S_B = l \cdot N \cdot h = 1 \cdot 25 \cdot 0,001 = 0,025 \text{ (м}^2\text{)}$$

Удельная поверхность осаждения  $f_B$ :

$$f_B = \frac{S_B}{V} / t = \frac{0,025}{0,475 \cdot H} / 1 = \frac{0,053}{H}$$

Горизонтальная ориентация осадительных электродов.

Количество электродов  $N = 70$  шт. Длина  $l = 0,5$  м.

Суммарная площадь осадительных электродов защитного устройства (при их вертикальной ориентации)  $S_\Gamma$ :

$$S_\Gamma = l \cdot N \cdot h = 0,5 \cdot 70 \cdot 0,001 = 0,035 \text{ (м}^2\text{)}$$

Удельная поверхность осаждения  $f_\Gamma$ :

$$f_\Gamma = \frac{S_\Gamma}{V} / t = \frac{0,035}{0,475 \cdot H} / 1 = \frac{0,074}{H}$$

С учетом полученных выражений эффективность очистки будет определяться:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{10^{-11} \cdot \left(\frac{U}{d} + k \frac{U}{H}\right)^2 \cdot r_{\text{ч}}}{f \cdot \mu_0}}$$

На рисунках 3.11, 3.12 и 3.13 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 пыли, которая чаще всего и осаждается на поверхность солнечного модуля.

Для построения зависимостей межэлектродное расстояние примем  $d = 0,02$  м для вертикальной ориентации и  $d = 0,014$  м для горизонтальной ориентации. Расстояние между рядом проволочных электродов и поверхностью стеклянной пластины примем  $H = 0,02$  м.

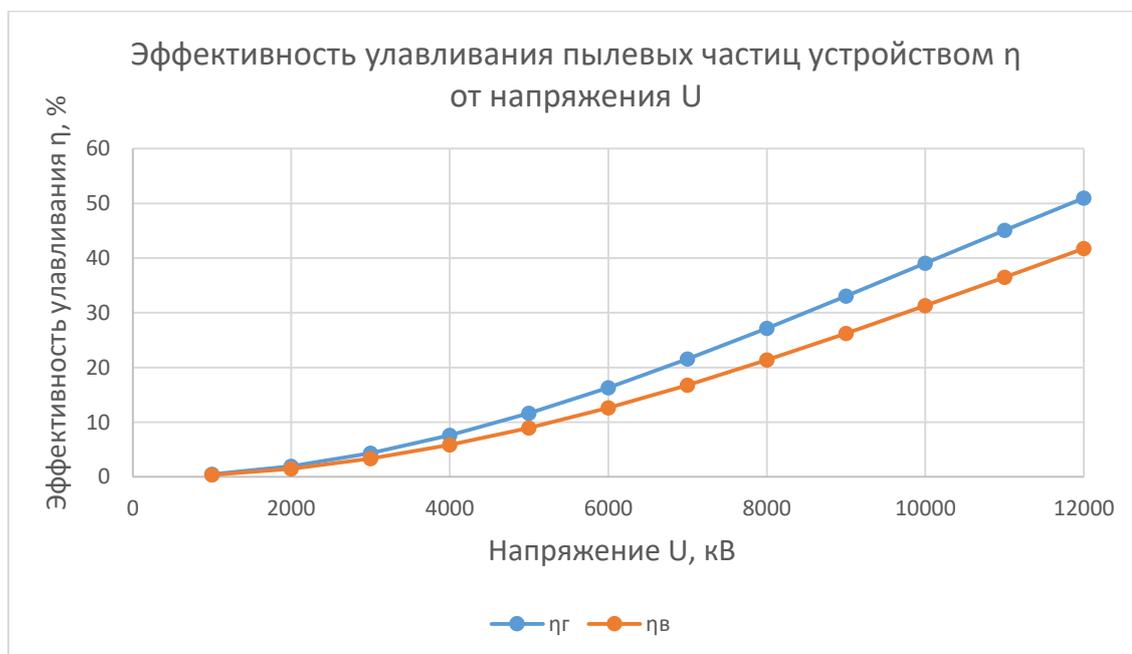


Рисунок 3.11 – Эффективность улавливания пылевых частиц устройством  $\eta$  от напряжения  $U$  (для горизонтальной и вертикальной ориентации электродов)

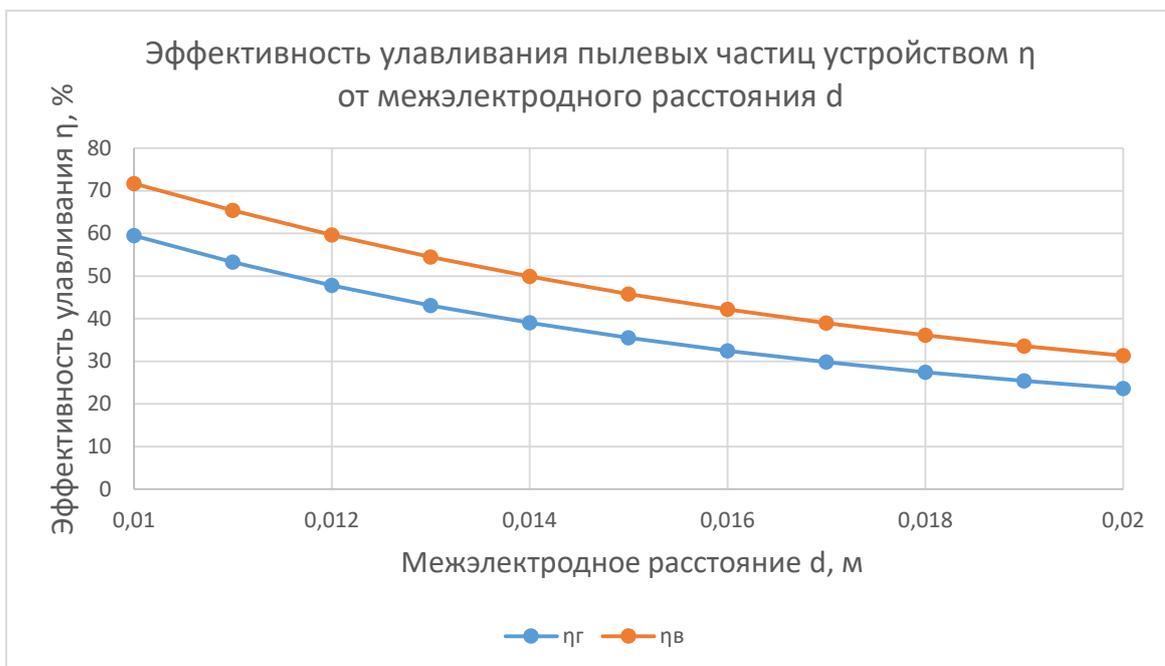


Рисунок 3.12 – Эффективность улавливания пылевых частиц устройством  $\eta$  от межэлектродного расстояния  $d$  (для горизонтальной и вертикальной ориентации электродов)

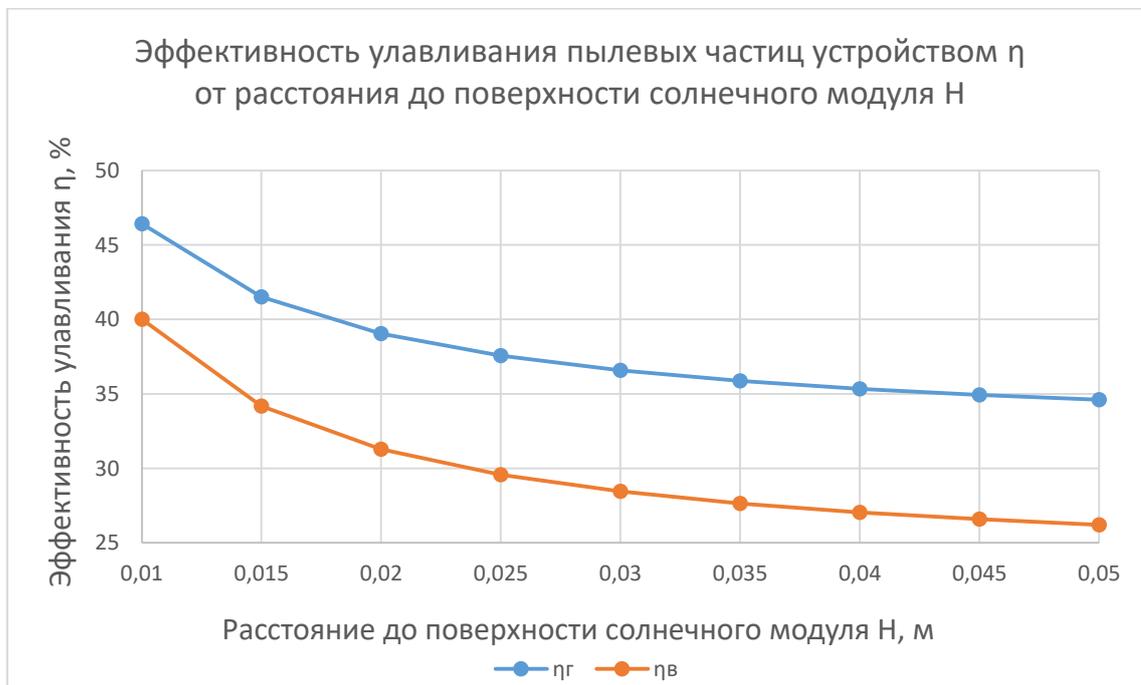


Рисунок 3.13 – Эффективность улавливания пылевых частиц устройством  $\eta$  от расстояния до поверхности солнечного модуля  $H$  (для горизонтальной и вертикальной ориентации электродов)

### Выводы по главе 3

По принципу защиты высоковольтное устройство предотвращения загрязнений (УПЗ) определяется следующим. Частицы пыли, имея биполярный заряд, приближаясь к поверхности модуля, попадают в электрическое поле панели, создаваемое заряженной сеткой (параллельно расположенной сетью проволок). Под действием электрических сил поля частицы оседают на осадительном электроде и задерживаются до момента очистки.

Наиболее эффективное воздействие электрического поля на материал проявляется в случае, если он находится в мелко раздробленном (мелкодисперсном) состоянии. В промышленности большая часть материалов используется именно в таком состоянии.

Еще никогда использование высоковольтного устройства не рассматривалось как метод защиты поверхности солнечных панелей от пылевых загрязнений. По причине своей простоты, безопасности и дешевизны данный метод может приобрести большую актуальность в солнечной энергетике.

В качестве основного конструктива устройства были выбраны металлические (железные) проволочные электроды, которые отвечают поставленным требованиям.

Компоновка проволочных электродов для осаждения на них пыли выбрана по принципу простоты исполнения и эффективности использования: параллельное расположение электродов с постоянным межэлектродным расстоянием.

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.

## **ГЛАВА 4 ПРОГРАММА, МЕТОДИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **4.1 Программа экспериментов**

Программой экспериментальных исследований предусматривалось:

- а) исследование времени загрязнения поверхности и периода работы модулей до критического значения снижения генерации;
- б) разработка экспериментальной установки для испытаний устройства предотвращения запыления солнечных модулей;
- в) исследование эффективности улавливания пыли разработанным устройством.

### **4.2 Исследование времени загрязнения поверхности и периода работы модулей до критического значения снижения генерации**

Проведенный анализ литературных источников по вопросу защиты солнечных модулей от пылевых загрязнений показал, что в зависимости от места и условий эксплуатации (в регионах с разными климатическими условиями) на солнечные модули оказывают влияние совершенно различные составы пыли.

Именно поэтому в 2022 году совместно с коллегами 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 [85].

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. При исследованиях были использованы климатические характеристики

обоих регионов с данными по инсоляции солнечной энергии в весенний период года, а также данные исследований, представленных 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 городе Бохтар. 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 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 влажности 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.

По данным ученых Физико-технического института им. С.У. Умарова АН Республики Таджикистан в последнее десятилетие прошлого века в Республике наблюдались продолжительные (до восьми часов) пылевые бури высокой интенсивности, которые снижали горизонтальную видимость до 50 м [86].

Наблюдения ученых за период 2018-2019 гг. показали, что сильные пылевые бури происходят преимущественно в городе Бохтар, из-за особенности географического расположения города. В условиях пылевых бурь, помимо ухудшения дальности горизонтальной видимости, ухудшается интенсивность солнечной инсоляции, происходит уменьшение попадания видимой части солнечного спектра на фотоэлектрические модули даже при ясной погоде.

Для проведения исследования была создана экспериментальная установка (рисунок 4.1). 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 МАЯК 12V/60/80W), подключенные к обоим модулям, определялись с помощью цифрового мультиметра типа CHYVictorVC890D.



Рисунок 4.1 – Экспериментальная установка для определения генерации в условиях г. Бохтар (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)

Результаты изменения вырабатываемой солнечными модулями мощности показаны на рисунке 4.2.

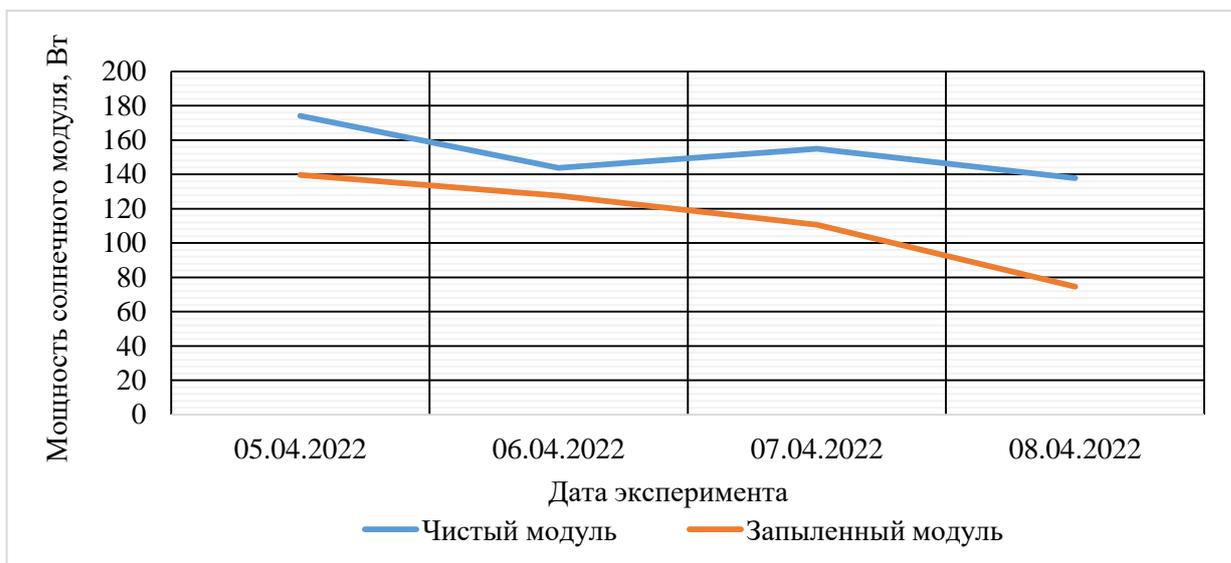


Рисунок 4.2 – Изменение мощности солнечных модулей в зависимости от уровня запыленности

Из зависимостей видно, что при каждом измерении мощность чистого фотоэлектрического модуля была больше, чем запыленного модуля. Снижение мощности 06.04.2022 и 08.04.2022 года было связано с общей облачностью, 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. Таким образом в регионе с повышенной запылённостью (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% процентов 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.

Аналогичные эксперименты были проведены для другой зоны, характеризующейся промышленными выбросами пыли, – 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.

Концентрация пыли на территории Челябинской области составляет 12-19 мг/м<sup>3</sup>, 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.

Предварительно в период май-июль 2021 года нами были проведены экспериментальные исследования, в рамках которых солнечные панели равномерно запылялись естественным путем, при этом угол наклона солнечного модуля менялся раз в 2 недели (ориентации: 0°, 10°, 30°, 55°). На основе полученных результатов (Приложение 1) нами были сделаны выводы, что от угла наклона запыленность менялась незначительно, большее влияние оказывают погодные условия (например, снижение мощности вырабатываемой электроэнергии в период с 20 по 23 апреля вызвано пасмурной погодой и дождем, а дальнейшее повышение мощности связано с ясной погодой и естественной очисткой панели во время дождя). Тенденция не меняется со сменой угла наклона модулей. Общее снижение мощности солнечных модулей в течение эксперимента связано с их запылением и соответствующим затенением их поверхности.

Далее 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 панели модели brs 32-100 бренда JINGYANGPV [80] (производство – Китай, количество ячеек: 32, размер: 1050 мм \* 540 мм \* 2,5 мм, материал: монокристаллический силикон, номинальная емкость: 100 Вт, максимальная мощность: 105Вт) (рисунок П.2, таблицы П.2.1, П.2.2, П.2.3 и П.2.4, Приложение 2).

Аналогично эксперименту в г. Бохтар, запыление поверхности одного из солнечных модулей происходило естественным образом, второй очищался в течение эксперимента с целью определения вырабатываемой мощности и изучения влияния запыленности на их работу. Метеорологические данные (температура, влажность, длительность солнечного дня, погодные условия), показатели устройств показаны в Приложении 3 (Таблицы П.3.1 и П.3.2).

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.

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

Вид экспериментальной установки показан на рисунке 4.3.

На рисунке 4.4 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, с 19 марта 2022 г. по 19 апреля 2022 г.

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

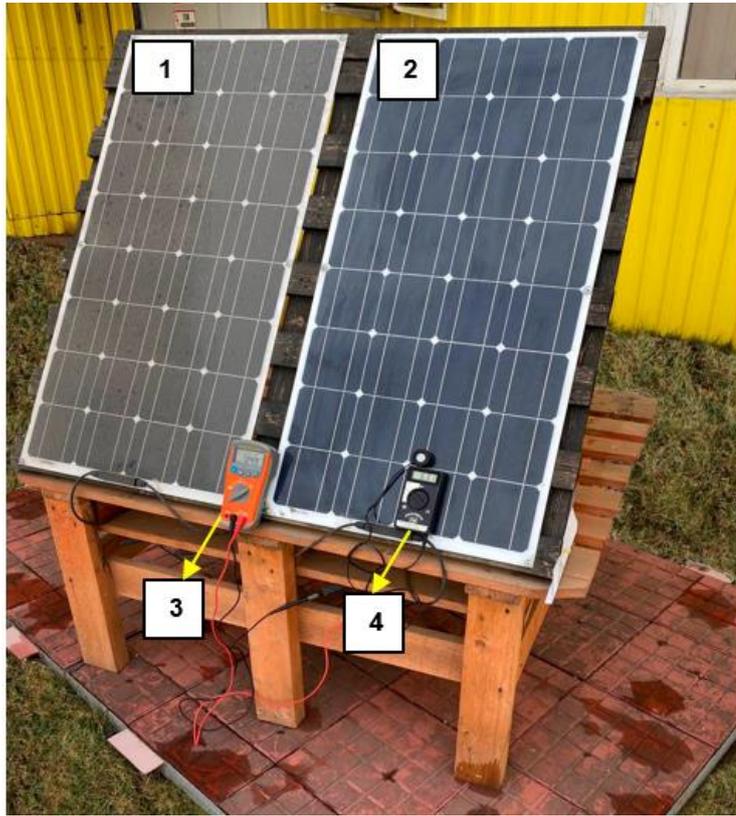


Рисунок 4.3 – Экспериментальная установка для определения генерации солнечных модулей: 1 – запыленный солнечный модуль №1; 2 – контрольный солнечный модуль (очищенный) №2; 3 – цифровой мультиметр APPA 62; 4 – люксметр ТУ 4215-003-16796024-04)

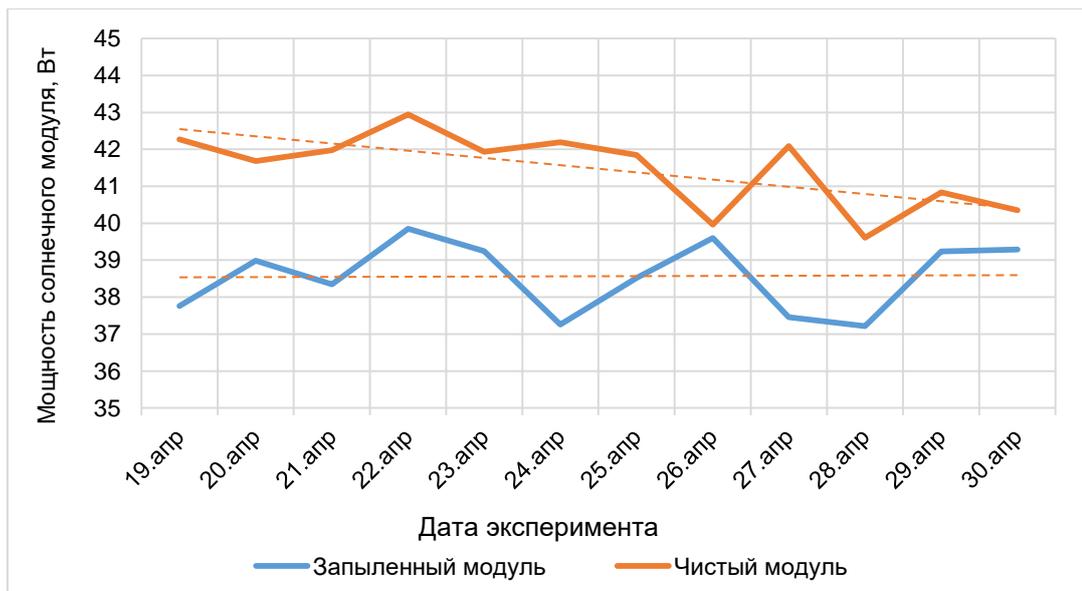


Рисунок 4.4 – Снижение выработки мощности солнечными модулями

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. На основании полученных данных был сделан вывод о необходимости очистки модулей от пылевых загрязнений не реже раза в неделю.

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. Предотвратить загрязнение модулей мелкодисперсной пылью промышленных городов предлагается на основе высоковольтного устройства защиты с использованием технологии улавливания частиц пыли силами электрического поля устройства [87]. Сочетание использования устройств защиты модулей от загрязнения с регулярной (не менее одного раза в неделю) очисткой поверхности солнечных панелей позволит сохранить их работоспособность на уровне, заявляемом производителями устройств.

### **4.3 Разработка экспериментальной установки для испытаний устройства предотвращения запыления солнечных модулей**

Для проведения экспериментальных исследований высоковольтного устройства защиты были использованы две одинаковые ранее упомянутые солнечные панели bps 32-100 бренда JINGYANGPV [69] (Приложение 2). 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, второй модуль оставался открытым к запылению (рисунок 4.5).

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



Рисунок 4.5 – Общий вид экспериментальной установки: слева – горизонтальная ориентация устройства, справа – вертикальная ориентация устройства (1 – запыленная солнечная панель, 2 – очищаемая устройством солнечная панель, 3 – УПЗ, 4 – источник высокого напряжения ВПСМ-М, 5 – цифровой мультиметр APPA 62, 6 – распорки из текстолита)

Межэлектродное расстояние при горизонтальной ориентации проволочных электродов для проведения эксперимента было зафиксировано и установлено  $d = 0,014$  м, а при вертикальном расположении –  $d = 0,02$  м, для проведения эксперимента высота была установлена  $H = 0,015$  м при постоянном напряжении, подаваемом на электроды  $U = 12$  кВ.

### 4.3.1 Условия проведения эксперимента

Описание климатических условий. Экспериментальное исследование (рисунок 4.6) 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»), высота над уровнем моря – 260 м, климат – континентальный, средняя зимняя температура – -16 - 18 °С (до - 40 °С), средняя летняя – +17 - 20 °С (до + 40 °С), годовые объемы осадков – 300 мм, средняя скорость ветра – 3 - 4 м/с (увеличивается до 25 м/с; 300 дней в году ветреные), среднее количество солнечных часов – 2089 ч/год, на территории области отмечено радиоактивное загрязнение [88]. Описание условий эксплуатации (пыли). 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.



Рисунок 4.6. – Фотоотчет о старте проведения экспериментов (08.05.2023 г.)

Метеорологические данные (температура, влажность, длительность солнечного дня, погодные условия), показатели устройств показаны в Приложении 4 (Таблицы П.4.1 и П.4.2). В течение этого времени солнечные панели равномерно запылялись естественным путем. 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.

### **4.3.2 Выбор источника высокого напряжения для питания устройства, предотвращающего загрязнение модулей**

#### **4.3.2.1 Требования к источнику высокого напряжения (ИВН)**

Эффективная работа высоковольтного устройства связана с напряженностью электрического поля межэлектродного промежутка, которое, как показано ранее, определяется отношением приложенного напряжения к расстоянию между электродами [89]. Любые колебания напряжения могут привести к нестабильности работы установки. Для удовлетворительной работы устройства высокое напряжение на его электродах следует поддерживать с точностью  $\pm (0,5 - 1,0) \%$  [90]. Это необходимо учитывать при выборе ИВН.

ИВН характеризуется следующими основными показателями:

- а) надежность работы;
- б) значение и возможность регулирования выходного напряжения;
- в) наличие защиты при аварийных режимах;
- г) коэффициент полезного действия;
- д) габариты и масса.

Надежность работы любой установки, в том числе и ИВН, оценивается временем наработки на отказ и вероятностью безотказной работы. Нарботка на отказ источника должна составлять не менее 10000 часов. Для обеспечения надежности работы ИВН должны быть построены по модульному принципу.

Выходное напряжение ИВН должно иметь значения в пределах от 6 до 12 кВ. Наличие высокого напряжения является предпосылкой для увеличения токов утечки, которые в маломощных устройствах под воздействием влияющих величин могут быть сравнимы с выходным током, что приведет к изменению выходного напряжения. Поэтому стабильность выходного напряжения должна обеспечиваться конструктивно-технологическими мерами.

В процессе работы устройства защиты могут возникнуть кратковременные перегрузки (например, пробой воздушного промежутка), коронирующий разряд или короткое замыкание. В связи с этим, ИВН должен иметь соответствующую защиту.

КПД источника питания во многом определяется выходным током. В маломощных источниках получение высокого КПД затруднено, т.к. режим этих источников близок к режиму холостого хода. В источниках с большими выходными токами КПД определяет мощность тепловых потерь. Поэтому КПД должен задаваться с учетом мощности и возможности ее отвода от источника при заданных условиях охлаждения и конструктивного исполнения. При выходной мощности до 1 кВт КПД источника должен находиться в пределах 55-70%.

Значение помех от ИВН при его работе не должно превышать нормы, установленные стандартом.

Технические требования к выходным параметрам высоковольтных источников электропитания должны выполняться в заданных условиях эксплуатации. Эти условия определяются назначением аппаратуры, в которой используется высоковольтный источник питания, и могут иметь существенные отличия.

Наряду с требованиями к выходным и входным параметрам, к ИВН предъявляются также требования конструктивно-технологического исполнения. Конструкция высоковольтного источника электропитания должна обеспечить тепловой режим, удобство обслуживания, уровень технологичности, уровень унификации, безопасность работы обслуживающего персонала, ремонтпригодность. Помимо этого, к блоку питания выдвигается требование

стабилизации выходного напряжения, обусловленное падением напряжения при увеличении нагрузки и соответственно тока в цепи, а также нестабильным напряжением в бытовой электросети.

В настоящее время существует большое разнообразие источников высокого напряжения для питания установок. Наиболее простой по конструкции – линейный блок питания, в своей основе он имеет трансформатор, который понижает напряжение переменного тока до необходимого значения, и диодный мост, служащий для выпрямления тока. Изучив характеристики различных вариантов, в том числе их мощность, простоту и надежность в эксплуатации, был принят вариант использования схем умножения напряжения. Схема позволяет отказаться от использования повышающего трансформатора, что, несомненно, упрощает ее. Для использования в эксперименте был выбран источник высокого напряжения типа ВПСМ-М (рисунок 4.6) с параметрами:

- а) напряжение сети  $220\text{ В} \pm 10\%$ ;
- б) частота  $50\text{ Гц} \pm 10\%$ ;
- в) максимальная мощность  $60\text{ Вт}$ ;
- г) рабочее напряжение  $6\text{ кВ} / 12\text{ кВ}$ .



Рисунок 4.6 – Источник высокого напряжения

Именно такой ИВН соответствует нашим требованиям. Предлагаемая схема ИВН состоит из двадцати каскадов умножения напряжения. Их количество было определено в ходе экспериментов. Вход источника подключается к сети переменного тока с номинальным напряжением 220В и частотой 50 Гц, а выходные выводы к проволочным электродам устройства очистки.

Принципиальная схема ИВН [88] приведена на рисунке П.5 Приложения 5.

### 4.3.3 Результаты экспериментальных исследований

В результате проведенного эксперимента были получены опытные данные по снижению выработки электроэнергии исследуемыми модулями (таблица 4.1). По данным таблицы 4.1 был построен график (рисунок 4.7).

На графике видно, что мощность солнечной панели №1, которая не была защищена высоковольтным устройством от запыления, значительно снизилась (на 9,73%).

Такое снижение вызвано запылением поверхности солнечного модуля. При этом поверхность солнечного модуля №2, которая большую часть времени проведения эксперимента была защищена УПЗ, оказалась запылена незначительно, уровень выработки в среднем остался на том же уровне.

Таблица 4.1

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

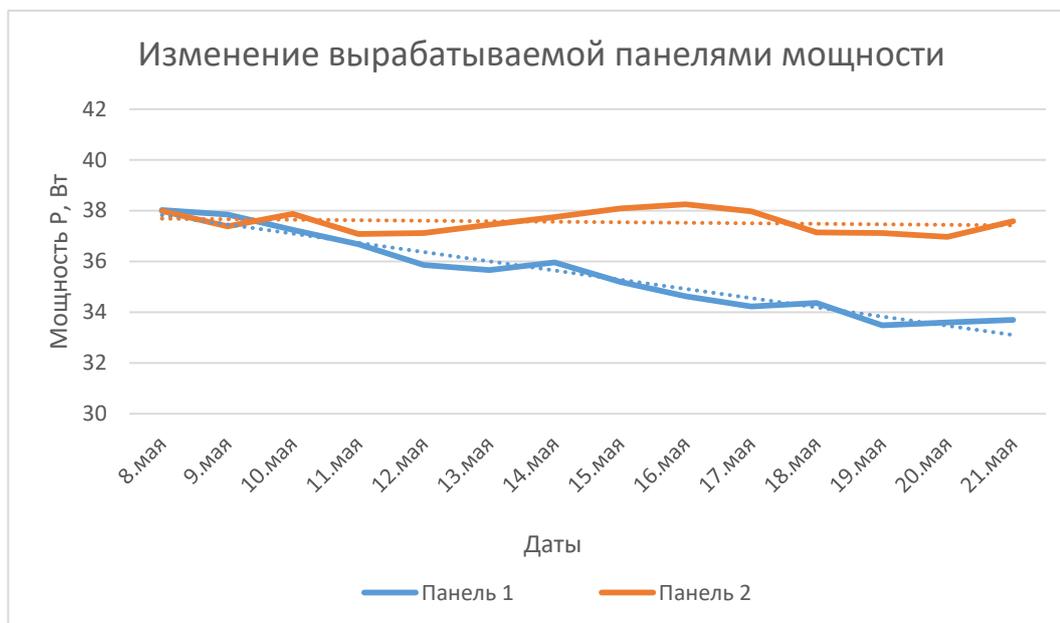


Рисунок 4.7 – Изменение вырабатываемой панелями мощности

На рисунке 4.8 видна разница в уровне запыления поверхности солнечных модулей в период с 8 по 21 мая (дополнительные фотографии экспериментального исследования представлены в Приложении б).

Можно сделать вывод, что разработанное УПЗ с данными параметрами:

- а) размеры рамки устройства: 1050 мм \* 540 мм;
- б) материал проволочных электродов: железо;
- в) толщина проволочных электродов: 0,001 м;
- г) количество проволочных электродов: 25 / 70 шт.;
- д) расположение электродов в устройстве: вертикально / горизонтально;
- е) расстояние между электродами: 0,02 м / 0,014 м;
- ж) высота расположения группы осадительных электродов над поверхностью солнечного модуля: 0,015 м;

при напряжении питания проволочных электродов 12 кВ может считаться эффективным, с несложным конструктивом и простым в эксплуатации, безопасным для обслуживающего персонала и рекомендуется для защиты солнечных панелей как частных, так и промышленных электростанций от пылевых загрязнений.



Рисунок 4.8 – Фотоотчет о проведения экспериментов

#### **4.4 Рекомендации по использованию устройств предотвращения запыления солнечных модулей при эксплуатации для безопасной работы гелиоэнергетических установок**

Устройство для предотвращения загрязнения поверхности солнечного модуля не подлежит обязательной сертификации. Монтаж и эксплуатацию УПЗ осуществляет персонал из числа штатных работников электростанции, имеющих IV группу по безопасности [91] и навыки установки, эксплуатации, обслуживания и ремонта подобных устройств.

До включения в работу данного устройства работник должен познакомиться с его конструкцией, принципом действия и режимными параметрами. Для работы устройства используется источник высокого напряжения 6 / 12 кВ, его максимальная мощность составляет 60 Вт, следовательно, токи имеют небольшое значение и не могут стать причиной аварийной ситуации. Тем не менее, в устройстве предусмотрена надежная герметизация, все токоведущие части устройства также изолированы.

До включения в работу УПЗ работник должен тщательно проверить его состояние. В частности, провести визуальный осмотр на предмет видимых дефектов как самих осадительных электродов, так и корпуса в целом. Необходимо проверить уровень натяжения осадительных электродов.

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.

Если они расположены под углом, то грязь, снег и другие загрязнения не скапливаются на поверхности, а стекают по ней. Однако это не может быть причиной не делать очистку. Со временем какое-то количество загрязнений остается на поверхности и требует обязательного удаления.

Если же панели установлены горизонтально, дождевая вода с их поверхностей не стекает вместе с собравшимся мусором, а высыхая естественным образом, оставляет на поверхности стекла пятна и частицы пыли.

В домашних условиях поверхность солнечных модулей необходимо регулярно очищать с использованием моющих средств, мягких щеток и воды во избежание повреждения поверхности фронтального стекла, герметизирующего слоя и алюминиевой рамы. На крупных СЭС для этих целей используют роботов.

#### **4.5 Направления дальнейших исследований по использованию устройств, предотвращающих загрязнение солнечных модулей**

При рассмотрении перспективных направлений научно-исследовательских работ по разработке и использованию устройств и способов защиты и предотвращения загрязнения солнечных модулей, выделены основные векторы дальнейших исследований и рекомендаций по усовершенствованию УПЗ:

- а) совершенствование разработанного устройства как в конструкции, так и в определении режимных параметров и используемых материалов;
- б) разработка источника высокого напряжения для питания УПЗ;
- в) моделирование процессов осаждения пыли на поверхность СМ;
- г) исследование влияния повышенного напряжения на процессы, происходящие в полупроводниковых материалах фотоячеек при преобразовании энергии фотонов в электрическую энергию;
- д) разработка систем управления работой устройств с использованием специальных датчиков и сенсоров;
- е) разработка устройств для предотвращения загрязнений крупнодисперсными пылевыми частицами, мелким мусором, пометом птиц и др.;

ж) применение разработанных устройств в других областях народного хозяйства (например, в ЖКХ для защиты оконных стекол от запыления).

Совершенствование разработанного устройства можно вести в направлении использования других материалов, изменении размеров элементов устройства, конфигурации осадительных электродов, способов крепления и др.

Перспективным может быть исследование комбинированных устройств с электрическими и магнитными полями для осаждения мелких металлических частиц, а также использование явления трибоэлектризации. Работы в данном направлении должны проводиться с целью повышения эффективности улавливания загрязняющих частиц устройствами, увеличения их надежности, экологичности, экономичности и удобства обслуживания и эксплуатации.

Разработка специального компактного и надежного источника высокого напряжения для питания устройств защиты от загрязнения может иметь большую практическую значимость для проведения дальнейших экспериментальных работ и рекомендаций для производителей солнечных модулей.

Моделирование процессов, происходящих в структуре солнечных элементов при воздействии повышенного напряжения, подаваемого на устройство, поможет определить границы данного параметра и установить критерии максимальной эффективности работы устройства.

Важным направлением продолжения исследований является разработка системы управления процессом очистки, подбор специальных датчиков и сенсоров, влияющих на снижение генерации солнечного модуля и необходимости подключения устройства в работу.

Реализация указанных направлений научных исследований позволит создать уникальное, еще более совершенное устройство и тем самым значительно снизить потери от снижения мощности на солнечных электростанциях, сохранить человеческий и водный ресурс, задействованный при очистке загрязненных модулей.

## **Выводы по главе 4**

Экспериментально подтверждено позитивное влияние использования высоковольтного устройства защиты от пылевых загрязнений на поверхности солнечного модуля, а также предложена методика расчета эффективности работы данного устройства.

Разработанное устройство предотвращения пылевых загрязнений и деградации солнечного модуля на практике подтвердило свою эффективность – в период проведения эксперимента (14 дней) снижение вырабатываемой мощности солнечным модулем, не защищенным УПЗ, составило около 10%, в то время как вырабатываемая мощность солнечного модуля, защищенного УПЗ, практически не изменилась. Увеличение срока запыления солнечных модулей (от 1 месяца) поведет за собой пропорциональное снижение вырабатываемой мощности (до 40 - 50%), поэтому можно сделать вывод о необходимости использования УПЗ на постоянной основе для предотвращения запыления и деградации солнечных модулей.

Разработанное устройство является безопасным, устойчивым в работе, имеет небольшие габаритные размеры и вес (по сравнению с существующими на данный момент устройствами очистки и защиты солнечных модулей), не требует от работников, имеющих IV группу по безопасности и работающих с ним, особых навыков установки, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта подобных устройств.

Полученные теоретические и экспериментальные зависимости и методика расчета конструктивных и режимных параметров могут быть использованы для последующего совершенствования устройства предотвращения загрязнений.

Разработанное устройство готово к производству, введению в эксплуатацию и внедрению на небольшие частные устройства, а также крупные солнечные электростанции.

## ГЛАВА 5 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСТРОЙСТВА

Для стабильной и эффективной работы солнечных модулей необходимо, чтобы их поверхность всегда была чистой и доступной для солнечных лучей. При установке модулей под определенным углом к горизонту, панели могут самоочищаться от снега, упавших листьев и других загрязнителей. Но даже при таком расположении панелей они не могут очиститься до состояния сохранения максимальной выработки энергии. Особенно это касается наличия на поверхности мелкодисперсной пыли, способной проникать в структуру фотоэлектрических ячеек, что требует специальных устройств для очистки.

Ранее были рассмотрены различные способы удаления загрязнений с модулей, включая ручной способ и автоматизированную или роботизированную очистку. Во всех случаях требуются затраты труда обслуживающего персонала, водных ресурсов, моющих средств и т.д.

Стоимость очистки зависит от объекта: либо это крупная солнечная электростанция с рядами сотен солнечных батарей, либо частная система, установленная на кровле здания. Место расположения объектов также влияет на стоимость. Для крупных СЭС стоимость очистки составляет 0,015 евро за квадратный метр в азиатских и африканских странах, и около 0,9 евро за квадратный метр в странах Европы, например, в Нидерландах. Для индивидуальных установок эта стоимость составляет соответственно 0,06 и 8,0 евро/м<sup>2</sup>. Поэтому владельцы систем фото-генерации несут потери из-за необходимости очистки и одновременно в связи со снижением производительности солнечных установок.

По данным среднегодовые потери глобального масштаба от загрязнения солнечных модулей составляют от 3% до 4% [69]. 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 снижению производительности фотоэлектрических установок. Разработанное нами устройство предотвращения 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.

### **5.1 Технико-экономический и энергетический эффект от применения УПЗ солнечных модулей**

Проектирование средств предотвращения загрязнения солнечных модулей должно предусматривать экономию энергетических, водных, человеческих и других ресурсов. Экономичность системы предотвращения загрязнений по сравнению с существующими методами очистки определяется в основном капитальными затратами и по годовому экономическому эффекту.

По данным [92] 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. Использование устройства, предотвращающего загрязнение солнечных модулей, позволит избежать таких колоссальных потерь и поддерживать поверхность модулей в рабочем состоянии на уровне номинальной выработки энергии. Крайне важным ресурсом для очистки солнечных панелей является вода, которой требуется порядка 40 млрд. литров в год [93]. При этом вода должна быть чистой, не содержащей примесей и солей во избежание механических повреждений поверхности и образования отложений.

Следовательно, для использования воды в системах очистки, ее тоже необходимо довести до требуемого состояния, на что приходится около 10% эксплуатационных затрат на СЭС. В общую стоимость очистки также входит и доставка воды к местам эксплуатации СЭС, а с учетом того, что большинство солнечных электростанций расположено в пустынных и безводных районах Индии, Китая, США, ОАЭ и т.п., затраты на доставку значительно возрастают. Как правило, в таких странах использование рабочей силы в условиях жестких высоких температур ограничивается правительственными мерами, а работа в таких условиях требует высоких зарплат за использование ручного труда. Если добавить к этому растущий дефицит воды во всем мире, то возрастает потребность в разработке и создании либо автоматизированных систем очистки, что не полностью исключает все факторы данного процесса, либо создание устройств, защищающих солнечные модули от загрязнения. Использование разработанного нами устройства, предотвращающего загрязнение солнечных модулей, позволит избежать негативные моменты, связанные с очисткой уже запыленных модулей, поскольку не требует привлечения рабочей силы и дорогостоящего водного ресурса. Мощность импульса составляет 2,4 Вт, таким образом, энергетические затраты на создание импульса минимальны. Эффективность устройств может быть значительной, если производители будут выпускать солнечные модули в комплекте с данным устройством защиты от загрязнения. Некоторое увеличение стоимости модулей окупится значительно быстрее, т.к., в процессе эксплуатации не будет возникать проблема очистки поверхности от пыли.

## **5.2 Расчет экономической эффективности использования УПЗ СМ на предприятии Челябинской области**

Для расчета эффективности необходимо знать:

а) капитальные затраты на устройство (стоимость и количество материалов осадительных электродов, рамки, источника высокого напряжения);

- а) эксплуатационные издержки;
- б) отчисления на амортизацию (при работе устройства не менее 4-х лет);
- в) затраты на электроэнергию;
- г) затраты на текущий ремонт;
- д) затраты на заработную плату при обслуживании устройства;
- е) периодичность очистки.

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 (Приложение 7) и равны:

- а) годовая экономическая эффективность  $\mathcal{E} = 15\,146$  руб.;
- б) 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 [94], на основании расчета окупаемости и экономического эффекта, принято к внедрению на челябинском предприятии ООО «ДИМАНД» (Приложение 8).

## **Выводы по главе 5**

По результатам расчета экономической эффективности внедрения устройства предотвращения загрязнений на предприятии ООО «ДИМАНД» можно сделать вывод, что срок окупаемости УПЗ составит меньше года (около 270 дней), а значит – устройство не только эффективно, но и выгодно.

Как правило, выгода заметна в средне- и долгосрочной перспективе. Внедрение УПЗ может привести не только к увеличению срока эксплуатации солнечных панелей, но и освободить сотрудников предприятия от косвенных задач, связанных с мытьем и уходом за агрегатами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа существующих методов защиты поверхности солнечного модуля от пылевых загрязнений получены выводы, 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.

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.

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.

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.

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.

Разработанное защитное устройство дает положительный экономический эффект в приемлемые сроки. Исходя из вышеперечисленного, данный метод очистки защиты поверхности солнечных модулей может быть рекомендован к внедрению как на крупных солнечных электростанциях, так и на частных единичных солнечных модулях.

**Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы.** 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).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральный закон РФ 12.03.2003 №35-ФЗ «Об электроэнергетике» (в ред. Федерального закона от 04.11.2007 г. 250 – ФЗ) // Закон. – 2003.
2. ГОСТ Р 51595-2000 Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Коллекторы солнечные. Общие технические условия. // М.: ИПК Издательство стандартов. – 2000.
3. ГОСТ Р 55993-2014/IEC/TS1836:2007 Национальный стандарт Российской Федерации. Системы фотоэлектрические. Термины, определения и символы. – М.: Стандартиформ, 2015.
4. Clean Energy Transitions Programme. Annual Report 2022 of International Energy Agency (IEA). – <https://iea.blob.core.windows.net/assets/f75d4c63-e29d-476a-8fc7-497439d6d242/CETPAnnualReport2022.pdf>
5. Renewable capacity highlights by International Renewable Energy Agency (IRENA). – [https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Mar/IRENA\\_RE\\_Capacity\\_Highlights\\_2023.pdf?rev=a4a69a28b3a444f1b4ff02f6a6664bb4&hash=553011612FECB16B409DA315652AB9ED](https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Mar/IRENA_RE_Capacity_Highlights_2023.pdf?rev=a4a69a28b3a444f1b4ff02f6a6664bb4&hash=553011612FECB16B409DA315652AB9ED)
6. Голицын, М.В. Альтернативные энергоносители / М.В. Голицын, А.М. Голицын, Н.В. Пронина. – М.: Наука, – 2004. – 159 с.
7. Удалов, С. Н. Возобновляемые источники энергии: учебное пособие / С.Н. Удалов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 459 с.
8. Федоренко, В. Ф. Возобновляемые источники энергии: тенденции и перспективы развития: Научный аналитический обзор / В.Ф. Федоренко, В.С. Тихонравов, Н.П. Мишуков. – М.: Росинформгрупп. 2015. – 128 с.
9. Рустамов, Н.А. Стандартизация для развития энергетики на возобновляемых источниках / Н.А. Рустамов // Стандарты и качество. – 2015. – № 6(936). – 38-40 с.
10. Tahereh, Z. Morteza, A., Mahmood, Y. 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>

11. 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.
12. 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>
13. Говорушко, С.М. Солнечная энергетика и ее экологические проблемы / С.М. Говорушко // *Международный научный журнал Серия «Альтернативная энергетика и экология»*. – 2011. – Ред. рег. № 967.
14. Шестакова В.В. (Юзикова 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.
15. Kumar, S., Chaurasia, P.V.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.
16. 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>
17. Шестакова В.В. (Юзикова 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.
18. Коробкин, В. И. Экология и охрана окружающей среды: учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению "Строительство" / В.И. Коробкин, Л.В. Передельский. - Москва: КНОРУС, 2013.
19. Mekhilef, S., Saidur, R., & Kamlisarvestani, M. Effect of Dust. Humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells // *Renewable and sustainable energy reviews*. 2012. Vol. 16. P. 2920–2925.

20. Kirpichnikova, I.M., Sudhakar, K., Makhsumov, I.B., Martyanov, A.S., Priya, S. Thermal model of photovoltaic module with heat protective film. Case Studies in Thermal Engineering (IF4.724). 2022. 30:101744. – <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101744>
21. Kirpichnikova I.M., Shestakova V.V. (Yuzikova V.V.) Electrical Properties of Dust and their Influence on the Operation of Solar Modules // 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. DOI: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787100 (Scopus).
22. Даффи, Дж. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж.А. Даффи, У.А. Бекман // – Москва: Изд-во Мир, 2012. – 420 с.
23. Jaszczur, M., Teneta, J., Styszko, K. et al. The field experiments and model of the natural dust deposition effects on photovoltaic module efficiency // Environmental Aspects in the Sustainable Energy Development/ Environ Sci Pollut Res 26, 8402–8417 (2019). – <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1970-x>
24. Крупнейшая СЭС. – <http://www.sunpowerdreams.com/the-largest-solar-power-plant/>
25. Kurnool Ultra Mega Solar Park. – <https://trilectsolar.co.nz/15-largest-solar-farms-in-the-world-in-2021/>
26. Kirpichnikova I.M., Shestakova V.V. (Yuzikova V.V.) Electron-Ion Technology as Protection of Solar Modules from Contamination // International Russian Automation Conference. 2019. P. 554–562. DOI:10.1007/978-3-030-39225-3\_60
27. Kirpichnikova I.M., Shestakova V.V. (Yuzikova V.V.) System for Cleaning the Surface of Solar Modules from Dust Pollution // 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. DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216252 (Scopus).
28. Аникиев, В.В. Эколого-экономические аспекты проблемы реализации положений Киотского протокола в России / В.В. Аникиев // Бюллетень Центра экологической политики России «На пути к устойчивому развитию России». – 2005. – № 32. – 31-32 с.

29. Шестакова В.В. (Юзикова В.В.) Тенденции развития солнечных фотоэлектрических установок // Молодежь. Наука. Инновации: сб. науч. тр., – Владивосток. – 2017.
30. Шестакова В.В. (Юзикова 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.
31. Кирпичникова И.М., Заварухин В.А., Сологубов А.Ю., Шестакова В.В. (Юзикова В.В.) Результаты научных исследований и подготовки специалистов по возобновляемой энергетике в Южно-Уральском государственном университете // Вестник Московского энергетического института. – 2022. – №4. – С. 90-97; 0,44 п.л. / 0,11 п.л.
32. Елистратов, В.В. Климатические факторы возобновляемых источников энергии / В.В. Елистратов, Н.В. Кобышева, Г.И. Сидоренко. – СПб.: Наука, 2010.
33. Удалая, Д.В. Воздействие промышленного производства и автомобильного транспорта на окружающую среду. Основные пути снижения этого воздействия / Д.В. Удалая // Экологическое образование в интересах устойчивого развития: сб. науч. тр. – Москва: Изд-во Академия МНЭПУ, 2016. – Т. 2. – 569-577 с.
34. Виткина, Т.И. Разработка методологических подходов к оценке влияния загрязнения атмосферного воздуха микроразмерными твердыми взвешенными частицами на здоровье населения урбанизированной территории / Т.И. Виткина // – Владивосток: Изд-во ФГБНУ ДНЦФиПД–<https://pandia.ru/text/82/006/57076.php>.
35. Климатические данные для возобновляемой энергетики (база климатических данных) / О.С. Попель, С.Е. Фрид, С.В. Киселева и др. – Москва: ОИВТ РАН, 2010. – 56 с.
36. Кислотные осадки. – [https://studopedia.su/12\\_57947\\_kislotnie-osadki.html](https://studopedia.su/12_57947_kislotnie-osadki.html).
37. Челябинск накрыло плотной пеленой смога. – <https://74.ru/text/ecology/2023/05/01/72267494/>
38. Stoft, S. Renewable fuel and the global rebound effect. Global energy policy center research paper / S. Stoft. 2010. – № 10–06. Accessed 17 Sep 2013. – <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1636911>.

39. Приказ Минтруда России от 24.07.2013 № 328н «Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок».
40. Franco, A. Strategies for optimal penetration of intermittent renewables in complex energy systems based on techno-operational objectives / A. Franco, P. Salza // *Ren. Energy* 36: 2011. – P. 743–753.
41. Чекман, И.С. Аэрозоли – дисперсные системы: Монография / И.С. Чекман, А.О. Сыровая, С.В. Андреева, В.А. Макаров. – Х: «Цифрова друкарня No1», 2013. – 100 с.
42. Kirpichnikova, I.M., Makhsumov, I.B. Increasing the energy efficiency of solar modules by reducing the surface temperature. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki Izvestiya. Tula State University. Technical science*, 2020. Vol. 2. P. 489–499. (In Russ.).
43. Кирпичникова И.М. Шестакова В.В. (Юзикова В.В.) Электрические свойства пыли и их влияние на работу солнечных модулей // *Энергосбережение и водоподготовка*. – 2021. – №4 (132). – С. 10-14; 0,31 п.л. / 0,16 п.л.
44. Таранцева, К.Р. Введение в специальность [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие / К.Р. Таранцева // – Пенза: ПензГТУ, 2012. – 203 с. – <https://e.lanbook.com/book/62565>.
45. Maxwell, D. Addressing the Rebound Effect. A project for the European Commission DG Environment. Final report. Ivrysur- Seine, France: Bio Intelligence Service—Scaling sustainable development / D. Maxwell, P. Owen, L. McAndrew, K. Muehmel. 2011. – Accessed 17 Sep 2013. – [http://ec.europa.eu/environment/eussd/pdf/rebound\\_effect\\_report.pdf](http://ec.europa.eu/environment/eussd/pdf/rebound_effect_report.pdf).
46. Шестакова В.В. (Юзикова В.В.) Использование энергетического потенциала энергосберегающих технологий в социальной сфере / В.В. Шестакова (Юзикова В.В.), И.М. Кирпичникова // *Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: сб. науч. тр.* – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2014. – 540 с.

47. iSolar от KÄRCHER: Системное решение для чистки солнечных батарей. – <https://www.kaercher.com/by/professional/apparaty-vysokogo-davlenija/isolar-ehffektivnaja-ochistka-solnechnykh-batarei-i-povyshenie-ikh-ehnergootdachi.html>.
48. Пат. US № 8323421 F24J 2/40. 4.12.2012.
49. Пат. US № 20090288691 B08B 3/00. 26.11.2009.
50. Пат. US № 9130502 B08B 11/04. 8.09.2015.
51. Пат. US № 8984704 B08B 1/00. 24.03.2015.
52. Пат. US № 20120285516, B08B 6/00. 15.11.2012.
53. Startup of the Week: NOMADD offers revolutionary solutions for the Saudi Arabia’s clean energy sector. – <https://www.arabnews.com/node/1569001/saudi-arabia>
54. ECOPPIA’S E4 ROBOTIC CLEANING SOLUTION. – [https://www.ecoppia.com/warehouse/temp/ecoppia/E4\\_Product\\_Overview.pdf](https://www.ecoppia.com/warehouse/temp/ecoppia/E4_Product_Overview.pdf)
55. Патент US №2004055632, A1 МПК A47L13/40; F24J2/46; H01L31/00; H01L31/0216; H01L31/042; H01L31/048. 25.03.2004
56. Шестакова В.В. (Юзикова В.В.) Изучение концепции эффекта отдачи на внедрение новых технологий по сокращению использования энергии / В.В. Шестакова (Юзикова В.В.), А.Л. Шестакова // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность: сб. науч. тр. – Севастополь: Изд-во СевГУ, 2018. – 1291-1295 с.
57. Горбатенко, Ю.А. Аэрозоли и их основные физико-химические свойства // Ю.А. Горбатенко. – Екатеринбург: Редакционно-издательский отдел УГЛТУ. – 2014. – 36 с.
58. McTainsh, G.H., Nickling, W.G., Lynch, A.W. Dust deposition and particle size in Mali, West Africa / CATENA. Vol. 29. Is. 3–4. May 1997. P. 307-322. – [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(96\)00075-6](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(96)00075-6)
59. Кирпичникова И.М. Махсумов И.Б. Сологубов А.Ю., Шестакова В.В. (Юзикова В.В.) Особенности эксплуатации солнечных энергоустановок в различных климатических условиях // 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.

60. Mike H. Bergin, Chinmay Ghoroi, Deepa Dixit, James J. Schauer, and Drew T. Shindell. Large Reductions in Solar Energy Production Due to Dust and Particulate Air Pollution / Environ. Sci. Technol. Lett. 2017. P. 339–344. – <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00197>

61. Юлкин, Ф. Неисчерпаемый ресурс: обзор существующих направлений развития солнечной и ветровой генерации в России / Ф. Юлкин, В. Есиева, В. Берлин // Экология и право. – 2019. – № 74. – 6-9 с.

62. Santarius, T. Green growth unraveled. How rebound effects baffle sustainability targets when the economy keeps growing / T. Santarius. – Heinrich Böll Stiftung and Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, Berlin, 2012.

63. Журавлев, В.К. Электрофизические способы очистки отходящих газов / Журавлев В.К. – Алма-Ата: Казахстан. 1985 – 72 с.

64. Электрические свойства пыли. – <http://www.stroitelstvo-new.ru/gigiena-truda/elektricheskie-svoystva-pyli.shtml>

65. Чекалов Л.В., Санаев Ю.И. Свойства промышленных пылей и эффективность электрофильтров// Семибратово: Изд-во «Кондор-Эко» 2018, 45 с.

66. Влияние тени на работу солнечных батарей. – <https://solarsoul.net/vliyanie-teni-na-rabotu-solnechnyx-batarej>

67. Верещагин, И.П. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. / И.П. Верещагин, В.И. Левитов, Г.З. Мирзабекян, М.М. Пашин. – М.: Энергия, 1974. – 480 с.

68. Грин, Х. Аэрозоли- пыли, дымы и туманы / Х. Грин, В. Лейн; пер. с англ. Л. Химия. – 1972. – 428 с.

69. Зимон, А.Д. Адгезия пыли и порошков. / А.Д. Зимон. – М.:Химия, 1976. – 432 с.

70. 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.

71. Арутюнян, В.В. Зарядка и разрядка сферических частиц, движущихся в неоднородном электрическом поле: автореферат канд. техн. наук / В.В. Арутюнян. – Ереван, 1984. – 24 с.
72. Comprehensive Research Plan for Developing PM 2,5 Emission Inventories. – <http://www.epa.gov/ttnchie1/conference/ei10/pm/gaffney.pdf>
73. Калаева, С.З. Влияние мелкодисперсной пыли на биосферу и человека // С.З. Калаева, К.М. Муратова, Я.В. Чистяков, П.В. Чеботарев. – Известия ТулГУ. Науки о Земле. Вып. 3. – 2016. – 40-57 с.
74. Характеристики пыли. – <https://sovplym.ru/blogs/8785/>
75. Половинкин, А.И. Основы инженерного творчества. / А.И. Половинкин. – М.: Машиностроение. – 1988 г.
76. Влияние тени на работу солнечных батарей. – <https://solarsoul.net/vliyanie-teni-na-rabotu-solnechnyx-batarej>
77. Кирпичникова И.М., Шестакова В.В. (Юзикова В.В.) Повышение эффективности улавливания частиц устройством защиты солнечных модулей от пылевых загрязнений // 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.
78. Бекиров, Э.А. Численная модель динамики потока солнечного излучения и ее сравнение с экспериментом / Э.А. Бекиров, Д.В. Каркач // Возобновляемая энергетика: пути повышения энергетической и экономической эффективности: сб. науч.тр. – Крым, г. Ялта. – 2015. – 28-34 с.
79. Шестакова В.В. (Юзикова 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.
80. Солнечная панель модели bps 32-100 бренда JINGYANGPV. – <https://aliexpress.ru/store/4433198?spm=a2g2w.detail.100005.1.28a565a1r22zC6&ga=2.190830251.1872709940.1652500190-1697940568.1652500190>

81. Kirpichnikova I.M., Akimov A.V., Shestakova V.V. (Yuzikova V.V.) Development of effective device for protection solar modules from contamination // 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. DOI: 10.1109/URALCON.2018.8544297 (Scopus).
82. Кирпичникова И.М., Шестакова В.В. (Юзикова В.В.) Конструктивные и режимные параметры устройства для защиты солнечных модулей от пылевых частиц // 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.
83. Богородицкий, Н.П. Теория диэлектриков / Н.П. Богородицкий. – М-Л.: Энергия. – 1965 г. – 347 с.
84. Кирпичникова И.М., Шестакова В.В. (Юзикова В.В.) Расчет эффективности работы устройства защиты солнечных модулей от пылевых загрязнений// Наука ЮУрГУ. Секции технических наук. Материалы 72-й научной конференции. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Южно-Уральский государственный университет. 2020, с. 383-391.
85. Кирпичникова И.М., Масхумов И.Б., Шестакова В.В. (Юзикова В.В.) Снижение генерации электрической энергии солнечными модулями в условиях запыленности местности // iPolytech Journal. – 2023. – Т.27, №1. – С. 83-93; 0,63 п.л. / 0,31 п.л.
86. 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. Том 53. № 6. – 2010. – С. 454–459.
87. Кирпичникова, И.М. Энергосберегающие системы электроочистки воздуха в с.-х. помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха: автореферат / И.М. Кирпичникова. – Челябинск, 2001. – 38 с.
88. Kirpichnikova I.M., Shestakova V.V. (Yuzikova V.V.) Energy-efficient lighting with the help of mechanical power accumulation // 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.

89. Кирпичникова, И.М. Источник высокого напряжения для аппаратов электронно-ионной технологии / Кирпичникова И.М., Мельников А.В., Плеханова Ю.М., Гамов Е.О. Патент на полезную модель RU 68364 U1, 27.11.2007. Заявка № 2007125344/22 от 04.07.2007.

90. Kirpichnikova I.M., Shestakova V.V. (Yuzikova V.V.) Problems of using solar photovoltaic panels and ways of increase their efficiency // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2020). – Sochi, Russia: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (IEEE), 2020, № 9112044. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112044 (Scopus).

91. Правила устройства электроустановок. Главтехуправление, Госэнергонадзор Минэнерго СССР 05.10.1979, Минтопэнерго России 06.10. 1999, Приказ Минэнерго России от 08.07.02 № 204, Приказ Минэнерго России от 20.05.2003 № 187.

92. Загрязнение (солнечная энергия). Soiling (solar energy). – [https://ru.abcdef.wiki/wiki/Soiling\\_\(solar\\_energy\)](https://ru.abcdef.wiki/wiki/Soiling_(solar_energy)).

93. Sreedath Panat and Kripa K. Varanasi. Electrostatic dust removal using adsorbed moisture–assisted charge induction for sustainable operation of solar panels // SCIENCE ADVANCES. Vol 8. Is. 10. DOI: 10.1126/sciadv.abm0078.

94. Заварухин В.А., Кирпичникова И.М., Шестакова В.В. (Юзикова В.В.) Устройство для предотвращения загрязнения и деградации солнечных модулей. Пат. 218045 РФ. 2023.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

Исследование влияния ориентации солнечного модуля на уровень его запыленности (солнечный модуль №1)

	Дата	Время	I, А	U, В	P, Вт	Температура, °С	Влажность	Солнечный день	Погодные условия	
ориентация 10°	19.апр	16:30	2,14	19,44	41,6016	2	32%	05:41-20:07	Ясно	
	20.апр	15:00	2,08	18,54	38,5632	7	38%	05:36-20:09	Ясно	
	21.апр	14:10	2,1	18,11	38,031	12	32%	05:34-20:11	Ясно	
	22.апр	15:50	2,38	19,64	46,7432	12	25%	05:32-20:13	Облачно	
	23.апр	15:00	2,4	18,76	45,024	11	45%	05:30-20:15	Дождь	
	24.апр	14:00	2,29	18,65	42,7085	12	27%	05:28-20:17	Облачно	
	25.апр	14:00	2,27	18,72	42,4944	15	28%	05:26-20:19	Облачно	
	26.апр	13:30	2,28	19,2	43,776	14	17%	05:24-20:21	Облачно	
	27.апр	14:00	2,25	18,82	42,345	14	18%	05:22-20:23	Облачно	
	28.апр	13:40	2,24	18,68	41,8432	13	28%	05:20-20:25	Облачно	
	29.апр	14:00	2,25	18,7	42,075	10	36%	05:18-20:27	Облачно	
	30.апр	15:00	2,25	18,75	42,1875	9	36%	05:16-20:29	Дождь	
01.май	-	-	-	-	-	17	28%	05:14-20:31	Облачно	
02.май	-	-	-	-	-	15	57%	05:12-20:33	Дождь	
ориентация 30°	03.май	14:30	2,13	18,21	38,7873	17	49%	05:10-20:35	Облачно	
	04.май	14:00	2,12	18,15	38,478	22	27%	05:08-20:36	Ясно	
	05.май	14:00	2,12	18,13	38,4356	25	16%	05:06-20:38	Ясно	
	06.май	14:00	2,13	18,17	38,7021	14	29%	05:04-20:40	Облачно	
	07.май	13:00	2,14	18,18	38,9052	17	26%	05:02-20:42	Ясно	
	08.май	-	-	-	-	-	18	21%	05:00-20:43	Ясно
	09.май	-	-	-	-	-	22	18%	04:58-20:45	Ясно
	10.май	15:00	2,17	18,3	39,711	22	22%	04:56-20:47	Ясно	
	11.май	15:30	2,16	18,36	39,6576	20	17%	04:54-20:49	Ясно	
	12.май	15:00	2,16	18,34	39,6144	26	22%	04:52-20:51	Ясно	
	13.май	14:30	1,98	17,07	33,7986	27	25%	04:50-20:53	Ясно	
	14.май	14:00	2,02	17,44	35,2288	29	10%	04:48-20:55	Ясно	
	15.май	-	-	-	-	-	32	13%	04:46-20:57	Ясно
	16.май	-	-	-	-	-	32	13%	04:45-20:58	Ясно
	ориентация 55°	17.май	13:00	2,15	18,25	39,2375	32	19%	04:43-21:00	Ясно
		18.май	13:30	1,99	17,17	34,1683	29	19%	04:41-21:02	Ясно
19.май		16:00	2,14	18,36	39,2904	19	39%	04:39-21:04	Облачно	
20.май		14:30	1,98	17,69	35,0262	22	32%	04:38-21:06	Ясно	
21.май		15:00	2,02	17,87	36,0974	27	16%	04:36-21:07	Ясно	
22.май		15:00	2,05	17,98	36,859	28	21%	04:34-21:08	Ясно	
23.май		15:30	2,04	18,01	36,7404	30	25%	04:32-21:09	Ясно	
24.май		15:30	2,03	17,82	36,1746	29	12%	04:30-21:11	Ясно	
25.май		15:00	2,02	17,7	35,754	35	11%	04:29-21:13	Ясно	
26.май		14:30	2,04	17,84	36,3936	22	30%	04:27-21:15	Ясно	
27.май		14:00	2,07	18,1	37,467	20	32%	04:25-21:16	Облачно	
28.май		15:00	2	18	36	26	22%	04:24-21:17	Ясно	
29.май		-	-	-	-	-	27	20%	04:23-21:19	Ясно
30.май		-	-	-	-	-	29	22%	04:22-21:21	Ясно
ориентация 0°	31.май	15:30	2,16	18,61	40,1976	16	72%	04:21-21:22	Дождь	
	01.июнь	16:00	2,18	18,65	40,657	15	40%	04:21-21:24	Облачно	
	02.июнь	16:00	2,1	17,98	37,758	16	70%	04:20-21:25	Дождь	
	03.июнь	16:00	2,14	18,22	38,9908	14	83%	04:20-21:26	Облачно	
	04.июнь	15:30	2,12	18,09	38,3508	17	28%	04:19-21:27	Ясно	
	05.июнь	15:30	2,16	18,45	39,852	20	24%	04:19-21:28	Ясно	
	06.июнь	15:00	2,14	18,34	39,2476	23	26%	04:18-21:30	Ясно	
	07.июнь	16:00	2,07	18	37,26	28	18%	04:17-21:31	Ясно	
	08.июнь	14:30	2,09	18,43	38,5187	16	50%	04:16-21:32	Облачно	
	09.июнь	16:00	2,15	18,42	39,603	20	39%	04:15-21:32	Ясно	
	10.июнь	15:00	2,2	18,59	40,898	17	44%	04:14-21:33	Дождь	
	11.июнь	14:30	2,1	17,95	37,695	21	34%	04:14-21:33	Ясно	
	12.июнь	-	-	-	-	-	24	19%	04:15-21:35	Ясно
	13.июнь	-	-	-	-	-	27	15%	04:15-21:35	Ясно
	14.июнь	15:00	2,2	18,01	39,622	30	14%	04:15-21:36	Ясно	
	15.июнь	15:30	2,07	17,98	37,2186	30	24%	04:14-21:37	Ясно	
	16.июнь	15:30	1,89	17,62	33,3018	31	24%	04:14-21:38	Ясно	
	17.июнь	15:00	2,09	17,94	37,4946	31	23%	04:14-21:38	Облачно	
	18.июнь	15:30	2,21	18,96	41,9016	19	31%	04:14-21:38	Облачно	
	19.июнь	-	-	-	-	-	17	40%	04:14-21:39	Дождь
	20.июнь	-	-	-	-	-	25	14%	04:14-21:39	Ясно
	21.июнь	15:30	2,06	17,88	36,8328	22	26%	04:14-21:39	Ясно	
	22.июнь	15:00	2,03	17,68	35,8904	27	36%	04:15-21:39	Ясно	
	23.июнь	15:30	2,19	18,68	40,9092	18	63%	04:15-21:39	Дождь	
	24.июнь	15:30	2,1	18,08	37,968	23	29%	04:15-21:40	Облачно	
	25.июнь	15:30	2,2	18,34	40,348	24	65%	04:16-21:40	Дождь	
	26.июнь	-	-	-	-	-	28	46%	04:16-21:39	Облачно
	27.июнь	-	-	-	-	-	25	62%	04:17-21:39	Дождь
	28.июнь	16:00	2,03	17,73	35,9919	28	38%	04:18-21:39	Ясно	
29.июнь	16:30	2	17,36	34,72	31	33%	04:19-21:39	Ясно		

Исследование влияния ориентации солнечного модуля на уровень его  
запыленности (солнечный модуль №2)

	Дата	Время	I, А	U, В	P, Вт	Температура, °С	Влажность	Солнечный день	Погодные условия	
ориентация 10°	19.апр	16:30	2,19	19,3	42,267	2	32%	05:41-20:07	Ясно	
	20.апр	15:00	2,09	18,52	38,7068	7	38%	05:36-20:11	Ясно	
	21.апр	14:10	2,11	18,27	38,5497	12	32%	05:34-20:11	Ясно	
	22.апр	15:50	2,34	19,73	46,1682	12	25%	05:32-20:13	Облачно	
	23.апр	15:00	2,41	18,56	44,7296	11	45%	05:30-20:15	Дождь	
	24.апр	14:00	2,26	18,67	42,1942	12	27%	05:28-20:17	Облачно	
	25.апр	14:00	2,24	18,68	41,8432	15	28%	05:26-20:19	Облачно	
	26.апр	13:30	2,31	19,4	44,814	14	17%	05:24-20:21	Облачно	
	27.апр	14:00	2,24	18,79	42,0896	14	18%	05:22-20:23	Облачно	
	28.апр	13:40	2,24	18,74	41,9776	13	28%	05:20-20:25	Облачно	
	29.апр	14:00	2,27	19,12	43,4024	10	36%	05:18-20:27	Облачно	
	30.апр	15:00	2,24	18,72	41,9328	9	36%	05:16-20:29	Дождь	
	01.май	-	-	-	-	-	17	28%	05:14-20:31	Облачно
02.май	-	-	-	-	-	15	57%	05:12-20:33	Дождь	
ориентация 30°	03.май	14:30	2,11	18,16	38,3176	17	49%	05:10-20:35	Облачно	
	04.май	14:00	2,12	18,2	38,584	22	27%	05:08-20:36	Ясно	
	05.май	14:00	2,12	18,22	38,6264	25	16%	05:06-20:38	Ясно	
	06.май	14:00	2,13	18,22	38,8086	14	29%	05:04-20:40	Облачно	
	07.май	13:00	2,15	18,21	39,1515	17	26%	05:02-20:42	Ясно	
	08.май	-	-	-	-	-	18	21%	05:00-20:43	Ясно
	09.май	-	-	-	-	-	22	18%	04:58-20:45	Ясно
	10.май	15:00	2,16	18,35	39,636	22	22%	04:56-20:47	Ясно	
	11.май	15:30	2,15	18,37	39,4955	20	17%	04:54-20:49	Ясно	
	12.май	15:00	2,14	18,36	39,2904	26	22%	04:52-20:51	Ясно	
	13.май	14:30	1,99	17,19	34,2081	27	25%	04:50-20:53	Ясно	
	14.май	14:00	2,03	17,59	35,7077	29	10%	04:48-20:55	Ясно	
	15.май	-	-	-	-	-	32	13%	04:46-20:57	Ясно
	16.май	-	-	-	-	-	32	13%	04:45-20:58	Ясно
	ориентация 55°	17.май	13:00	2,13	18,21	38,7873	32	19%	04:43-21:00	Ясно
18.май		13:30	1,99	17,24	34,3076	29	19%	04:41-21:02	Ясно	
19.май		16:00	2,13	18,28	38,9364	19	39%	04:39-21:04	Облачно	
20.май		14:30	1,98	17,69	35,0262	22	32%	04:38-21:06	Ясно	
21.май		15:00	2,01	18,01	36,2001	27	16%	04:36-21:07	Ясно	
22.май		15:00	2,04	18,34	37,4136	28	21%	04:34-21:08	Ясно	
23.май		15:30	2,01	18,12	36,4212	30	25%	04:32-21:09	Ясно	
24.май		15:30	2,05	17,91	36,7155	29	12%	04:30-21:11	Ясно	
25.май		15:00	2,03	17,77	36,0731	35	11%	04:29-21:13	Ясно	
26.май		14:30	2,05	17,89	36,6745	22	30%	04:27-21:15	Ясно	
27.май		14:00	2,07	18,01	37,2807	20	32%	04:25-21:16	Облачно	
28.май		15:00	2	18,07	36,14	26	22%	04:24-21:17	Ясно	
29.май		-	-	-	-	-	27	20%	04:23-21:19	Ясно
30.май		-	-	-	-	-	29	22%	04:22-21:21	Ясно
ориентация 0°	31.май	15:30	2,05	17,99	36,8795	16	72%	04:21-21:22	Дождь	
	01.июнь	16:00	2,19	18,66	40,8654	15	40%	04:21-21:24	Облачно	
	02.июнь	16:00	2,1	17,96	37,716	16	70%	04:20-21:25	Дождь	
	03.июнь	16:00	2,15	18,42	39,603	14	83%	04:20-21:26	Облачно	
	04.июнь	15:30	2,09	18,43	38,5187	17	28%	04:19-21:27	Ясно	
	05.июнь	-	-	-	-	-	20	24%	04:19-21:28	Ясно
	06.июнь	-	-	-	-	-	23	26%	04:18-21:30	Ясно
	07.июнь	16:00	2,08	18,11	37,6688	28	18%	04:17-21:31	Ясно	
	08.июнь	14:30	2,14	18,23	39,0122	16	50%	04:17-21:32	Облачно	
	09.июнь	16:00	2,16	18,47	39,8952	20	39%	04:16-21:32	Ясно	
	10.июнь	15:00	2,21	18,68	41,2828	17	44%	04:16-21:33	Дождь	
	11.июнь	14:30	2,1	17,99	37,779	21	34%	04:15-21:34	Ясно	
	12.июнь	-	-	-	-	-	24	19%	04:15-21:35	Ясно
	13.июнь	-	-	-	-	-	27	15%	04:15-21:35	Ясно
	14.июнь	15:00	2,12	18,01	38,1812	30	14%	04:15-21:36	Ясно	
	15.июнь	15:30	2,06	17,96	36,9976	30	24%	04:14-21:37	Ясно	
	16.июнь	15:30	1,9	17,78	33,782	31	24%	04:14-21:38	Ясно	
	17.июнь	15:00	2,1	17,95	37,695	31	23%	04:14-21:38	Облачно	
	18.июнь	15:30	2,22	18,99	42,1578	19	31%	04:14-21:38	Облачно	
	19.июнь	-	-	-	-	-	17	40%	04:14-21:39	Дождь
20.июнь	-	-	-	-	-	25	14%	04:14-21:39	Ясно	
21.июнь	15:30	2,06	17,95	36,977	22	26%	04:14-21:39	Ясно		
22.июнь	15:00	2,03	17,78	36,0934	27	36%	04:15-21:39	Ясно		
23.июнь	15:30	2,22	19,02	42,2244	18	63%	04:15-21:39	Дождь		
24.июнь	15:30	2,11	18,14	38,2754	23	29%	04:15-21:40	Облачно		
25.июнь	15:30	2,12	18,16	38,4992	24	65%	04:16-21:40	Дождь		
26.июнь	-	-	-	-	-	28	46%	04:16-21:39	Облачно	
27.июнь	-	-	-	-	-	25	62%	04:17-21:39	Дождь	
28.июнь	16:00	2,02	17,76	35,8752	28	38%	04:18-21:39	Ясно		
29.июнь	16:30	2,01	17,4	34,974	31	33%	04:19-21:39	Ясно		

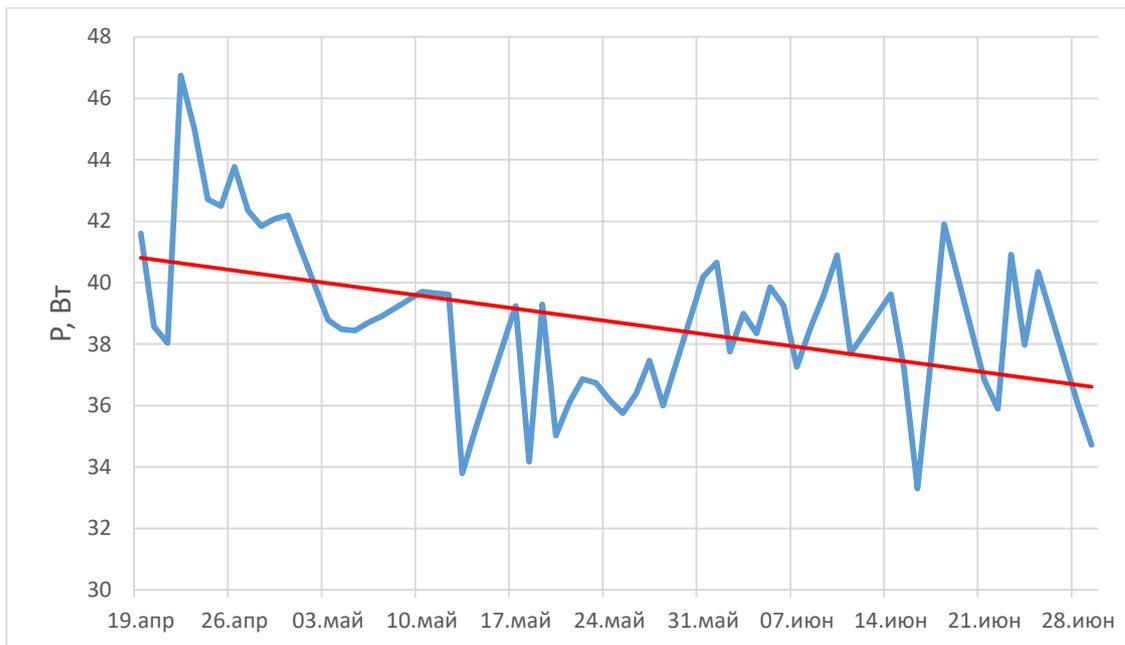


Рисунок П.1 – Снижение генерации электроэнергии (солнечный модуль №1)

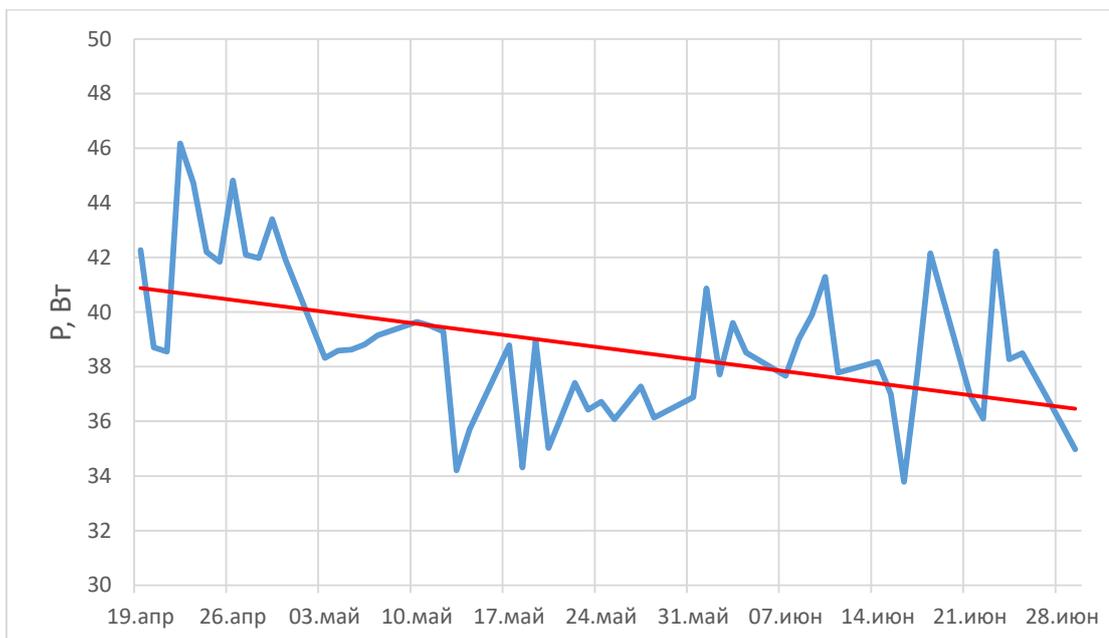


Рисунок П.1 – Снижение генерации электроэнергии (солнечный модуль №2)

Тип: Солнечные панели  
 Производство: Китай  
 Название бренда: JINGYANGPV  
 Номер модели: bps 32-100  
 Количество ячеек: 32  
 Размер: 1050mm\*540mm\*2.5mm/1165mm\*541mm\*30mm  
 Материал: Монокристаллический кремний  
 Номинальная емкость: 100w  
 Максимальная мощность: 105

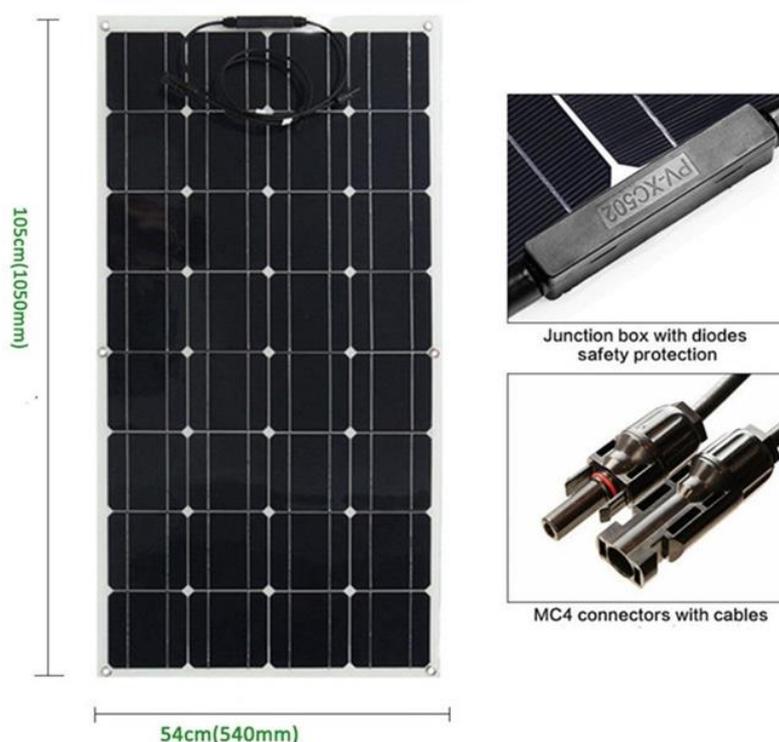


Рисунок П.2 – Внешний вид солнечной панели модели bps 32-100 бренда JINGYANGPV и ее комплектующих частей

Таблица П.2.1

Технические характеристики солнечных панелей

Длина	1050 мм
Ширина	540 мм
Высота	2,5 мм
Вес	1,7 кг
Основной материал	Моно Кристаллический
Материал передней панели	Покрытие из ПЭТ + Эва

Таблица П.2.2

## Электрические характеристики солнечных панелей

Максимальная мощность	$P_{max}$	100 Wp
Напряжение открытого замыкания	ЛОС	20 в
Максимальное напряжение точки питания	$V_{mpp}$	18,02 в
Ток короткого замыкания	$I_{sc}$	5,98 А
Максимальный ток точки питания	$I_{mpp}$	5,55 А
Максимальное напряжение системы SC II		1000 в
Максимальное напряжение системы США NEC		600 в
Максимальный обратный ток		10 А
Увеличение снежной нагрузки асс. К IEC 61215		5,4 кН/msup2

Таблица П.2.3

## Компонентный материал

Ячейки на модуль	32
Тип ячейки	Монокристаллический кремний
Размеры ячеек	125 мм * 125 мм
Передняя часть	Закаленное стекло (EN12150)-стекло; PET + EVA гибкое

Таблица П.2.4

## Дополнительные характеристики

РТС рейтинг	100 Вт
Распределительная коробка	IP65
Соединитель	Мужской и женский
Эффективность модуля	17.0% для стекла; 21% для ПЭТ панели
Плюс-сортировк	$P_{flash\ ge\ P_{max}}$
Допуск мощности	+/- 5%

Таблица П.3.1

## Данные проводимого исследования (панель №1)

Дата	Время	I, А	U, В	P, Вт	Температура, °С	Влажность	Солнечный день	Погодные условия
19.апр	16:30	1,98	17,69	35,0264	2	32%	05:41-20:07	Ясно
20.апр	15:00	1,91	17,17	32,7947	7	38%	05:36-20:09	Ясно
21.апр	14:10	1,93	17,22	33,2346	12	32%	05:34-20:11	Ясно
22.апр	15:50	2,01	17,64	35,4564	12	25%	05:32-20:13	Облачно
23.апр	15:00	2,08	17,51	36,4208	11	45%	05:30-20:15	Дождь
24.апр	14:00	1,94	17,52	33,9888	12	27%	05:28-20:17	Облачно
25.апр	14:00	1,97	17,51	34,4947	15	28%	05:26-20:19	Облачно
26.апр	13:30	1,98	17,2	34,056	14	17%	05:24-20:21	Облачно
27.апр	14:00	1,85	17,12	31,672	14	18%	05:22-20:23	Облачно
28.апр	13:40	1,84	17,08	31,4272	13	28%	05:20-20:25	Облачно
29.апр	14:00	1,85	17,07	31,5795	10	36%	05:18-20:27	Облачно
30.апр	15:00	1,8	17,05	30,69	9	36%	05:16-20:29	Дождь

Таблица П.3.2

## Данные проводимого исследования (панель №2)

Дата	Время	I, А	U, В	P, Вт	Температура, °С	Влажность	Солнечный день	Погодные условия
19.апр	16:30	2,19	19,3	42,267	2	32%	05:41-20:07	Ясно
20.апр	15:00	2,18	19,12	41,6816	7	38%	05:36-20:11	Ясно
21.апр	14:10	2,24	18,74	41,9776	12	32%	05:34-20:11	Ясно
22.апр	15:50	2,27	18,92	42,9484	12	25%	05:32-20:13	Облачно
23.апр	15:00	2,24	18,72	41,9328	11	45%	05:30-20:15	Дождь
24.апр	14:00	2,26	18,67	42,1942	12	27%	05:28-20:17	Облачно
25.апр	14:00	2,24	18,68	41,8432	15	28%	05:26-20:19	Облачно
26.апр	13:30	2,11	18,94	39,9634	14	17%	05:24-20:21	Облачно
27.апр	14:00	2,24	18,79	42,0896	14	18%	05:22-20:23	Облачно
28.апр	13:40	2,11	18,77	39,6047	13	28%	05:20-20:25	Облачно
29.апр	14:00	2,24	18,23	40,8352	10	36%	05:18-20:27	Облачно
30.апр	15:00	2,21	18,26	40,3546	9	36%	05:16-20:29	Дождь

Таблица П.4.1

## Данные проводимого исследования (панель №1)

Дата	Время	I, А	U, В	P, Вт	Температура, °С	Влажность	Солнечный день	Погодные условия
8.мая	15:30	2,1	18,11	38,031	12	22%	04:14-20:41	Облачно
9.мая	15:00	2,09	18,11	37,8499	11	20%	04:12-20:43	Ясно
10.мая	14:30	2,06	18,08	37,2448	13	20%	04:10-20:44	Облачно
11.мая	16:00	2,02	18,16	36,6832	18	25%	04:07-20:46	Ясно
12.мая	14:30	2	17,93	35,86	14	76%	04:05-20:48	Дождь
13.мая	14:00	1,98	18,01	35,6598	8	38%	04:03-20:50	Облачно
14.мая	16:20	1,99	18,07	35,9593	16	49%	04:01-20:52	Ясно
15.мая	14:30	1,95	18,05	35,1975	19	42%	03:59-20:54	Ясно
16.мая	14:30	1,92	18,04	34,6368	22	19%	03:56-20:56	Ясно
17.мая	16:30	1,91	17,92	34,2272	19	17%	03:54-20:57	Ясно
18.мая	16:00	1,92	17,9	34,368	16	23%	03:52-20:59	Облачно
19.мая	15:00	1,87	17,91	33,4917	17	27%	03:50-21:01	Облачно
20.мая	15:00	1,88	17,87	33,5956	22	15%	03:48-21:02	Ясно
21.мая	14:30	1,92	17,55	33,696	24	14%	03:46-21:04	Ясно

Таблица П.4.2

## Данные проводимого исследования (панель №2)

Дата	Время	I, А	U, В	P, Вт	Температура, °С	Влажность	Солнечный день	Погодные условия
8.мая	15:30	2,1	18,09	37,989	12	22%	04:14-20:41	Облачно
9.мая	15:00	2,06	18,15	37,389	11	20%	04:12-20:43	Ясно
10.мая	14:30	2,09	18,12	37,8708	13	20%	04:10-20:44	Облачно
11.мая	16:00	2,05	18,09	37,0845	18	25%	04:07-20:46	Ясно
12.мая	14:30	2,05	18,11	37,1255	14	76%	04:05-20:48	Дождь
13.мая	14:00	2,07	18,09	37,4463	8	38%	04:03-20:50	Облачно
14.мая	16:20	2,09	18,06	37,7454	16	49%	04:01-20:52	Ясно
15.мая	14:30	2,1	18,14	38,094	19	42%	03:59-20:54	Ясно
16.мая	14:30	2,11	18,13	38,2543	22	19%	03:56-20:56	Ясно
17.мая	16:30	2,09	18,17	37,9753	19	17%	03:54-20:57	Ясно
18.мая	16:00	2,05	18,12	37,146	16	23%	03:52-20:59	Облачно
19.мая	15:00	2,05	18,11	37,1255	17	27%	03:50-21:01	Облачно
20.мая	15:00	2,04	18,12	36,9648	22	15%	03:48-21:02	Ясно
21.мая	14:30	2,08	18,07	37,5856	24	14%	03:46-21:04	Ясно

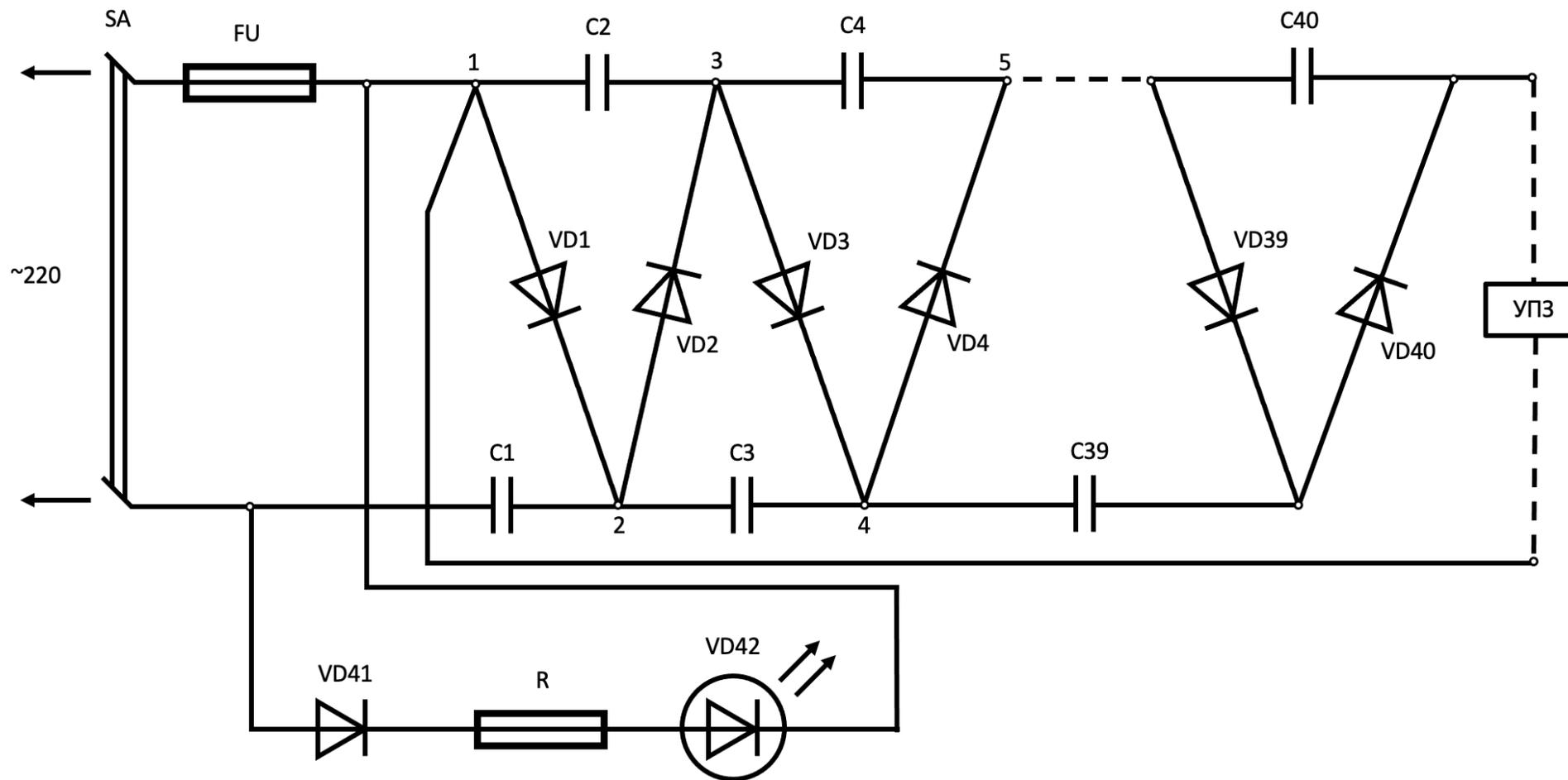


Рисунок П.5 – Принципиальная схема источника высокого напряжения ВПСМ-М

Фотоотчет о проведении эксперимента



Рисунок П.6.1 – Установка УПЗ



Рисунок П.6.2 – Расстояние от УПЗ до СМ

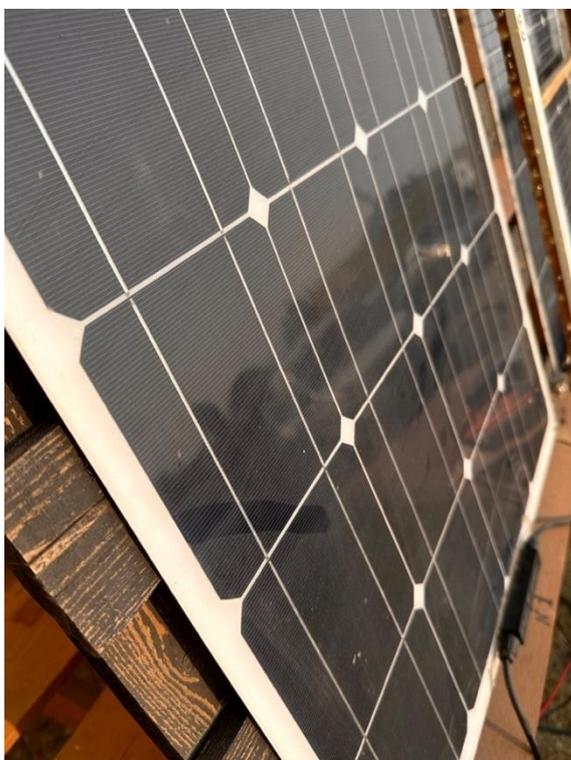


Рисунок П.6.3– Запыление панели №1



Рисунок П.6.4 – Измерение показаний амперметром



Рисунок П.6.5 – Работа УПЗ

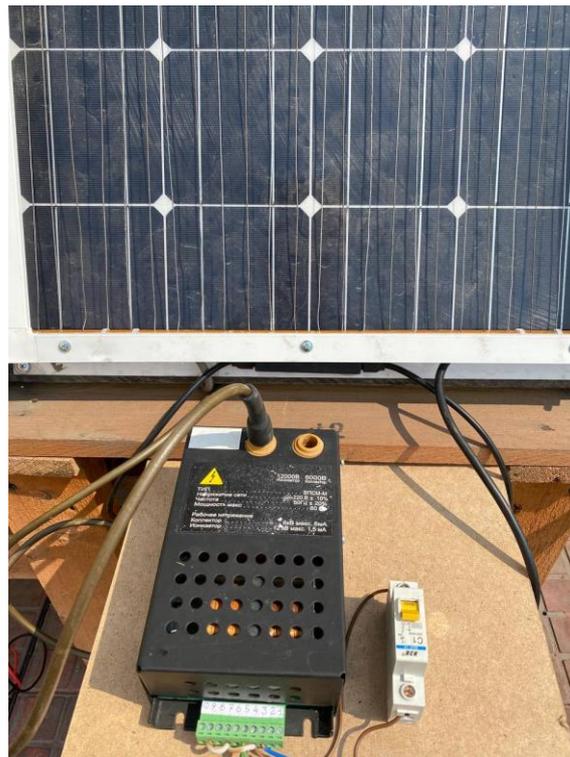


Рисунок П.6.6 – Работа ИВН (дата 20.05.23)



Рисунок П.6.7 – Проведение эксперимента



Рисунок П.6.8 – Запыление панелей

Расчет экономического эффекта от использования устройств предотвращающих загрязнение солнечных модулей на ООО «ДИМАНД», г. Челябинск

Годовая экономическая эффективность УПЗ определяется:

$$\mathcal{E} = \mathcal{Z}_{\text{п}} + \mathcal{D}_{\text{д}}, \quad (1)$$

где  $\mathcal{Z}_{\text{п}}$  – прямые затраты,  $\mathcal{D}_{\text{д}}$  – дополнительный доход.

Прямые затраты определяются из выражения:

$$\mathcal{Z}_{\text{п}} = \mathcal{I}_{\mathcal{E}} + E_{\text{н}} \cdot K, \quad (2)$$

где  $\mathcal{I}_{\mathcal{E}}$  – эксплуатационные издержки,  $E_{\text{н}} = 0,15$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений,  $K$  – капитальные вложения в создание УПЗ, которые составляют 5 600 руб. на одно устройство и складываются из: конструктив (изолированная рамка) – 500 руб., текстолитовые балки – 600 руб., осадительные электроды (железная проволока, 12,5 м) – 250 руб., высоковольтные провода и изоляция – 1 500 руб., эпоксидная смола – 250 руб., источник высокого напряжения – около 2 500 (в зависимости от модели).

Эксплуатационные издержки имеют следующие составляющие:

$$\mathcal{I}_{\mathcal{E}} = \Delta A + \Delta P_{\mathcal{E}} + \Delta T_{\text{р}} + \Delta \mathcal{D}_{\text{з.п.}}, \quad (3)$$

где  $\Delta A$  – добавочные отчисления на амортизацию УПЗ (принимая срок работы устройства не менее 4-х лет),  $\Delta P_{\mathcal{E}}$  – дополнительные затраты на электроэнергию,  $\Delta T_{\text{р}} = 0,3A$  – дополнительные затраты на текущий ремонт устройства,  $A$  – амортизационные отчисления.  $\Delta \mathcal{D}_{\text{з.п.}}$  – заработная плата на обслуживание устройства.

Дополнительные затраты на электроэнергию определяются из соотношения:

$$\Delta P_{\mathcal{E}} = P_1 \cdot T_1 \cdot C_{\mathcal{E}} \cdot n, \quad (4)$$

где  $P_1 = 0,06$  кВт – мощность одного устройства,  $n$  – количество устройств (для 2-х солнечных модулей на предприятии требуется два устройства предотвращения загрязнения),  $T_1 = 35\,000$  ч – число часов работы устройства (не менее 4-х лет),  $C_{\mathcal{E}} = 2,73$  руб./кВт·ч – стоимость потребляемой энергии.

Подставив численные значения  $P_1$ ,  $T_1$ ,  $C_Э$  и  $n$  в уравнение (4), получим:

$$\Delta P_Э = 0,06 \cdot 35\,000 \cdot 2,73 \cdot 2 = 11\,466 \text{ руб.}$$

Учитывая, что для обслуживания устройства защиты модулей не предполагается выделение специального человека и обслуживание будет производиться штатным сотрудником предприятия,  $\Delta D_{з.п} = 0$ .

Подставив численные значения  $K$ ,  $\Delta P_Э$  и  $\Delta T_P$  в (6.3), получим:

$$I_Э = 1\,000 + 11\,466 + 0,3 \cdot 1\,000 = 12\,766 \text{ руб.}$$

Прямые затраты определяются:

$$З_{п} = 12\,766 + 0,15 \cdot 5\,600 \cdot 2 = 14\,446 \text{ руб.}$$

Дополнительный доход определяется сокращением затрат на очистку двух солнечных модулей:

$$D_d = 0,5 \cdot 2 \cdot C_p, \quad (5)$$

где  $C_p$  – стоимость работ по очистке солнечных модулей, руб.

$$C_p = 700 \text{ руб.}$$

$$D_d = 0,5 \cdot 2 \cdot 700 = 700 \text{ руб.}$$

Значение ожидаемого экономического эффекта от внедрения устройств защиты модулей от запыления на предприятии составит:

$$Э = 14\,446 + 700 = 15\,146 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости капитальных вложений рассчитывается по формуле:

$$T = 11\,200 / 15\,146 = 0,74 \text{ года (около 270 дней)}$$

Таким образом, затраты на установку устройств предотвращения загрязнения солнечных модулей окупится меньше чем за год.

Общество с ограниченной ответственностью  
«ДИМАНД»

454045, г. Челябинск, ул. Таганайская, д. 27  
ИНН/КПП 7451208325/745101001  
ОГРН 1047423521254

Расчетный счет 40702810972000075613 в Челябинском отделении №8597, г. Челябинск,  
К/с 30101810700000000602 БИК 047501602  
e-mail: 2620752@mail.ru, тел (факс) 262-12-90, 262-17-62

---

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

**устройства предотвращения загрязнения солнечных модулей**

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационной работы аспиранта Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета) Шестаковой Валерии Вячеславовны на соискание учёной степени кандидата технических наук, выполненной по теме «Обеспечение эффективной работы солнечных модулей с разработкой высоковольтных устройств защиты от загрязнений» в части разработанного устройства по предотвращению загрязнений солнечных модулей, будут использованы предприятием ООО «ДИМАНД», г. Челябинск, при монтаже и эксплуатации фотоэлектрических панелей при использовании их для получения электроэнергии на собственные нужды предприятия.

Директор  
ООО «ДИМАНД»


Шшикин Д.Е.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

**№ 218045**

**Устройство для предотвращения загрязнения и деградации солнечных модулей**

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)" (ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ))" (RU)*

Авторы: *Заварухин Владимир Александрович (RU), Кирпичникова Ирина Михайловна (RU), Шестакова Валерия Вячеславовна (RU)*

Заявка № 2023107268

Приоритет полезной модели 27 марта 2023 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 04 мая 2023 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 27 марта 2033 г.

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*





МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
 ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
 ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
 ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ НАПРАВЛЕНИЕ  
 КАФЕДРА «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ, СЕТИ И СИСТЕМЫ  
 ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ»

11.05.2023 г.

№ 309-30-14-14

г. Челябинск

**АКТ**  
 внедрения НИР в учебный процесс

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательской работы аспиранта кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» Шестаковой Валерии Вячеславовны по теме «Обеспечение эффективной работы солнечных модулей с разработкой высоковольтных устройств защиты от загрязнений» используются кафедрой ЭССиСЭ в учебном процессе в дисциплине «Энергетическое использование гелиоресурсов» на 4 курсе обучения по профилю «Возобновляемые источники энергии» направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Зам. директора политехнического института  
 по энергетическому направлению  
 к.т.н., доцент

А.Е.Бычков

Зав. кафедрой ЭССиСЭ,  
 к.т.н., доцент

А.Н.Горожанкин

Аспирант

В.В.Шестакова





XI МЕЖДУНАРОДНАЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
**«ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА  
ГЛАЗАМИ МОЛОДЕЖИ-2020»**

**СЕРТИФИКАТ**  
ВЫДАН

**Шестаковой Валерии Вячеславовне**

за участие в XI Международной научно-технической конференции  
**«ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА ГЛАЗАМИ МОЛОДЕЖИ-2020»**

**100 ЛЕТ  
ГОЭЛРО**

Сопредседатель Оргкомитета,  
Проректор по научной работе  
Северо-Кавказского федерального университета



**А.А. Лиховид**



**г. Ставрополь, 2020 год**



Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«Астраханский государственный университет»**

**Сертификат**

участника Школы молодого ученого-электроэнергетика:  
**«Экономичность, надежность, безопасность и качество жизни – ключевые проблемы  
проектного подхода к развитию электроэнергетики»**

выдан

**Шестаковой Валерии Вячеславовне**

17-18 сентября 2020 г.  
Астрахань

Проректор по научной работе



**А.В. Федотова**





# СЕРТИФИКАТ

Настоящим удостоверяется, что

*Шестакова*

*Валерия*

принял участие в Международной  
научно-технической конференции  
«Электротехнические комплексы и системы»

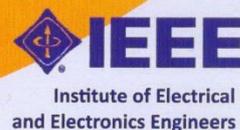
22-24 сентября 2020 г.,

г. Челябинск, Россия

Председатель оргкомитета,  
доктор техн. наук, профессор



А.А. Радионов





SAINT PETERSBURG ELECTROTECHNICAL UNIVERSITY «LETI»  
and  
IEEE RUSSIA NORTH WEST SECTION

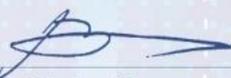
present this

# CERTIFICATE of Participation

to

**Valeria V. Shestakova**

for attending the 2023 Conference of Russian Young  
Researchers in Electrical and Electronic Engineering  
(2023 ElConRus)



Dr. V. Sheludko  
Chair, IEEE Russia NW Section

January 24-27, 2023  
Saint Petersburg, Russia