

На правах рукописи



МЕСТНИКОВ НИКОЛАЙ ПЕТРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ
В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА**

Специальность 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Якутск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», г. Якутск

Научный руководитель: **Васильев Павел Филиппович**, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук, отдел электроэнергетики, ведущий научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего отделом, г. Якутск

Официальные оппоненты:

Лукутин Борис Владимирович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение электроэнергетики и электротехники, профессор, г. Томск

Бубенчиков Антон Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», доцент, г. Омск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ), г. Нижний Новгород

Защита диссертации состоится «22» мая 2024 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан «__» марта 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., доцент



Боруш Олеся Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Электроснабжение потребителей в изолированных энергосистемах Северо-Востока России производится посредством эксплуатации дизель-генераторных, газопоршневых и газотурбинных установок и мини-ТЭЦ, что требует наличия бесперебойного топливоснабжения. Доля электроснабжения традиционных источников энергии на территории Северо-Востока России составляет до 98% от суммарной выработки электроэнергии, где стоимость горюче-смазочных материалов повышается до 250% со сроком доставки до 2,5 лет в условиях короткого периода речной навигации в устьях рек Лена, Оленек, Яна, Индигирка и Колыма, который составляет не более двух месяцев в год. На фоне высокой стоимости горюче-смазочных материалов удельная стоимость выработки электроэнергии составляет от 40 рублей и более за 1 кВт·ч. Из-за высокой степени изношенности основного фонда генерирующих и сетевых элементов, функционирующих на указанных территориях, автономных энергосистем возникает большое количество отказов отдельных элементов системы, по причине которого возрастает время ремонтно-восстановительных и профилактических работ.

Внедрение солнечных электростанций (солнечные ЭС) в автономные энергосистемы Севера позволит увеличить надежность объектов генерации, уменьшить потребление горюче-смазочных материалов и объемы выбросов вредных веществ в окружающую среду.

Эксплуатация солнечных ЭС имеет некоторую сложность по причине негативного влияния внешней среды Севера на их рабочие характеристики и режимы работы. Под внешней средой подразумеваются следующие факторы: ограниченная продолжительность солнечного сияния в осенне-зимний период; поверхностное загрязнение, вызванное образованием слоя мелкодисперсных фракций пыли или снегового покрова с образованием наледи на поверхности фотоэлектрических панелей при больших суточных разностях температуры воздуха; облачность; задымление среды, вызванное сезонными лесными пожарами.

В связи с этим задачи по проведению исследований и идентификации режимов работы солнечных ЭС в климатических условиях Севера, разработка на их основе новых способов защиты фотоэлектрических панелей (ФЭП), направленных на уменьшение негативного влияния вышеуказанных факторов, а также разработка методики расчета рабочих параметров, учитывающей внешние факторы и климат северных территорий, как дополнение к существующим методикам, имеют высокую актуальность и востребованность.

Степень разработанности темы исследования. Проблема снижения энергоэффективности солнечных электростанций создает значительные сложности в развитии автономных энергосистем Севера. Анализ научных исследований отечественных и зарубежных ученых в области гелиоэнергетики Ж.И. Алферова, Б.В. Лукутина, В.З. Манусова, С.В.

Митрофанова, А.В. Винникова, О.А. Суржикова, Е.Б. Шандарова, О.С. Попеля, Г.Г. Райкунова, В.В. Мельникова, Г.П. Охоткина, Д.С. Стребкова, С.К. Позняка, М.Ж. Сулейманова, Ю.Г. Коломиец, Р.Ж. Ерсайн (Казахстан), Р. Махалакшми (Индия), С. Семе (Словения), М. Вахид (Малайзия), С. Хоссейни (США), Ш. Аднан (Пакистан), Ш. Хайдер (Пакистан) и др. определил, что увеличение энергоэффективности солнечных электростанций имеет значительную роль в развитии комбинированных систем электроснабжения. Рассматриваемая проблема достаточно многогранна, и задачи повышения энергоэффективности солнечных электростанций в условиях Севера являются в настоящее время актуальными, но в достаточной степени нерешенными. Существующие способы повышения энергоэффективности объектов солнечной энергетики имеют высокую стоимость и сложные технологические циклы функционирования.

Объект исследования – солнечные электростанции в составе автономных энергосистем на территории Северо-Востока России.

Предмет исследования – процессы воздействия внешних факторов Севера на показатели режимов работы, надежности энергосистемы и технико-экономической эффективности солнечных электростанций в составе автономных энергосистем. Способы повышения энергоэффективности солнечных электростанций.

Цель диссертации – повышение энергоэффективности и точности результатов оценки технико-экономических параметров функционирования солнечных электростанций в условиях Северо-Востока России, как элемента автономных энергосистем.

Задачи для достижения цели диссертационной работы:

1. Провести анализ современного состояния развития технологии выработки электрической энергии от солнечных электростанций, функционирующих в составе автономных энергосистем, в условиях холодного климата и идентифицировать показатели влияния внешних факторов на режимы работы солнечных электростанций.

2. Обосновать и разработать методику расчета рабочих параметров солнечных электростанций, учитывающую внешние факторы и повышающую достоверность результатов с фактическими показателями функционирующих объектов, как дополнение к существующим методикам.

3. Разработать способы повышения энергоэффективности солнечных электростанций как элемента автономных энергосистем, направленных на уменьшение негативного влияния внешних факторов Севера.

4. Провести оценку показателей надежности автономной энергосистемы, имеющей в составе солнечную электростанцию с применением разработанных способов.

5. Выполнить технико-экономическую и экологическую оценки применения разработанных способов повышения энергоэффективности в

солнечной электростанции, функционирующей в автономной энергосистеме Севера.

Методы исследований. В процессе выполнения исследований применялись: научно-техническое обобщение литературных источников по исходным предпосылкам исследований; методы теоретических основ электротехники; методы математической статистики; методы обработки экспериментальных данных натурных исследований; метод аналитических исследований. Натурные исследования выполнялись комплексным методом с применением солнечной ЭС, двухосевой трекерной установки с ФЭП, мобильной климатической станции, электронного микроскопа, программного обеспечения, климатической камеры и вспомогательных, измерительных и регистрирующих оборудования.

Таким образом, изучение особенностей функционирования солнечных ЭС на территории Севера с учетом разработки новых способов повышения их энергоэффективности и надежности функционирования имеет высокую актуальность для выполнения фундаментально-прикладных исследований.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Предложены дополняющие коэффициенты к существующей методике оценки энергетического потенциала солнечных электростанций, увеличивающие точность расчета годовой выработки электроэнергии.

2. Предложена математическая модель оценки энергетического потенциала солнечных электростанций, учитывающая внешние факторы Северо-Востока России.

3. Предложена реализация способа защиты фотоэлектрических панелей солнечных электростанций от поверхностного загрязнения на основе воскового жидкого покрытия, способствующего уменьшению периодичности очистки панелей.

4. Впервые предложен новый способ дугообразного размещения фотоэлектрических панелей солнечных электростанций, учитывающий траекторию движения Солнца, и позволяющий увеличить выработку электрической энергии.

Положения, выносимые на защиту:

1. Дополняющие коэффициенты к существующей методике оценки энергетического потенциала солнечных электростанций, увеличивающие точность расчета годовой выработки электроэнергии.

2. Математическая модель оценки энергетического потенциала и расчета технико-экономических показателей солнечной электростанции, учитывающая внешние факторы Севера.

3. Предложенный способ защиты фотоэлектрических панелей солнечных электростанций, способствующий замедлению интенсивности образования поверхностного загрязнения на панелях.

4. Предложенный способ дугообразного размещения фотоэлектрических панелей солнечных электростанций, увеличивающий выработку электрической энергии на 10...15%.

Степень достоверности результатов проведенных исследований. Достоверность полученных результатов обеспечена: выполнением натуральных исследований, учитывающих ключевые требования теории планирования экспериментальных исследований и климатические условия; получением патента на изобретение [12], свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ [13–14]; применением математической модели, имеющей свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [14]; подтверждением принятых условий совпадения результатов имитационных расчетов с показателями функционирования существующих солнечных ЭС Севера в пределах $\pm 4...5\%$.

Выполнена оценка технико-экономических параметров и вычислены показатели надежности солнечной электростанции в составе автономной энергосистемы на территории Севера.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты могут быть применены в гелиоэнергетике на территории Севера и разработке способов повышения энергоэффективности и надежности солнечных электростанций.

Практическая значимость работы заключается во внедрении на отраслевом уровне научных положений и рекомендаций диссертации, обеспечивающих качественное функционирование солнечных ЭС в составе автономных энергосистем в удаленных и труднодоступных территориях Севера.

Реализация работы определяется следующими результатами:

1. Разработаны способы повышения энергоэффективности, методика расчета рабочих параметров и математическая модель оценки энергетического потенциала и технико-экономических показателей функционирования солнечных электростанций, учитывающих внешние факторы Севера.

2. Материалы диссертационной работы отражены в отчете НИР в рамках выполнения государственного задания по проекту FWRS-2021-0013 «Исследования путей повышения эксплуатационной надежности и эффективности интеллектуальных электроэнергетических систем в условиях Севера и Арктики» №121032200059-7 по приоритетному направлению ПФНИ в РФ 2.5.1 Энергетика и рациональное природопользование.

3. Получены акты внедрения в производственный процесс Министерства жилищно-коммунального хозяйства и энергетики Республики Саха (Якутия), ГАУ РС(Я) «Центр развития ЖКХ и повышения энергоэффективности» и ООО «ЯкутскЭкоСети».

4. Материалы диссертационной работы применены в учебной дисциплине «Общая энергетика» СВФУ и выполнении хозяйственной работы по разработке технико-экономического обоснования строительства солнечной

ЭС в Нерюнгринском ГОК и стратегии развития ООО «ЯкутскЭкоСети» с видением до 2032 г.

Личный вклад автора заключается в самостоятельном проведении теоретического анализа, натуральных исследований, обработке и оценке полученных данных, в разработке способов повышения энергоэффективности солнечных электростанций и методики оценки энергетического потенциала объектов гелиоэнергетики.

Все результаты, представленные в диссертации, получены автором самостоятельно или при непосредственном участии, доля которой составляет не менее 60%. Представление изложенных в диссертации и выносимых на защиту результатов, полученных в совместных исследованиях, согласовано с соавторами.

Апробация работы. Диссертационная работа обсуждалась на следующих конференциях: Евразийский Симпозиум по проблемам прочности и ресурса в условиях низких климатических температур «EURASTRENCOLD», г. Якутск, сентябрь 2020–2023 гг.; Всероссийский конкурс Фонда содействия инновациям «Студенческий Стартап (3-я очередь)», г. Москва, май 2023 г.; International Russian Automation Conference (RusAutoCon), г. Сочи, сентябрь 2021–2023 гг.; International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), г. Магнитогорск, сентябрь 2021–2022 гг.; International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), г. Сочи, июнь 2020–2022 гг.; Всероссийский конкурс Фонда содействия инновациям «У.М.Н.И.К.», г. Якутск, декабрь 2020 г.; Всероссийский молодежный конкурс «Россия. Экология. Энергосбережение», г. Москва, февраль 2019 г.

Публикации по диссертации. По материалам исследования и полученным результатам опубликовано 22 работы, в том числе: 8 работ в рецензируемых журналах из перечня рекомендованных ВАК РФ; 3 работы в журналах, индексируемых в международной базе данных Scopus; 2 монографии, индексируемые в базе данных РИНЦ; 1 патент на изобретение [12]; 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ [13–14]; 6 работ в материалах всероссийских и международных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 225 наименований и трех приложений на 16 страницах. Материал диссертации изложен на 226 страницах машинописного текста и включает 117 рисунков и 32 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования; сформулированы цели и научные задачи исследования; приведены основные научные результаты, выносимые на защиту; показана научная новизна исследований и оценена их практическая значимость; отражены уровень

апробации и личный вклад соискателя в решении научных задач; представлены структура и объем диссертационной работы, а также количество публикаций.

В первой главе представлен анализ ключевых методов, способов, принципов функционирования видов солнечных ЭС в условиях холодного климата, определен перечень внешних факторов, влияющих на электроэнергетические параметры ФЭП, и рассмотрены существующие способы повышения энергоэффективности солнечных ЭС.

Ключевым регионом по развитию гелиоэнергетики на Северо-Востоке России является Республика Саха (Якутия). В данном регионе функционируют 27 солнечных ЭС с суммарной установленной мощностью более 3 МВт. Главной задачей применения солнечных ЭС в Якутии является обеспечение экономии дорогостоящего дизельного топлива. В 2022 г. в данном регионе объем годовой экономии дизельного топлива составила около 500 тонн.

Солнечные ЭС (Рисунок 1) по виду функционирования подразделяются на автономные, сетевые и гибридные. В автономных энергосистемах (автономные ЭЭС) Севера рекомендуется применение следующих видов солнечных ЭС: сетевые солнечные ЭС по причине относительно малой капитальной стоимости и простоты в обслуживании; гибридные солнечные ЭС по причине наличия системы накопления энергии (СНЭ) и возможностью дополнительного питания от сети.

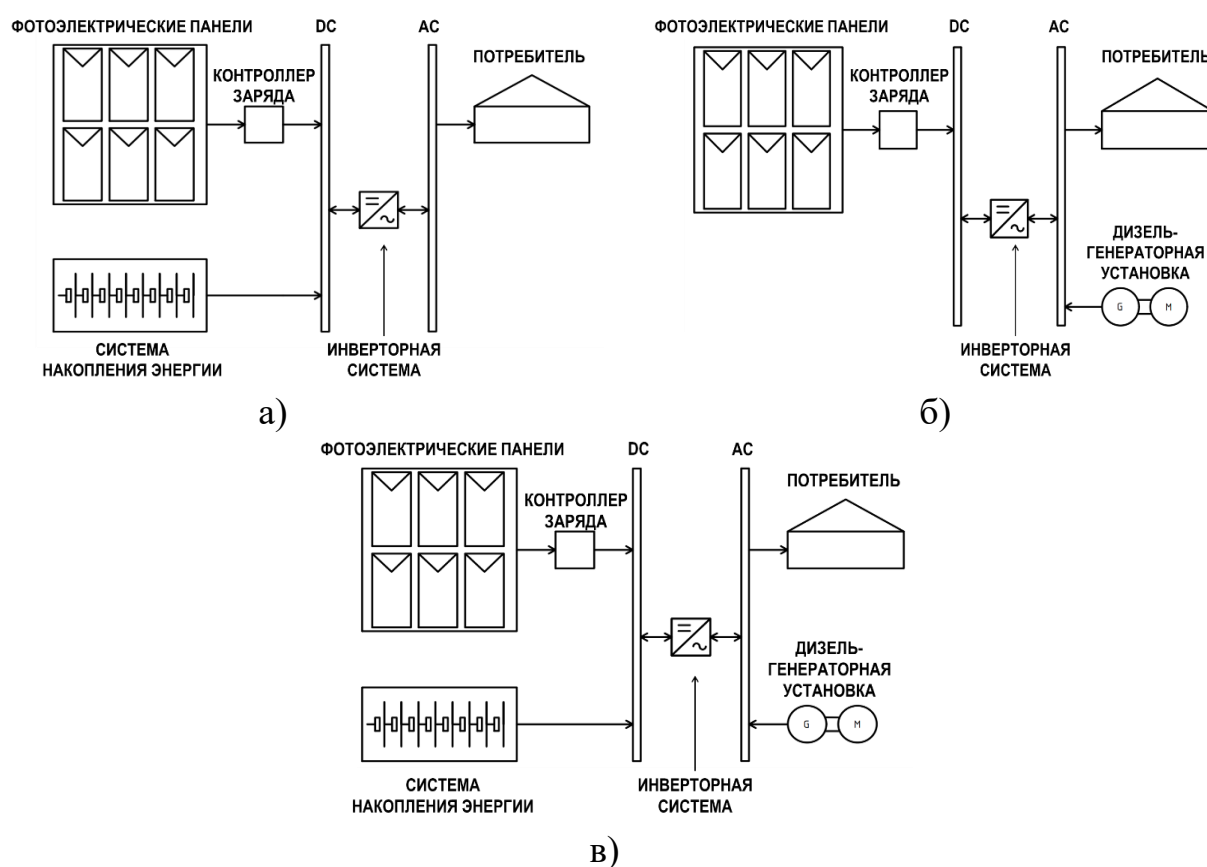


Рисунок 1 – Структурные схемы солнечных электростанций:

а) автономная; б) сетевая; в) гибридная

Для повышения энергоэффективности солнечных ЭС применяются различные способы, которые, повышают выработку электроэнергии от ФЭП: применение трекерных установок для обеспечения перпендикулярной ориентации ФЭП относительно Солнца; снижение поверхностной температуры ФЭП путем применения систем распыления охлаждающей жидкости; устранение поверхностного загрязнения ФЭП посредством использования автоматических, механизированных и ручных установок по их очистке; другие. Ключевыми недостатками данных способов являются высокие капитальные затраты, сложный технологический цикл внедрения и высокая зависимость от окружающей среды. Внешние факторы окружающей среды в значительной мере влияют на функционирование ФЭП солнечных ЭС. Определена необходимость разработки способов повышения энергоэффективности солнечных ЭС на территории Севера для увеличения их выработки и снижения объемов потребления горюче-смазочных материалов.

Во второй главе сформирована методологическая база исследования характера влияния внешних факторов Севера на функционирование солнечных ЭС. Исследованы и описаны ключевые принципы функционирования ФЭП, учитывающие влияние следующих факторов: солнечная радиация; температура окружающей среды; поверхностное загрязнение; облачность; задымление воздушной среды, вызванное сезонными лесными пожарами.

Выработка электроэнергии от солнечной ЭС значительно зависит от внешних факторов, которые могут скачкообразно изменить ее величину. В таблице 1 представлена уровневая классификация данных факторов.

Таблица 1 – Классификация внешних факторов

Наименование параметра	Уровень – 1 (Факторы)	Уровень – 2 (Подфакторы)
Выработка электроэнергии солнечной ЭС зависит от:	Солнечное излучение, Вт/м ²	Облачность
		Задымление (лесные пожары)
	Поверхностная температура, °С	Влажность среды
		Скорость ветра
		Температура окружающей среды
	Поверхностное загрязнение	Периодичность очистки ФЭП
		Состав земляного грунта
		Масса пыли/снега

По причине влияния внешних факторов выработка электроэнергии от солнечных ЭС может меняться в пределах граничных значений, что может привести к изменению достоверности расчетов электроэнергетических показателей и идентификации рабочих параметров функционирования объекта в рамках выполнения моделирования и имитационных расчетов. В связи с этим необходима определение характера и показателей влияния внешних факторов на режим работы солнечных ЭС для формирования обновленной методики расчета ее рабочих параметров.

В третьей главе представлены результаты натуральных исследований по идентификации показателей и характера влияния внешних факторов Севера на функционирование солнечной ЭС, а также представлены разработанные способы повышения ее энергоэффективности, выполненные в соответствии с требованиями теории планирования экспериментальных исследований. В таблицах 2, 3, 4 и 5 представлены результаты исследования характера и показателей влияния внешних факторов Севера на режимы работы солнечной ЭС. После идентификации характера и показателей влияния внешних факторов сформированы дополняющие коэффициенты. Данные коэффициенты применены для обновления существующей методики расчета годовой выработки солнечной ЭС по выражению (1).

Таблица 2 – Выработка солнечной ЭС при загрязнении пылью

Наименование параметра	Поверхностное загрязнение ФЭП		
	День – 5	День – 10	День – 15
Мелкодисперсные фракции пыли			
Снижение генерирующей мощности, %	7,5	24,6	46,5
Недоотпуск электроэнергии, %	3,75	10,75	19,75
Снеговой покров			
Снижение генерирующей мощности, %	12,4	52,2	79,0
Недоотпуск электроэнергии, %	6,20	21,24	36,92

Таблица 3 – Параметры солнечной ЭС при различных температурах ОС

Температура окр. среды, °С	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	+10	+20	+30	+40
Снижение генерирующей мощности, %	0,16		0,389			1,91		1,41		16,81	
Недоотпуск электроэнергии, %	0,08	0,19	0,95	1,23	1,42	0,70	1,48	0,84	1,64	2,32	8,4

Таблица 4 – Параметры солнечной ЭС в условиях облачности

Виды облачности	Ci	Cc	Cs	Ac	As	Sc	St	Ns, Frnb	Cu	Cb
Снижение генерирующей мощности, %	8,0	25,6	26,6	49,6	51,0	53,6	76,8	85,1	87,1	95,2
Недоотпуск электроэнергии за 5 суток, %	4,0	12,8	13,3	24,8	25,5	26,8	38,4	42,5	43,5	47,6

Таблица 5 – Выработка солнечной ЭС при сезонных лесных пожарах

Наименование параметра	Степень задымления окружающей среды		
	Малое	Среднее	Высокое
Снижение генерирующей мощности, %	34,88	58,14	74,42
Недоотпуск электроэнергии за 5 суток, %	17,44	29,07	37,21

$$\mathcal{E}_{\text{ФЭП.факт}}^{\text{год}} = \begin{cases} \mathcal{E}_{\text{ФЭП.факт}}^{\text{год}} = \mathcal{E}_{\text{ФЭП}}^{\text{год}} - \sum \Delta \mathcal{E}_{\text{потери}}^{\text{год}} \\ \mathcal{E}_{\text{ФЭП}}^{\text{год}} = \sum_{i=1}^{12} \mathcal{E}_{\text{ФЭП}}(\eta_{\text{ФЭП}}, E_{\text{инс}}, P_{\text{инс}}, P_{\text{ФЭП}}, K_{\text{КИ}}) \\ \sum \Delta \mathcal{E}_{\text{потери}}^{\text{год}} = \Delta \mathcal{E}_{\text{дым}}^{\text{год}}(\Delta_{\text{дым}}, n_{\text{дым}}) + \Delta \mathcal{E}_{\text{пыль}}^{\text{год}}(\Delta_{\text{пыль}}, \mathcal{E}_{\text{лето-осень}}^{\text{ФЭП}}) + \Delta \mathcal{E}_{\text{снег}}^{\text{год}}((\Delta_{\text{снег}}, \mathcal{E}_{\text{зима}}^{\text{ФЭП}})) \end{cases}, \quad (1)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ФЭП.факт}}^{\text{год}}$ – фактическая годовая выработка солнечной ЭС, кВт·ч; $\mathcal{E}_{\text{ФЭП}}^{\text{год}}$ – годовая выработка солнечной ЭС без учета влияния внешних факторов, кВт·ч; $\sum \Delta \mathcal{E}_{\text{потери}}^{\text{год}}$ – суммарные годовые потери выработки солнечной ЭС от внешних факторов, кВт·ч; $\Delta \mathcal{E}_{\text{дым}}^{\text{год}}$ – годовые потери выработки солнечной ЭС от лесных пожаров, кВт·ч; $\Delta \mathcal{E}_{\text{пыль}}^{\text{год}}$ – годовые потери выработки солнечной ЭС от поверхностного загрязнения (пыль), кВт·ч; $\Delta \mathcal{E}_{\text{снег}}^{\text{год}}$ – годовые потери выработки солнечной ЭС от поверхностного загрязнения (снеговой покров), кВт·ч.

С учетом вышеуказанных закономерностей определены этапы процесса моделирования работы солнечной ЭС и разработана математическая модель оценки ее энергетического потенциала (Рисунок 2). Модель, учитывающая внешние факторы Севера, позволяет вычислить электроэнергетические и технико-экономические показатели работы солнечных ЭС, с помощью которого достигается высокая точность расчетов со среднестатистическим отклонением – $\pm 4 \dots 5\%$ (Таблица 6). В модели применен идентифицированный перечень закономерностей из Главы 2, а также показатели влияния внешних факторов.

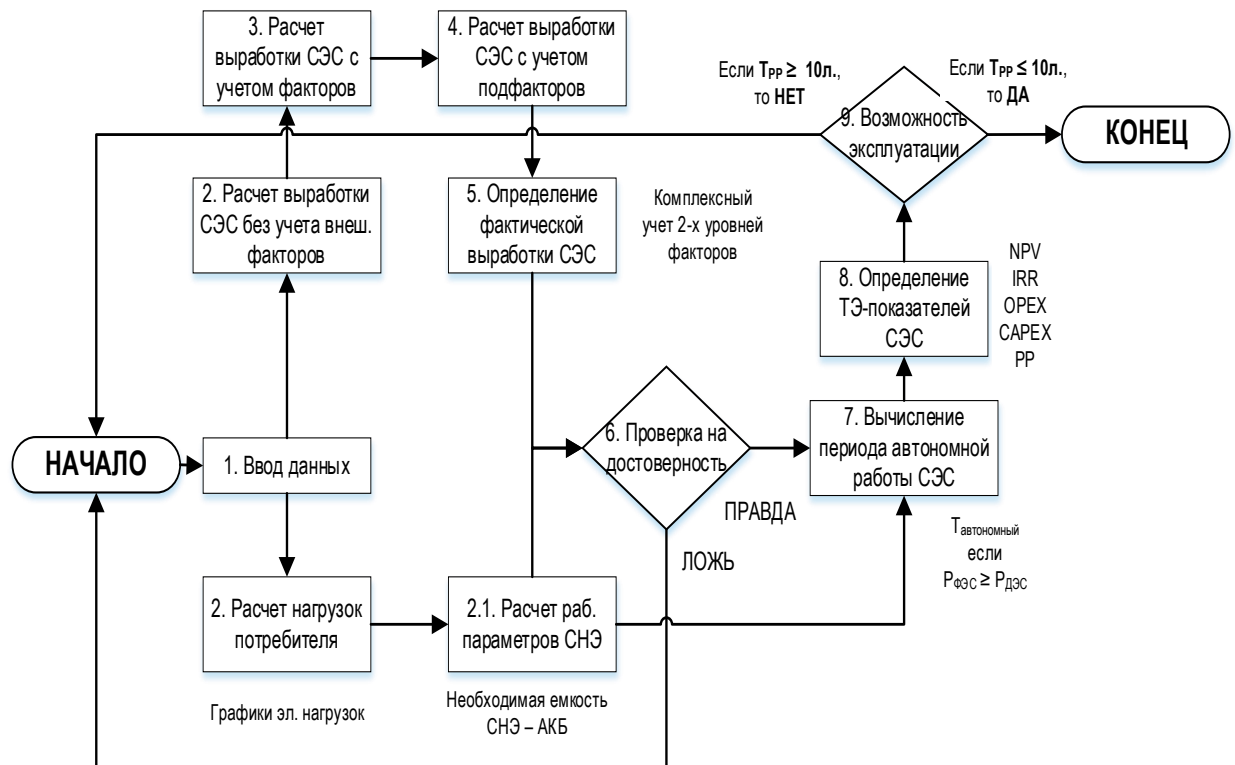


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма математической модели солнечной электростанции

Таблица 6 – Результаты оценки достоверности расчетов

Населенный пункт	Дельгей	Иннях	Куду-Кюель	Верхняя Амга	Улуу	Эйик
Тип объекта	Солнечная электростанция					
Установленная мощность, кВт	80	20	20	36	20	40
Среднегодовая фактическая выработка, кВт·ч	74550	19582	17602	32421	20328	27824
Расчетная выработка по основной методике, кВт·ч	81189	21451	19172	35381	22106	30568
Расчетная выработка по основной методике с доп. коэффициентами, кВт·ч	77889	20478	18428	33824	21235	29050
Относительное отклонение расчетов, %	8,9	9,5	8,9	9,1	8,7	9,9
Относительное отклонение расчетов с доп. коэффициентами, %	4,5	4,6	4,7	4,3	4,5	4,4
Среднее отклонение, %	9,18					
Среднее отклонение с доп. коэффициентами, %	4,49					
Уменьшение среднего отклонения, %	4,69					
СКО, %	0,39					
СКО с доп. коэффициентами, %	0,12					
Уменьшение СКО, %	0,28					

В целях снижения негативного влияния исследованных внешних факторов на энергоэффективность солнечных ЭС разработаны следующие способы:

Способ – 1: защита ФЭП от негативного влияния поверхностного загрязнения, сущность которого заключается в механической очистке и нанесении жидкого покрытия на поверхности ФЭП. На рисунке 3 и в таблице 7 представлены процесс и эффект применения данного способа.

Способ – 2: повышение выработки электроэнергии от солнечных ЭС, сущность которого заключается в размещении ФЭП по дугообразной форме со строгой ориентацией на солнечную сторону, где угол размещения между боковыми ФЭП составляет не более 30° . На рисунке 4 и в таблицах 8–9 представлены процесс и эффект применения данного способа на функционирование ФЭП.

Выполнена оценка эффекта применения предлагаемого способа для солнечной ЭС установленной мощностью 30 кВт с применением лицензированного программного обеспечения «*Global Solar Atlas*». Оценка проведена путем сопоставления со существующими способами размещения ФЭП. Результаты оценки представлены в таблице 9.

По результатам расчетов на базе «*Global Solar Atlas*» определено, что в течение летнего периода (Май...Июль) рекомендовано временное применение дугообразного способа размещения ФЭП для солнечных ЭС микро мощности

(≤ 100 кВт ≈ 660 м² площади ФЭП). При малых и крупных мощностях (≥ 100 кВт) сезонное изменение способа размещения ФЭП имеет высокие трудозатраты.

Способ – 3: повышение выработки электроэнергии от двухсторонних ФЭП, сущность которого заключается в их размещении на специальной поверхности, изготовленной из металлизированной полиэфирной пленки с напылением металла на горизонтальную поверхность земли относительно тыльной стороны двухсторонней ФЭП для усиления доли отраженного солнечного излучения. На рисунке 5 и в таблице 10 представлены результаты натурных исследований.

Таблица 7 – Уменьшение выработки электроэнергии от солнечной ЭС

После 15 суток	Образец – 1	Образец – 2	Образец – 3
Состав покрытия	Силикон	Воск	Спирт
Снижение генерирующей мощности, %	-8,21 \pm 2,93	-44,15 \pm 2,93	-9,90 \pm 2,93
Недоотпуск электроэнергии, %	4,10	4,95	19,52

Таблица 8 – Показатели способов размещения ФЭП солнечной ЭС

Период – май...июль	Способ размещения ФЭП			
	Линейное	Дугообразное	Изогнутое	Трекер
Капитальные затраты, тыс.руб/кВт	100,00	120,0	120,00	600,0
Суточная выработка, Вт·ч/м ²	696,9	771,9	732,3	999,1
Увеличение выработки (факт.), %	0,0	+10,77	+5,07	+43,36
Увеличение выработки (расч.), %	0,0	+14,07	+4,80	+41,40
Относительная погрешность, %	0,0	\pm 3,30	\pm 0,27	\pm 1,96

Таблица 9 – Показатели способов размещения ФЭП солнечной ЭС

Месяц	Выработка электроэнергии от солнечной ЭС по способам размещения, тыс. кВт·ч			
	Линейное	Дугообразное	Изогнутое	Трекер
Январь	1,20	1,14	1,12	1,20
Февраль	2,60	2,41	2,25	2,60
Март	4,00	3,82	3,78	5,36
Апрель	4,20	4,11	4,09	5,63
Май	4,00	4,49	4,19	5,70
Июнь	4,00	4,60	4,19	5,56
Июль	3,80	4,27	3,98	5,42
Август	3,40	3,37	3,35	4,56
Сентябрь	2,60	2,52	2,48	3,48
Октябрь	1,80	1,69	1,65	2,41
Ноябрь	1,40	1,30	1,30	1,40
Декабрь	1,00	0,89	0,86	1,00

Наименование параметра	Выработка электроэнергии от солнечной ЭС по способам размещения, тыс. кВт·ч			
	Линейное	Дугообразное	Изогнутое	Трекер
Годовая выработка, тыс. кВт·ч	34,00	34,71	33,27	44,32
Летняя (май...июль) выработка, тыс. кВт·ч	11,80	13,46	12,37	16,68
Годовое увеличение выработки, %	0,00	+2,00	-2,14	+27,8
Летнее увеличение выработки, %	0,00	+14,07	+4,80	+41,4

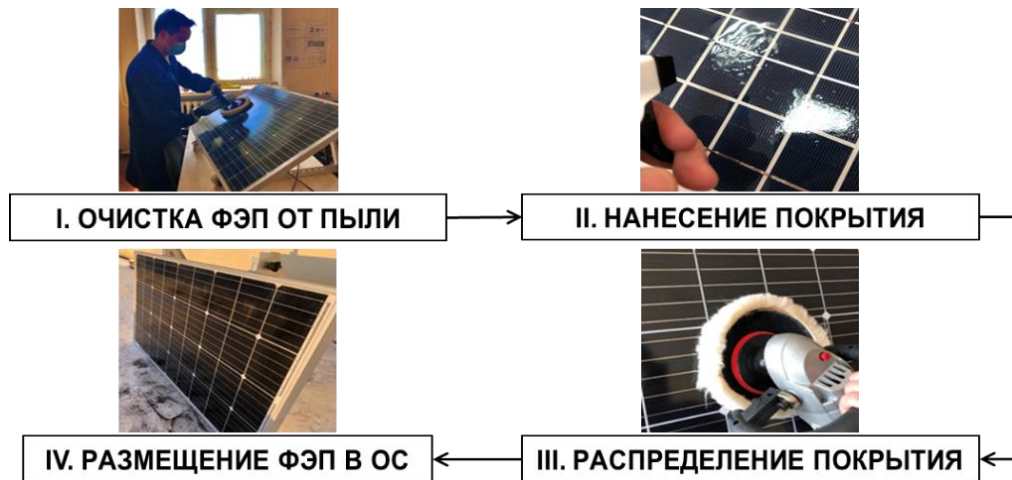


Рисунок 3 – Способ защиты фотоэлектрических панелей от загрязнения



Рисунок 4 – Дугообразное размещение фотоэлектрических панелей и трекер

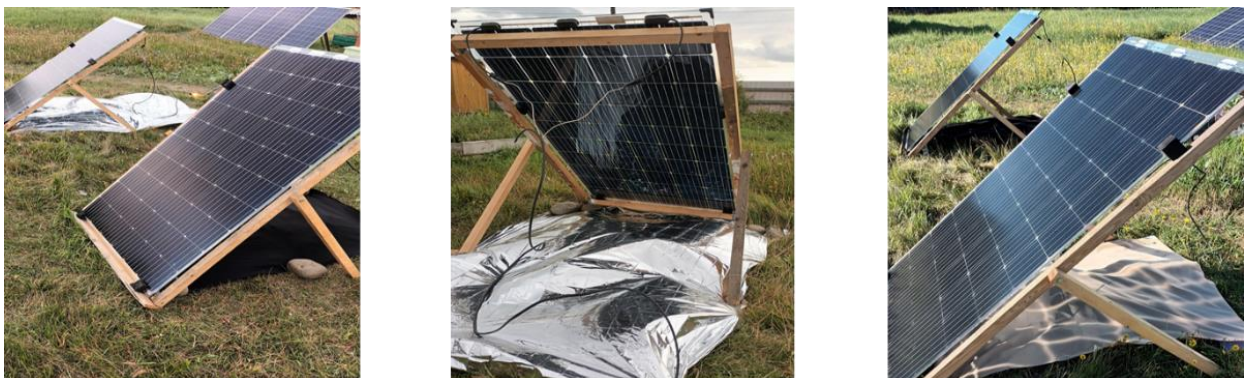


Рисунок 5 – Способ увеличения выработки для двухсторонних фотоэлектрических панелей

Таблица 10 – Электроэнергетические показатели двухсторонних ФЭП солнечной ЭС при различных типах поверхности земли

Цветовой тон относительно тыльной части ФЭП	Суточная выработка, кВт·ч	Увеличение генерирующей мощности, %	Изменение тока, о.е.
Специальное покрытие с дугообразным размещением	2,73	+33,2	1,33
Специальное покрытие	2,56	+25,2	1,25
Белый	2,0	+0,0	1,00
Песочный	1,95	-4,6	0,95
Желтый	1,91	-6,6	0,92
Зеленый	1,88	-8,1	0,89
Черный	1,78	-12,8	0,85

Проведенные исследования показали, что при комплексном применении разработанных способов выработка электроэнергии увеличивается на 33,2%, а уровень снижения выработки электроэнергии от поверхностного загрязнения на уменьшается на 37%.

Четвертая глава посвящена оценке влияния разработанных способов на надежность автономной ЭЭС с солнечной ЭС, эксплуатируемой на территории Северо-Востока России. В целях проведения оценки показателей надежности выбрана автономная ЭЭС в с. Мачах (северная Якутия) с установленной мощностью 90 кВт, где зимний максимум – 75 кВт, а летний минимум – 37 кВт. Результаты оценки представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Результаты оценки показателей надежности автономной энергосистемы в с. Мачах

Показатели	Вариант I	Вариант II	Вариант III	Вариант IV	Вариант V
Комплектация	ДЭС	ДЭС–ФСЭС	ДЭС–ФСЭС–способы	ДЭС–ФСЭС–СНЭ	ДЭС–ФСЭС–СНЭ–способы
Недоотпуск электроэнергии, %	6,01	4,34	3,58	3,89	3,13
Коэффициент готовности,	0,916	0,917	0,919	0,924	0,929
Вероятность отказов, о.е.	0,33	0,25	0,24	0,20	0,19
Вероятность безотказной работы, о.е.	0,67	0,75	0,76	0,80	0,81

По итогам оценки надежности автономной ЭЭС установлено, что применение солнечной ЭС с системой накопления энергии и разработанными способами в интеграции с ДЭС (Вариант V) имеет наилучшие показатели.

Пятая глава посвящена оценке технико-экономических и экологических показателей применения солнечной ЭС с разработанными способами в автономную ЭЭС в с. Мачах. В ходе проведения данной оценки применены следующие способы: способ I – способ защиты ФЭП от поверхностного загрязнения; способ II – комплексное применение способов 2 и 3.

По результатам оценки рекомендовано комплексное применение разработанных способов со следующими показателями: дисконтированный срок окупаемости – 11 лет; годовая экономия моторного масла – 0,23 т.; удельная годовая экономия дизельного топлива – до 0,59 т./кВт; уменьшение годовых выбросов CO₂ – до 55,29 т; период автономной работы солнечной ЭС без включения ДЭС – до 1 мес./год.

Выполненный анализ среднесуточных графиков выработки электроэнергии от солнечной ЭС и ДЭС (Рисунок б), входящих в состав автономной ЭЭС, показал, что, при комплексном применении разработанных способов: в летний период – продолжительность автономного питания потребителей от солнечной ЭС составила 14...24 часов в сутки; в осенний период – до 2 часов в сутки. При этом КИУМ солнечной ЭС увеличен на 7,5...9,5%.

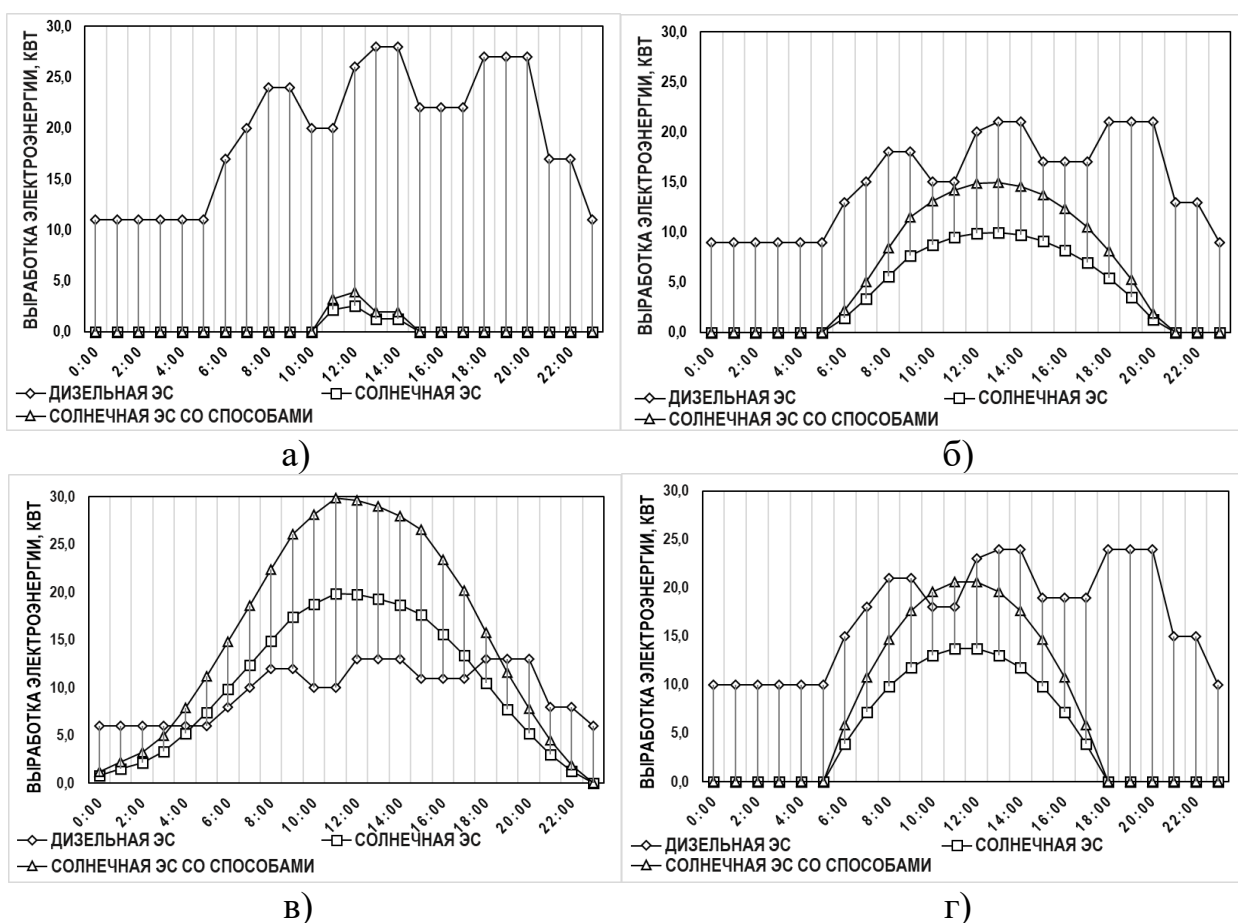


Рисунок б – Среднесуточные графики выработки автономной энергосистемы по периодам эксплуатации: а) зима; б) весна; в) лето; г) осень

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. В автономных энергосистемах Северо-Востока России совершенствуется применение солнечных электростанций. Бесперебойное функционирование и стабильность режимов работы солнечных электростанций зависят от характера влияния внешних факторов, таких как:

солнечная инсоляция; облачность; задымление окружающей среды, вызванное лесными пожарами; температура окружающей среды; поверхностное загрязнение фотоэлектрических панелей (пыль, снег). Влияние данных факторов имеет сезонный характер. Отсутствие учета внешних факторов приводит к отклонениям расчетных и фактических показателей функционирования солнечной электростанции на 10...22%.

2. Проведенные натурные исследования по идентификации характера и показателей влияния внешних факторов Севера на режим работы солнечных электростанций, функционирующих в составе автономных энергосистем, установили следующее: поверхностное загрязнение фотоэлектрических панелей, вызванное мелкодисперсными фракциями пыли, уменьшает выработку электроэнергии на 44...46%; поверхностное загрязнение фотоэлектрических панелей, вызванное снеговым покровом, уменьшает выработку электроэнергии на 12,4...79%; задымление окружающей среды, вызванное сезонными лесными пожарами, уменьшает выработку электроэнергии на 33,88...74,42%; наличие облачности уменьшает выработку электроэнергии на 8,03...95,18%; при температуре окружающей среды в диапазоне $-60...+20$ °C показатели выработки электроэнергии ($-3,28...-0,16\%$); температура окружающей среды в диапазоне $+30...+40$ °C уменьшает выработку электроэнергии на 16,81%.

3. Методика расчета рабочих параметров солнечных электростанций, учитывающая дополняющие коэффициенты внешних факторов, позволяет повысить точность результатов расчета электроэнергетических и технико-экономических параметров функционирования электростанций в сравнении с фактическими значениями.

4. Разработана математическая модель функционирования солнечных электростанций на базе предложенной методики, учитывающая внешние факторы и позволяющая выполнить оценку ее энергопотенциала. Доказано, что данная модель увеличивает достоверность результатов расчета в среднем на 4,69% путем сопоставления расчетных и фактических данных функционирования 6-ти действующих солнечных электростанций на территории Северо-Востока России.

5. Разработан способ дугообразного размещения фотоэлектрических панелей электростанций, учитывающий траекторию движения Солнца, и позволяющий увеличить выработку электроэнергии на 33,25%. Сущность данного способа заключается в размещении двухсторонних фотоэлектрических панелей по дугообразной форме на специальном светоотражающем покрытии. Данный способ позволяет увеличить объем экономии топлива на 34%, уменьшить объемы выбросов CO₂ на 33,8% в течение летнего периода. При этом размер площади размещения панелей увеличивается в сравнении с линейным способом размещения.

6. Разработанный способ защиты фотоэлектрических панелей солнечных электростанций от негативного влияния поверхностного

загрязнения, вызванного мелкодисперсными фракциями пыли в летне-осенний и снеговым покровом в зимне-весенний периоды, предохраняет от образования загрязнения на поверхности панелей в течение 14 суток вследствие чего уменьшается периодичность их очистки. Сущность данного способа заключается в нанесении жидкого воскового покрытия на поверхность панели. Исследования показали, что применение разработанного способа снижает интенсивность загрязнения панелей. При отсутствии применения данного способа защиты выработка электрической энергии снижается на 46%, а при применении – на 9,90%. То есть эффект от применения данного способа уменьшает уровень снижения выработки электроэнергии по причине негативного влияния поверхностного загрязнения – в среднем на 37%.

7. Проведенный анализ показателей надежности автономной энергосистемы с солнечной электростанцией и системой накопления энергии на примере с. Мачах (северная Якутия) показал, что при комплексном применении (внедрении) разработанных и предложенных в работе способов достигаются следующие результаты: уменьшение недоотпуска электроэнергии на 2,88%; увеличение коэффициента готовности объекта на 1,42%; увеличение вероятности безотказной работы на 20,89%.

8. Техничко-экономическая и экологическая оценки функционирования автономной энергосистемы с солнечной электростанцией на примере с. Мачах (северная Якутия) при комплексном применении (внедрении) разработанных и предложенных в работе способов показал следующее: годовая экономия моторного масла – 0,23 т.; годовая экономия дизельного топлива – до 17,55 т.; уменьшение годовых выбросов CO₂ на 55,29 т.; период автономной работы солнечной электростанции без выработки дизельной электростанции – до 1 мес./год; дисконтированный срок окупаемости применения способов в оцениваемый объект – 11 лет.

9. Анализ среднесуточных графиков выработки электроэнергии от автономных энергосистем с солнечными электростанциями при комплексном применении представленных в работе способов показал, что в летний период – продолжительность автономного питания от солнечной электростанции составила 14...24 часов в сутки. При этом коэффициент использования установленной мощности солнечной электростанции увеличивается на 7,5...9,5%.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных журналов (перечень ВАК):

1. Местников Н.П. Исследование возможности применения фотоэлектрических солнечных установок внутри купольного строения в условиях Севера / Н.П. Местников, П.Ф. Васильев, Г.И. Давыдов, А.М.

Хоютанов, А.М-Н. Альзаккар // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2021. – Т. 25, № 4(159). – С. 435–449.

2. **Местников Н.П.** Разработка способа защиты фотоэлектрических солнечных установок от поверхностного загрязнения в условиях Севера / Н.П. Местников // Международный технико-экономический журнал. – 2021. – № 4. – С. 16–24.

3. **Местников Н.П.** Исследование влияния поверхностного загрязнения на функционирование фотоэлектрической панели в условиях Севера / Н.П. Местников, П.Ф. Васильев, А.М-Н. Альзаккар, А.А. Лобашев // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2022. – Т. 7, № 1(27). – С. 90–97.

4. **Местников Н.П.** Оценка функционирования солнечных электростанций в климатических условиях Севера / Н.П. Местников, П.Ф. Васильев, Н.С. Бурянина, А.М-Н. Альзаккар, А.А. Лобашев // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2022. – Т. 7, № 2(28). – С. 101–110.

5. **Местников Н.П.** Исследование функционирования фотоэлектрической установки в условиях облачной погоды на территории Севера / Н.П. Местников, П.Ф. Васильев, Г.И. Давыдов, А.М. Хоютанов, А.М-Н. Альзаккар // iPolytech Journal. – 2022. – Т. 26. – № 1. – С. 81–91.

6. **Местников Н.П.** Исследование влияния температуры окружающей среды на функционирование фотоэлектрической установки / Н.П. Местников, П.Ф. Васильев, Г.И. Давыдов, А.М. Хоютанов, А.М-Н. Альзаккар, А.А. Лобашев // iPolytech Journal. – 2023. – Т. 27, № 1. – С. 134–146.

7. **Местников Н.П.** Разработка и исследование способов повышения электроэнергетической эффективности солнечных электростанций в условиях Севера / Н.П. Местников // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2023. – Т. 19, № 1(71). – С. 70–83.

8. **Местников Н.П.** Оценка эффективности внедрения трекерных установок в солнечные электростанции в условиях Севера / Н.П. Местников, А.К. Корякин, П.Ф. Васильев, А.М-Н. Альзаккар // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2023. – № 6. – С. 67–76.

Статьи в материалах конференций, входящих в международную базу Scopus

9. **Mestnikov N.P.** Development of Method of Protection of Solar Panels Against Dust Pollution in the Northern Part of the Russian Far East / Mestnikov N.P., Vasilyev P.F., Alzakkar A. // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) – Magnitogorsk, 2021. – DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9559596.

10. **Mestnikov N.P.** The Influence of Snow Cover on the Power Generation from PV Panel in the Northern Part of the Russian Far East / N. Mestnikov, A. Alzakkar, V.V. Maksimov // Proceedings – 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022, Sochi, 16–20 May 2022. – Sochi – P. 220–224. – DOI 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787184.

11. **Mestnikov N.P.** Study on the Method of Increasing PV Efficiency for Power Supply at Space Stations / N. Mestnikov, A. Alzakkar, Yu. Samofalov // 2023 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2023, Sochi, 10–16 September 2023 – DOI: 10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272875.

Результаты интеллектуальной деятельности

12. Патент № 2794626 С1 РФ, МПК H02S 40/10. Способ повышения электроэнергетической эффективности солнечной электростанции микро- и малой мощности: № 2022126618: заявл. 13.10.2022: опубл. 24.04.2023 / **Н.П. Местников**, П.Ф. Васильев; заявитель ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН».

13. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2020667411 РФ. Программа расчета электроэнергетических параметров солнечной электростанции на территории Якутии: № 2020666310: заявл. 12.12.2020: опубл. 23.12.2020 / **Н.П. Местников**, П.Ф. Васильев, Н.С. Бурянина, Ю.Ф. Королюк; заявитель ФГАОУ ВО «СВФУ им. М.К. Аммосова».

14. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2021615502 РФ. Программа расчета электроэнергетических параметров солнечной электростанции для питания фермерского хозяйства на территории Севера и Арктики: № 2021614435: заявл. 02.04.2021: опубл. 08.04.2021 / **Н.П. Местников**, П.Ф. Васильев; заявитель ФГАОУ ВО «СВФУ им. М.К. Аммосова».

Другие публикации по теме диссертации

15. **Местников Н.П.** Особенности эксплуатации солнечных электростанций микро мощности в условиях Севера: Монография / Н.П. Местников; Министерство науки и высшего образования РФ, СВФУ им. М.К. Аммосова. – Якутск, 2022. – 155 с. – ISBN 978–5–7513–3359–1.

16. **Местников Н.П.** Прикладные способы усовершенствования солнечных электростанций в условиях Севера: Монография / Н.П. Местников, А.И. Хайбуллина, А.М-Н. Альзаккар; Министерство науки и высшего образования РФ, СВФУ им. М.К. Аммосова. – Якутск, 2023. – 139 с. – ISBN 978–5–7513–3598–1.

Подписано к печати 12.03.2024 г. Заказ №31, Формат 60×84/16.

Объем 1,22 усл. печатн. лист, Тираж 100 экз.

Отпечатано и изготовлено с готового оригинал-макета
в Издательском доме Северо-Восточного федерального университета
677891, г. Якутск, ул. Петровского, 5. E-mail: izdat-svfu@mail.ru