

На правах рукописи

ГАБДЕРАХМАНОВА Татьяна Сергеевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ МИКРОГЕНЕРАЦИИ В УСЛОВИЯХ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

05.14.01 – энергетические системы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук

Научный руководитель: **Попель Олег Сергеевич**
доктор технических наук, главный научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Бобыль Александр Васильевич**
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физико-химических свойств полупроводников Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН

Тягунов Михаил Георгиевич
доктор технических наук, профессор кафедры «Гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии» Московского энергетического института (НИУ "МЭИ")

Ведущая организация: **Институт энергетических исследований РАН**

Защита состоится “___” _____ 2019 г. в ___ ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.110.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук по адресу:

125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр. 2, экспозал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН и на сайте <http://jiht.ru/>

Автореферат разослан “___” _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.110.03,
доктор технических наук



Л.Б. Директор

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 2019

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Сегодня мощность фотоэлектрических станций (ФЭС), действующих в мире, превысила 500 ГВт. Одним из основных факторов дальнейшего повышения доли солнечной генерации и трансформации современной электроэнергетики в ряде стран мира является развитие микрогенерации, то есть фотоэлектрических систем небольшой мощности индивидуальных потребителей. В настоящее время более 70% всей вырабатываемой фотоэлектрическими модулями энергии в европейских странах генерируется одновременно производителями и потребителями энергии, так называемыми просьюмерами. Однако на фоне сокращения господдержки ВИЭ (льготных тарифов) и, как следствие, снижения сбытовых цен на продажу электроэнергии в сеть в ряде стран актуальной становится задача повышения потребления произведенной энергии локально на месте генерации.

Развитие микрогенерации на основе фотоэлектрических модулей (ФЭМ) признано важным также и в России, где значительные территории страны обладают высоким потенциалом солнечной энергии, а ряд районов находится вне систем централизованного энергоснабжения и обеспечивается энергией путем завоза дорогого дизельного топлива.

Разработанный проект изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике», направленный на стимулирование развития микрогенерации на основе ВИЭ, предусматривает введение обязательств для гарантирующего поставщика по приобретению электроэнергии (ЭЭ), выработанной с использованием объектов микрогенерации, исключение налоговых обязательств у физических лиц, реализующих гарантирующему поставщику выработанную ЭЭ, упрощение порядка технологического присоединения и договорных отношений для потребителей – владельцев объектов микрогенерации. При этом ясно, что реальные масштабы практического использования солнечной микрогенерации в районах с благоприятными для этого климатическими условиями будут определяться ее экономической привлекательностью, зависящей от тарифных условий. Последние определяют величину розничной и сбытовой цены на электроэнергию в конкретных субъектах РФ с учетом их принадлежности к ценовым (ЦЗ), неценовым (НЗ) зонам оптового рынка ЭЭ и мощности (ОРЭМ) или к технологически изолированным энергорайонам РФ (ИЭ).

В этой связи оценка эффективности и экономической привлекательности систем солнечной микрогенерации, а также поиск и обоснование районов страны, перспективных для их внедрения, и оптимальных технических решений является актуальной научно-технической задачей, решение которой стало **основной целью настоящей диссертационной работы.**

Объектом исследования являются ФЭС микрогенерации (до 15 кВт) индивидуальных потребителей с двусторонней связью с электрической сетью трех конфигураций: 1) без аккумулирования энергии; 2) с накопителем электрической энергии (НЭЭ); 3) с накопителем тепловой энергии (НТЭ).

Исходя из сформулированной выше цели и выбранного объекта исследования, в диссертации **решаются следующие конкретные научные задачи:**

1. Анализ мирового и российского опыта разработки, создания и эксплуатации фотоэлектрических систем микрогенерации, направлений и методов улучшения их энергетических и технико-экономических характеристик.

2. Разработка и создание экспериментальной фотоэлектрической установки для проведения натурных исследований в обеспечение разрабатываемых динамических математических моделей указанных выше вариантов ФЭС микрогенерации необходимыми параметрическими данными, включая характеристики электрохимических накопителей энергии.

3. Разработка динамической математической модели экспериментальной установки и ее верификация по данным натурных исследований.

4. Разработка динамических моделей рассматриваемых вариантов ФЭС для прогнозирования энергетических и технико-экономических характеристик ФЭС микрогенерации в условиях различных перспективных регионов России.

5. Моделирование работы ФЭС трех рассматриваемых конфигураций в нескольких репрезентативных местоположениях для получения соответствующих энергетических характеристик, сравнительный анализ результатов, анализ чувствительности энергетических показателей к изменению энергетических и мощностных параметров компонентов ФЭС и форме графика нагрузки.

6. Проведение оценки и сравнительного анализа экономических показателей ФЭС микрогенерации в рассматриваемых регионах России.

Научная новизна работы

1. Впервые на основе комплекса экспериментальных и расчетно-теоретических исследований выполнен сравнительный анализ энергетических и экономических характеристик перспективных конфигураций ФЭС микрогенерации и с учетом тарифных особенностей электроэнергетического рынка и климатических условий рассмотренных регионов России оценена их экономическая привлекательность для индивидуальных потребителей.

2. Проведены длительные натурные испытания фотоэлектрической установки с электрохимическим накопителем энергии (НЭЭ), обеспечившие возможность получения параметрических данных для последующего создания верифицированных динамических моделей перспективных конфигураций фотоэлектрических систем микрогенерации.

3. На основе выполненных экспериментальных исследований выявлены условия разбалансировки свинцово-кислотной аккумуляторной батареи и сформулированы требования, которые необходимо учитывать при проектировании ФЭС аккумуляторного типа, а также рекомендации по предотвращению преждевременного выхода НЭЭ из строя.

4. Предложен и реализован оригинальный подход к оценке привлекательности объектов фотоэлектрической микрогенерации с позиций потребителя на основе коэффициентов самопотребления и самодостаточности, равных, соответственно, доле сгенерированной массивом ФЭМ энергии, использованной на месте генерации, и доле покрытия электрической нагрузки за счет локальной генерации.

5. Впервые на основе оптимизационных исследований выявлены регионы РФ, в которых при существующей в стране тарифной политике микрогенерация может быть экономически привлекательной для потребителя.

6. Впервые проанализирована эффективность ФЭС микрогенерации с возможностью использования избытков генерируемой энергии на нужды горячего водоснабжения (вместо выдачи энергии в электрическую сеть) в российских условиях.

Практическая значимость работы определяется ее непосредственной направленностью на обоснование упомянутой выше государственной программы развития микрогенерации на основе ВИЭ, а также на разработку рекомендаций и обоснования энергетических и мощностных параметров и состава ФЭС микрогенерации, при которых достигается их наиболее экономически и энергетически эффективная эксплуатация для потребителя.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований автономной фотоэлектрической установки, позволившие верифицировать имитационную модель установки для подтверждения возможности ее дальнейшего использования, а также выявить риски и негативные аспекты эксплуатации электрохимических НЭЭ и сформулировать рекомендации по их предотвращению.

2. Алгоритм анализа энергетической и экономической эффективности ФЭС микрогенерации с учетом климатических и тарифных условий.

3. Результаты динамического моделирования соединенных с сетью ФЭС микрогенерации трех видов и анализа чувствительности их энергетических характеристик (коэффициентов самопотребления и самодостаточности) к ряду факторов с учетом климатических особенностей регионов России и графиков нагрузки.

4. Результаты анализа экономической эффективности ФЭС рассматриваемых конфигураций, проведенного с учетом различных тарифных сценариев, позволившие выявить территории и тарифные условия, при которых эксплуатация ФЭС микрогенерации может быть экономически оправданной.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационного исследования докладывались на следующих российских и международных научных конференциях: «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики» (Санкт-Петербург, 2013, 2015); Всероссийская научная конференция с международным участием и научная молодежная школа «Возобновляемые источники энергии» (Москва, 2014, 2018); III Всероссийская научная конференция «Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечной энергетики» (Чебоксары, 2015); Международная школа молодых ученых «Современные проблемы геофизики и экологии» (Майкоп, 2016); XIX Международная межвузовская научно-практическая конференция «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (Москва, 2016); V международная конференция «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы» и XX Школа молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» имени Э.Э. Шпильрайна (Махачкала, 2017); XIII Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения» (Казань, 2018); 2nd International Conference on Innovative Manufacturing Engineering and Energy – ImanE&E (Republic of Moldova, Chisinau, 2018).

По материалам диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи в журналах, входящих в реферативную базу данных Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, одного приложения и списка литературы. Работа изложена на 152 страницах, содержит 41 рисунок и список литературы из 138 наименований.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и признательность научному руководителю д.т.н. О.С. Попелю за критическое курирование работы на всех ее этапах, к.ф.-м.н. С.В. Киселевой – за всестороннее содействие и поддержку при проведении исследования; к.т.н. С.Е. Фриду – за консультации в вопросах имитационного моделирования, А.Б. Тарасенко – за техническое сопровождение и консультации в вопросах экспериментальной части исследования, а также каждому из них за обсуждение результатов и высказанные критические замечания по рукописи и автореферату диссертации. Автор также благодарит всех сотрудников лабораторий возобновляемых источников энергии ОИВТ РАН и МГУ имени М.В. Ломоносова за постоянную поддержку.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснован выбор темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, практическая значимость, приведены основные защищаемые положения и кратко описана структура работы.

В первой главе представлены результаты анализа состояния разработок и практического использования технологий фотоэлектрической микрогенерации в мире. Проанализированы предпосылки и перспективы развития микрогенерации в РФ.

Проанализированы технические решения, направленные на повышение конкурентоспособности ФЭС микрогенерации, прежде всего – за счет повышения самопотребления, то есть сокращения выдачи произведенной массивом ФЭМ энергии в сеть, и повышения доли покрытия электрической нагрузки. Среди них наиболее распространены решения, содержащие накопители электрической энергии, в частности, свинцово-кислотные вследствие их более низкой стоимости. При этом, важным практическим вопросом является чувствительность их ресурсных показателей и показателей эффективности к реальным условиям эксплуатации (в частности, к длительным периодам низкой инсоляции и низкой температуры).

Выдвинута идея, ранее широко не рассматриваемая другими авторами, по использованию в целях повышения конкурентоспособности ФЭС избытков генерируемой электроэнергии на подготовку горячей воды для бытового использования.

Формулируется задача сравнительного анализа энергетической и экономической эффективности различных схемных решений, включающих устройства аккумулирования электроэнергии и тепла, и решений без устройств аккумулирования энергии. При этом ввиду недостаточной изученности эффективности работы НЭЭ в неблагоприятных климатических условиях, сопряженных с длительными периодами отсутствия солнечной радиации и низкими температурами, ставится задача проведения экспериментальных исследований НЭЭ в составе ФЭС в натурных условиях.

На основе анализа литературных источников выявлен ряд основных факторов, которые необходимо учесть при выполнении энергетических и экономических оценок соединенных с сетью ФЭС микрогенерации для получения репрезентативных результатов: климатические характеристики местности, особенности нагрузки (характер, временное распределение, гибкость, структура энергопотребления), соотношение энергетических и мощностных параметров оборудования и величины нагрузки.

Вторая глава посвящена вопросам экспериментальной эксплуатации автономной фотоэлектрической установки (ФЭУ) аккумуляторного типа в условиях Московского региона и ее имитационного моделирования.

Цель экспериментов – исследование особенностей работы НЭЭ, а также получение данных о производительности установки и ее компонентов за длительный период времени для верификации имитационной модели установки.

В состав ФЭУ входят (рис. 1): 2 фотоэлектрических модуля MSW-180/90 (24 В) с двусторонней светочувствительностью (ФЭМ1 и ФЭМ2); контроллер заряда Morningstar's SunSaver MPPT 15A (24 В) (КЗ1 и КЗ2), 2 гелевых свинцово-кислотных аккумулятора Ritar RRA12-260DG (12 В) (НЭЭ1 и НЭЭ2); нагрузочный стенд со светодиодными светильниками суммарной мощностью 250 Вт (Н). Установка оснащена системой мониторинга и сбора актинометрических и энергетических данных.

В ходе длительной эксплуатации ФЭУ (около 3,5 лет) фиксировались суммарная солнечная радиация, приходящая на приемную поверхность, токи и напряжения в узлах системы. В процессе обработки экспериментальных результатов рассчитывались: суточные суммы суммарной солнечной радиации и энергии, выработанной ФЭМ, среднесуточные и среднемесячные КПД ФЭМ и КПД ФЭУ, часовые значения разбаланса напряжений на аккумуляторных ячейках НЭЭ (мода).

В результате выявлены некоторые особенности поведения отдельных компонентов установки в реальных условиях, а также определены риски, связанные с обеспечением гарантированности питания потребителя в данном климатическом регионе. В частности, выявлена несимметричность разряда соединенных последовательно аккумуляторных ячеек в составе НЭЭ, которая не фиксируется контроллером заряда, но в результате которой возникает и усиливается так называемый «разбаланс» аккумуляторов. Выявленные величины разбаланса (мода и среднее значение – 0,3 В, максимум – 2,5 В за 8 месяцев (рис. 2), учитывая рабочий интервал напряжений свинцово-кислотных НЭЭ 11,4...13,4 В, являются существенными и приводят к потере работоспособности аккумуляторных батарей за довольно короткие сроки.

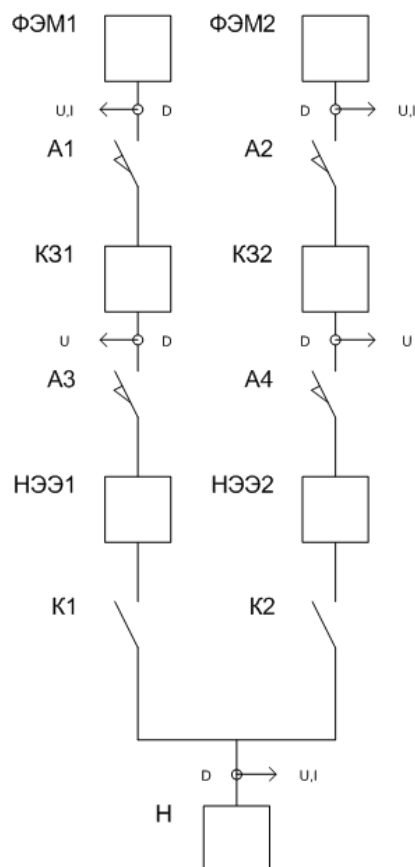


Рис.1. Схема однолинейная экспериментальной ФЭУ

Максимальный разбаланс приходится на осенне-зимний период, характеризующийся низким уровнем солнечного излучения (рис. 3).

Экспериментально доказано, что во избежание проблемы разбаланса напряжения при последовательном соединении элементов НЭЭ требуется ввод в схему балансировочного устройства, которое контролирует заряд (напряжение) на каждом элементе и перераспределяет энергию между ними.

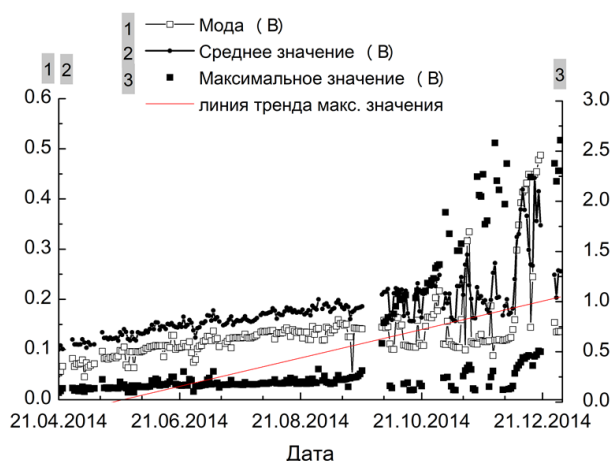


Рис. 2. Динамика изменения разности напряжений на аккумуляторах в составе ФЭУ

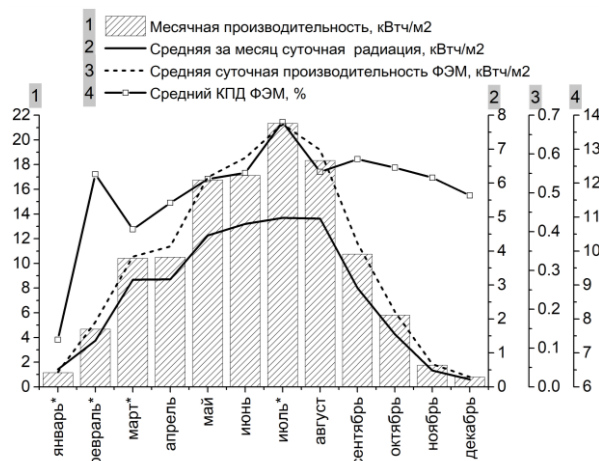


Рис. 3. Энергетические показатели ФЭУ (* — месяцы с частично восстановленными данными)

Вторая часть главы 2 посвящена созданию имитационной модели ФЭУ и ее верификации по данным экспериментальной эксплуатации. Модель установки создана в среде моделирования TRNSYS. Информационная диаграмма ФЭУ, представляющая собой схему связей между ее компонентами, которые имитируются модулями встроенной в программную среду библиотеки, приведена на рис. 4.

Имитационная модель была верифицирована с использованием экспериментально полученных часовых сумм суммарной солнечной радиации в плоскости наклона массива ФЭМ (скважность измерений – 30 с) и средних часовых значений температуры воздуха.

Получены высокие коэффициенты корреляции модельных и экспериментальных значений производительности ФЭМ и ФЭУ (0,99 и 0,91 соответственно) при средних величинах погрешности 4% и 12...13% соответственно для теплой половины года и несколько более высокие погрешности для холодной половины года, которые можно объяснить известными особенностями работы устройств преобразования энергии в составе ФЭС (контроллеров, инверторов) при малых величинах радиации.

В обоснование применения разработанной имитационной модели для других регионов и в различные сезоны года выполнен анализ зависимости относительной погрешности модельных значений производительности массива ФЭМ и ФЭУ от экспериментально измеренных значений среднесуточной мощности солнечного излучения.

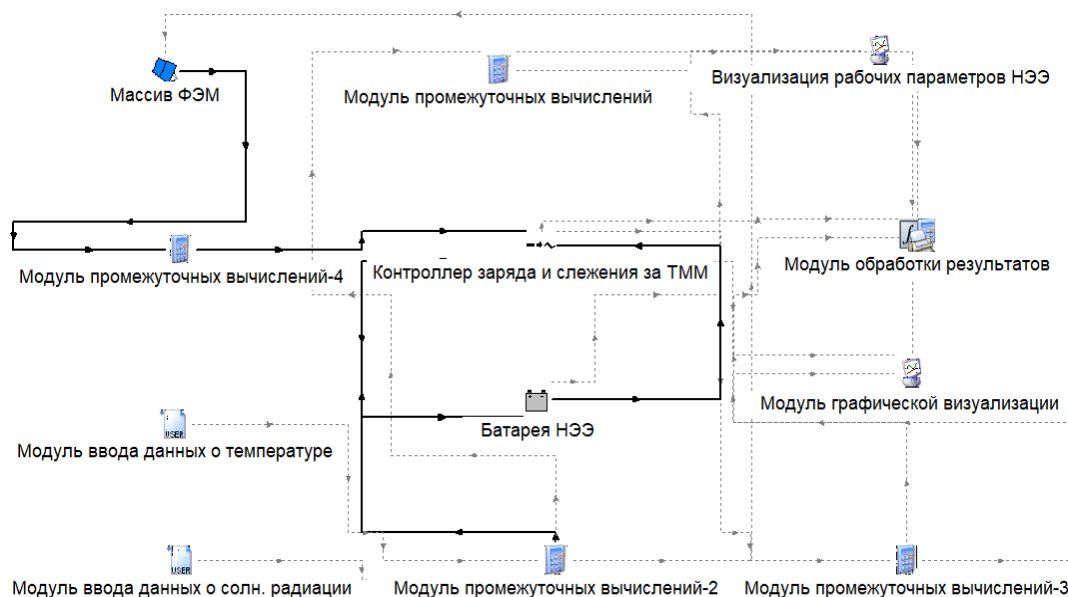


Рис. 4. Информационная диаграмма экспериментальной ФЭУ в среде моделирования TRNSYS

Полученные результаты позволяют говорить об адекватности математической модели при величинах среднесуточной мощности солнечного излучения более 100 Вт/м^2 (погрешность при этом не превышает 13-15%).

Третья глава посвящена моделированию производительности ФЭС микрогенерации в нескольких перспективных регионах РФ, а также анализу чувствительности работы систем к энергетическим, мощностным характеристикам оборудования ФЭС и форме суточного графика электропотребления.

Рассмотрены ФЭС индивидуальных потребителей с двусторонней связью с электрической сетью трех конфигураций:

- 1) без аккумулирования энергии. Вырабатываемая ФЭС энергия в первую очередь направляется на покрытие электрической нагрузки потребителя, излишки выработанной энергии передаются в сеть;
- 2) с аккумулированием электрической энергии. Излишки энергии после покрытия электрической нагрузки направляются, прежде всего, в систему

накопления электрической энергии (НЭЭ), расположенную у потребителя, затем – в сеть;

3) с аккумулярованием тепловой энергии. Излишки энергии после покрытия электрической нагрузки направляются в водонагреватель, обеспечивающий горячее водоснабжение (ГВС) потребителя, затем – в сеть.

Моделирование и расчетные исследования выполнены для 5 географических местоположений, характеризующихся высоким солнечным ресурсом (более $1,3 \text{ МВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$) и относящихся к различным тарифным зонам. К ним относятся: Волгоградская и Читинская области, находящиеся в ЦЗ, районы Якутии и Приморского края – в НЗ, районы Якутии и Сахалинская область – в ИЭ.

Имитационные модели созданы в среде моделирования TRNSYS на основе верифицированной модели экспериментальной ФЭУ. В качестве источника исходной климатической и актинометрической информации использовались наборы синтетически сгенерированных часовых метеоданных в формате типичного метеогода из базы данных Meteonorm, входящие в комплект поставки TRNSYS. Углы наклона приемной поверхности ФЭМ приняты равными широте плюс 15° .

В качестве базового объекта-просьюмера рассмотрен индивидуальный жилой дом с суммарной годовой электрической нагрузкой $5,5 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$ и суточной нагрузкой ГВС 200 л/день . Профили электрической нагрузки для всех местоположений, различные для каждого месяца и выходных и рабочих дней, построены на основе данных OPenEI (пример – на рис. 5). Профиль нагрузки ГВС построен на основе рекомендаций из учебной литературы и принят единым для всех местоположений.

Моделирование, совмещенное с параметрическими исследованиями, выполнялось на временном интервале 1 год с шагом моделирования 1 ч.

В ходе моделирования для каждого местоположения и схемного решения рассчитывались следующие суммарные за год величины: полная выработанная массивом ФЭМ энергия; часть выработанной энергии, переданная в нагрузку / в сеть / сброшенная в водонагреватель; энергия, потребленная нагрузкой из сети; нагрузка ГВС.

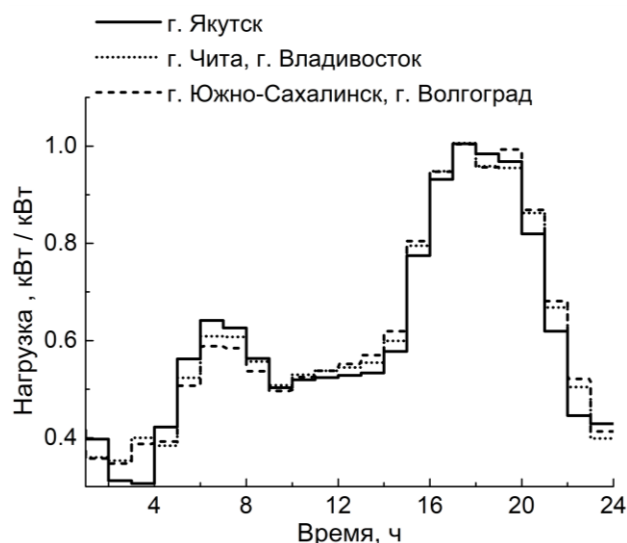


Рис. 5. Пример графиков электрической нагрузки (летний день), использованных при моделировании

Результаты динамического моделирования использовались для расчета следующих интегральных показателей энергетической эффективности: годового коэффициента самопотребления K_{cn} , равного доле произведенной ФЭС микрогенерации энергии, потребленной локально, и годового коэффициента самодостаточности K_{cd} , равного доле покрытия годовой электрической нагрузки за счет собственной генерации. Дополнительно для системы, содержащей накопитель тепловой энергии, рассчитывался коэффициент покрытия нагрузки ГВС за счет микрогенерации $K_{cd_гвс}$.

В ходе параметрических исследований анализировалась чувствительность K_{cn} , K_{cd} , $K_{cd_гвс}$ к изменению емкости НЭЭ и мощности массива ФЭМ, а также форме графика электропотребления в течение суток (рассматривалось 3 варианта: «жилой дом», «офис», «школа»; пример – на рис. 6).

Для получения репрезентативных результатов анализа энергетических характеристик ФЭС микрогенерации потребителей с различными годовыми потребностями в электроэнергии, пренебрегая индивидуальным временным распределением электрических нагрузок, величины установленной мощности массива ФЭМ и полезной емкости НЭЭ были нормированы на

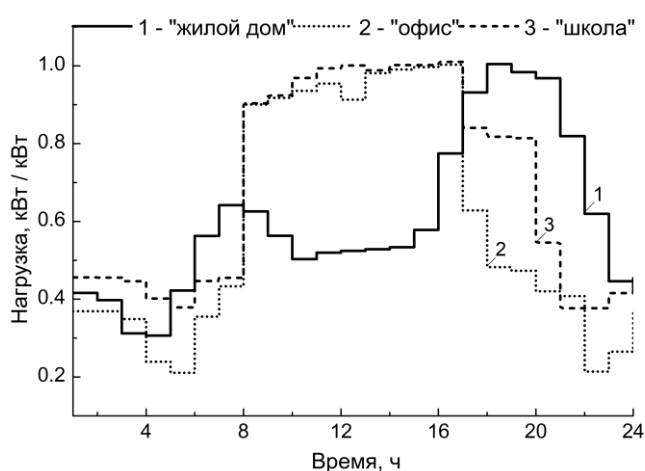


Рис. 6. Примеры форм графиков суточного электропотребления, использованные при моделировании ФЭС в условиях Якутии

величину суммарного годового электропотребления, а нагрузка ГВС (в системе 3 с водонагревателем) – на объем бака водонагревателя (принят равным 200 л).

Выявлено, что форма суточного графика нагрузки (при неизменной величине годового электропотребления) практически не влияет на величину K_{cn} и незначительно влияет на K_{cd} (эффект – в пределах 10...15%).

В результате анализа чувствительности определены конфигурации ФЭС микрогенерации, позволяющие достичь максимального самопотребления и доли покрытия электрической и тепловой нагрузки. Так, в условиях Якутии:

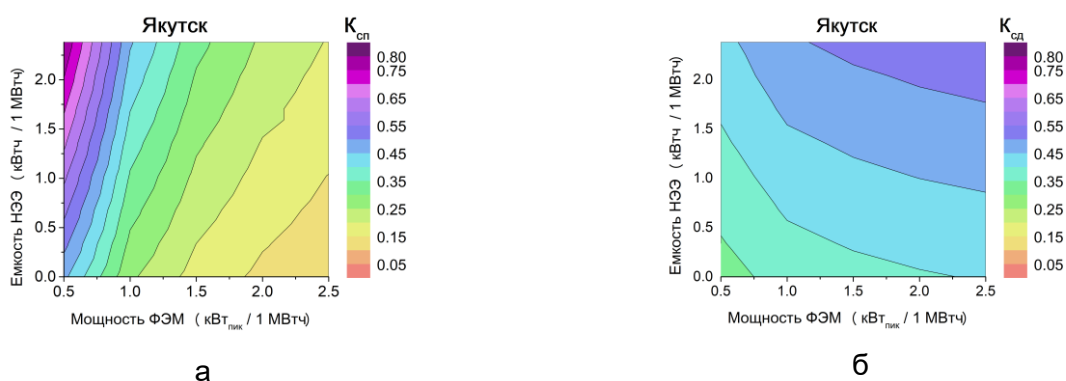
– для системы 1 без аккумулирования (рис. 7а-б, емкость НЭЭ=0) максимальный K_{cn} (51%) и максимальный K_{cd} (42%) достигаются при мощности массива ФЭМ 0,5 кВт_{пик}/1 МВт·ч и 2...2,5 кВт_{пик}/1 МВт·ч годового электропотребления соответственно;

– для системы 2 (рис. 7а-б, емкость НЭЭ>0) максимальный K_{cn} (55...75%) достигается при мощности массива ФЭМ 0,5...1 кВт_{пик}/1 МВт·ч и удельной емкости

накопителя 0...2,5 кВт·ч, максимальный $K_{сд}$ (порядка 55%) - при мощности ФЭМ, равной 2,5 кВт_{пик} / 1 МВт·ч и емкости НЭЭ, равной 2,5 кВт·ч в расчете на 1 МВт·ч годового электропотребления;

– для системы 3 (рис. 7в-д) высокие значения коэффициента самопотребления $K_{сп}$ (50...90%) достигаются при мощности массива ФЭМ 0,5...1 кВт_{пик}/1 МВт·ч годового электропотребления и удельной нагрузке ГВС 0,5...3 л/ 200 л (100...600 л/день), коэффициента $K_{сд}$ (45%) – при удельной мощности массива ФЭМ 2,5 кВт_{пик} / 1 МВт·ч. Максимальные значения $K_{сд_гвс}$ (более 85%) достигаются при ФЭМ 0,5...2,5 кВт_{пик} / 1 МВт·ч и нагрузке ГВС 100...300 л/день.

Системы 1 и 2



Система 3 (с водонагревателем)

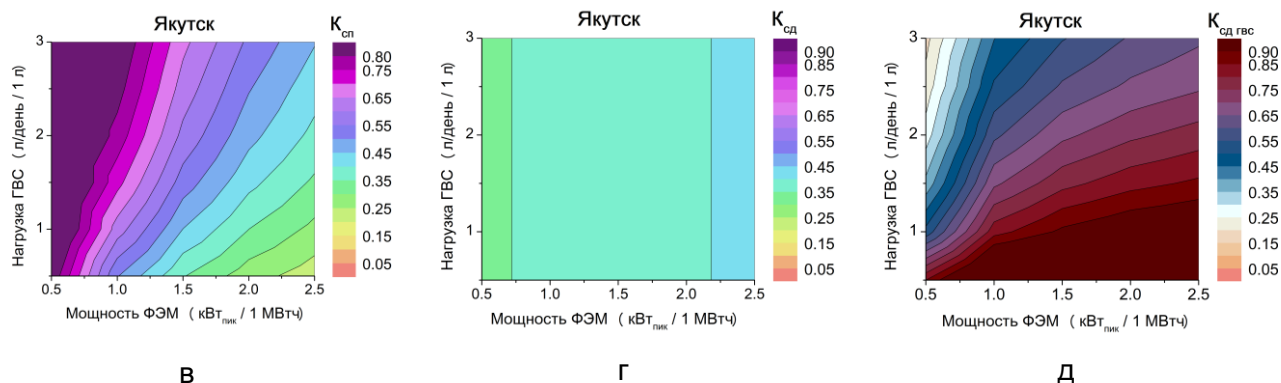


Рис. 7. Результаты анализа чувствительности показателей энергетической эффективности ФЭС к энергетическим и мощностным параметрам оборудования в условиях Якутии (график электропотребления – «жилой дом»)

Четвертая глава посвящена оценке экономической привлекательности анализируемых ФЭС микрогенерации, выполненной на основе результатов моделирования работы энергоустановок, полученных в Главе 3.

Экономическая оценка выполнена с использованием метода аннуитета, описывающего ежегодные платежи в течение всего инвестиционного периода.

В качестве показателя экономической эффективности систем принята средняя за 20 лет стоимость потребляемой просьюмером электроэнергии p_{cons} (руб./кВт·ч), учитывающая три составляющие: инвестиционные затраты на установку C_{ini} (руб.), затраты на покупку недостающей для покрытия электрической нагрузки ЭЭ из сети C_{gi} (руб.) и доходы от продажи избытков выработанной электроэнергии в сеть R_i (руб.) (индекс i указывает на номер конфигурации системы):

$$P_{consi} = \frac{C_{ini} + C_{gi} + R_i}{E_l},$$

где E_l – годовое электропотребление (кВт·ч). Принято, что ФЭС микрогенерации является экономически привлекательной, если p_{cons} равна или ниже средней розничной цены на электроэнергию в течение всего срока эксплуатации систем p_g :

$$\frac{P_{cons}}{P_g} \leq 1.$$

Ежегодные инвестиционные затраты на системы 1, 2 и 3 определяются инвестиционными затратами на их основные составляющие и в общем случае равны:

$$C_{ini} = I_j \cdot P_j \cdot (a_j + o_j),$$

где a_j – коэффициент аннуитета инвестиций, o_j – ежегодные расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание оборудования, нормализованные на соответствующие инвестиционные затраты, I_j – удельная стоимость оборудования, P_j – установленная мощность массива ФЭМ / энергоемкость НЭЭ / объем бака (j – индекс, характеризующий принадлежность к ФЭМ, НЭЭ и водонагревателю).

Коэффициент аннуитета a_j определяется процентной ставкой r и длительностью инвестиционного периода n для каждого компонента ФЭС микрогенерации и рассчитывается как

$$a_j = \frac{r}{1 - (1 + r)^{-n_j}}.$$

Средние годовые затраты на покупку электроэнергии из сети C_{gi} рассчитываются по средним за 20 лет розничным ценам ЭЭ p_g :

$$C_{gi} = p_g \cdot E_l \cdot (1 - K_{cod}).$$

При расчете C_{g3} для системы 3 (с электроводонагревателем) также учитывается сокращение потребления базового источника энергии на нагрев воды за счет использования ФЭС.

Доходы от продажи в сеть ЭЭ, генерируемой ФЭС микрогенерации, R_i , рассчитываются на основе тарифа на продажу энергии, произведенной объектом

микрoгенерации p_{pv} , среднегодовой выработки энергии фотоэлектрическими модулями E_{pv} , а также коэффициента самопотребления K_{cni} :

$$R_i = p_{pv} \cdot E_{pv} \cdot (1 - K_{cni}).$$

Продолжительность жизненного цикла проекта принята равной 20 годам, при этом, расчетный срок службы ФЭМ и дополнительного оборудования системы ГВС – 20 лет, НЭЭ – 10 лет. Процентная ставка $r = 5\%$. Удельные инвестиции в оборудование ФЭС микрoгенерации в базовом варианте приняты равными: в генерирующую часть ФЭС (массив ФЭМ, инверторное оборудование, сопутствующее оборудование) $I_{pv} - 83\,000$ руб./кВт_{пик}, в НЭЭ (свинцово-кислотный) $I_{bat} - 25\,000$ руб./кВт·ч, в модернизацию системы ГВС $I_t - 15\,000$ руб./ 100 л объема бака водонагревателя.

Ежегодные затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание оборудования в составе ФЭС приняты равными 1,5% от соответствующих инвестиционных затрат. Ежегодный темп роста цен на ЭЭ принят равным 4%. Расчетные средние за 20 лет тарифы на ЭЭ (с учетом ежегодного роста) для каждого региона представлены в Таблице 1.

Таблица 1

Средние за 20 лет цены на ЭЭ и газ, принятые в расчетах

Ценовой показатель	Якутск	Владивосток	Якутск	Южно-Сахалинск	Волгоград	Чита
	Тарифная зона					
	Неценовые зоны		Изолированные энергорайоны		Ценовые зоны	
Цена продажи ЭЭ, p_{pv} , руб./кВт·ч	5,93	5,27	6,15	3,86	1,91	1,78
Цена покупки ЭЭ, p_g , руб./кВт·ч	5,93	5,27	5,93	6,09	4,18	4,30
Цена газа, p_{gas} , руб./кВт·ч	1,31	4,16	1,31	0,68	1,31	13,82*

*централизованное газоснабжение отсутствует; взят тариф на сжиженный газ, реализуемый населению в баллонах

В ходе экономического анализа помимо базового сценария (текущие тарифы и розничные цены на оборудование) рассматривался также сценарий со снижением стоимости ФЭМ и НЭЭ по отношению к текущим на 40% (на основании прогнозов ведущих мировых аналитических агентств), а также проводился дополнительный расчет, предполагающий равенство сбытовых и розничных цен ЭЭ в ЦЗ (на примере Волгоградской и Читинской области).

Основными результатами выполненных экономических оценок являются следующие:

1. При базовом сценарии ФЭС микрогенерации оказываются экономически привлекательными лишь для просьюмеров, расположенных в некоторых районах НЗ и ИЭ, в частности, для ряда районов Республики Саха (Якутия) при условии отсутствия в системе накопителей энергии и установленной мощности ФЭС 0,5...2,5 кВт_{пик} в расчете на 1 МВт·ч потребляемой за год электроэнергии (рис. 8а). Использование в системе теплового накопителя энергии объемом 200 л является целесообразным при удельной мощности массива ФЭМ 1,5...2,5 кВт_{пик} /1 МВт·ч годового электропотребления (рис. 8б) и нагрузке ГВС до 200 л /день.

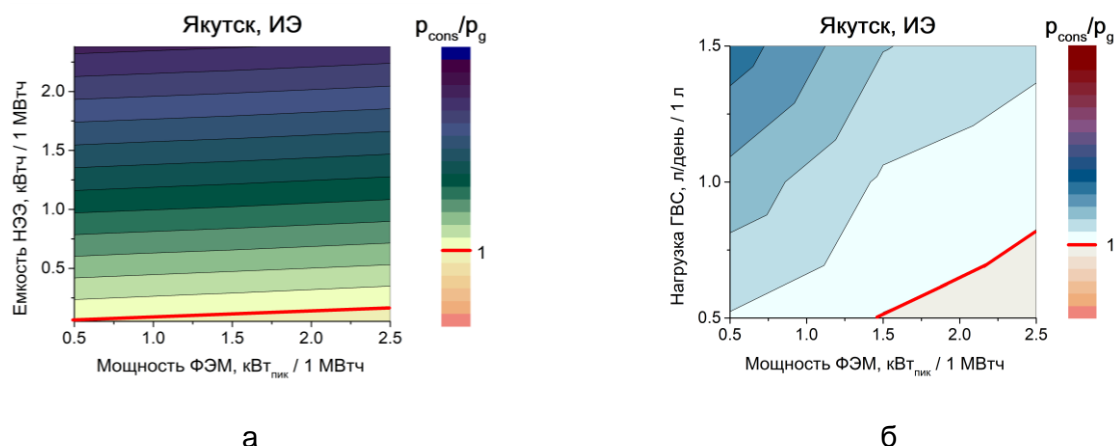


Рис. 8. Результаты оценки стоимости электроэнергии p_{cons} при действующих тарифах на ЭЭ и ценовых параметрах оборудования: а – для систем 1 и 2, б – для системы 3

Для рассмотренных географических точек, относящихся к ЦЗ ОРЭМ, при сегодняшних ценах на оборудование и действующих тарифах на ЭЭ и газ экономически эффективных конфигураций ФЭС не обнаружено.

2. При сценарии, предполагающем снижение стоимости основного оборудования ФЭС на 40%, зоны экономически привлекательных системных конфигураций существенно расширяются. ФЭС без аккумулирования, а также с НЭЭ и НТЭ оказываются рентабельными в НЗ Якутии и НЗ и ИЭ юга Дальнего Востока (Красноярском крае и Сахалинской области соответственно). Рациональным оказывается использование ФЭС в более широком диапазоне мощности, в том числе с НЭЭ полезной емкостью до 0,5 кВт·ч в расчете на 1 МВт·ч годового электропотребления. Перевод традиционного электроводонагревателя на питание от ФЭС вместо использования ЭЭ из локальной сети также становится целесообразным. Владение ФЭС в ЦЗ ОРЭМ остается с экономической точки зрения неэффективным.

3. При условии равенства сбытовых и розничных цен ЭЭ на территориях ЦЗ ОРЭМ, обладающих наибольшим солнечным ресурсом, и текущих розничных ценах

на оборудование владение ФЭС микрогенерации остается экономически нецелесообразным.

Выявлены следующие зависимости между p_{cons} и полученными в Главе 3 показателями энергетической эффективности K_{cn} , K_{cd} и $K_{cd\text{ }звс}$:

– для системных конфигураций 1 и 2 – высокая положительная корреляция между p_{cons} и K_{cd} для всех исследуемых местоположений;

– для конфигурации 3 (с НТЭ):

- для Волгограда, Читы, Южно-Сахалинска с низкими сбытовыми ценами ЭЭ относительно розничных – положительная корреляция p_{cons} с K_{cd} и отрицательная – с K_{cn} ;
- для рассматриваемых местоположений из НЗ, для которых характерно равенство сбытовых и розничных цен ЭЭ – отрицательная корреляция p_{cons} и $K_{cd\text{ }звс}$;
- для районов Якутии с тарифными решениями ИЭ, подразумевающими сбытовую цену ЭЭ выше розничной, – положительная корреляция p_{cons} с K_{cn} , отрицательная – с K_{cd} и $K_{cd\text{ }звс}$.

Таким образом, предположение об определяющем влиянии величины коэффициента самопотребления K_{cn} на итоговую стоимость энергии для просьюмера в ЦЗ не подтвердилось. Показано, что в определенной мере все три показателя определяют целесообразность владения ФЭМ микрогенерации для просьюмера в зависимости от схемного решения и разницы между величинами розничного и сбытового тарифа на ЭЭ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Выполнен анализ мирового и российского опыта разработки, создания и эксплуатации ФЭС микрогенерации. Проанализированы подходы, использующиеся для оптимизации их энергетических и технико-экономических характеристик.

2. Выполнены длительные натурные исследования производительности автономной фотоэлектрической установки (ФЭУ) аккумуляторного типа, результаты которых позволили обеспечить разрабатываемые динамические математические модели нескольких схемных конфигураций необходимыми параметрическими данными, включая характеристики электрохимических накопителей энергии.

3. По результатам экспериментальных исследований разработана и верифицирована динамическая имитационная модель экспериментальной ФЭУ.

4. Разработаны динамические имитационные модели трех схемных решений (без аккумулятирования, с НЭЭ, с НТЭ) для прогнозирования с их использованием энергетических и технико-экономических характеристик ФЭС микрогенерации в условиях различных перспективных регионов России.

5. Выполнено моделирование исследуемых ФЭС микрогенерации в нескольких репрезентативных местоположениях и сравнительный анализ результатов, а также анализ чувствительности энергетических показателей к изменению энергетических и мощностных параметров компонентов ФЭС и формы суточного графика электропотребления.

6. Выполнена оценка экономической эффективности ФЭС трех конфигураций в нескольких регионах. Получено, что:

- при текущих тарифных решениях и стоимостных параметрах оборудования ФЭС микрогенерации оказываются экономически привлекательными лишь для просьюмеров, расположенных в некоторых районах НЗ и ИЭ, в частности, для ряда районов Республики Саха (Якутия), при условии отсутствия в системе накопителей энергии и установленной мощности ФЭС 0,5...2,5 кВт_{пик} в расчете на 1 МВт·ч потребляемой за год электроэнергии. Использование в системе теплового накопителя энергии является более привлекательным, чем накопителя электрической энергии вследствие высокой стоимости последнего.

- при сценарии, предполагающем снижение стоимости основного оборудования ФЭС на 40%, зоны экономически привлекательных системных конфигураций существенно расширяются. ФЭС без аккумулирования, а также с НЭЭ и НТЭ оказываются рентабельными в НЗ Якутии и НЗ и ИЭ юга Дальнего Востока (Владивостоке и Южно-Сахалинске соответственно). Рациональным оказывается использование ФЭС в более широком диапазоне мощности, в том числе с накопителем электрической энергии полезной емкостью до 0,5 кВт·ч в расчете на 1 МВт·ч годового электропотребления. Перевод традиционного электроводонагревателя на питание от ФЭС вместо использования ЭЭ из локальной сети также становится целесообразным.

Владение ФЭС микрогенерации в ЦЗ ОРЭМ (на примере Волгограда и Читы) является экономически нецелесообразным для всех рассматриваемых сценариев.

По результатам диссертационного исследования опубликованы следующие работы:

в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. A.B. Tarasenko, **T.S. Gabderakhmanova**, S.V. Kiseleva, M.J. Suleymanov. Cold engine cranking by means of modern energy storage devices - physical simulation // MATEC Web of Conferences. — 2018. — Vol. 178. — 09012. — <https://doi.org/10.1051/matecconf/201817809012>

2. Д.А. Соловьев, М.О. Моргунова, **Т.С. Габдерахманова**. Адаптация энергетической инфраструктуры в Арктике к климатическим изменениям с использованием возобновляемых источников энергии // Энергетическая политика. — 2017. — № 4. — С. 72-80.

3. **T.S. Gabderakhmanova**, S.V. Kiseleva, A.B. Tarasenko, S.E. Frid. Energy production estimation for Kosh-Agach grid-tie PV power plant for different PV module types // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 774. — 012140. — <https://doi.org/10.1088/1742-6596/774/1/012140>

4. **Т.С. Габдерахманова**, С.В. Киселева, О.С. Попель, А.Б. Тарасенко. Некоторые аспекты развития возобновляемой энергетики в Арктической зоне РФ // Альтернативная энергетика и экология. — 2016. — № 19-20 (207-208). — С.41-53. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.19-20.041-053>

5. **Т.С. Габдерахманова**, С.В. Киселева, С.И. Зайцев, А.Б. Тарасенко, В.П. Шакун. Проблемы мониторинга солнечных энергетических систем в России // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2015. — № 15 (4). — С. 54-60.

6. **Т.С. Габдерахманова**, Л.Б. Директор. Анализ схем автономного электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии // Промышленная энергетика. — 2015. — № 4. — С. 48-51.

7. **Т.С. Габдерахманова**, С.В. Киселева, С.И. Зайцев, А.Б. Тарасенко, В.П. Шакун. Использование солнечных фотоэнергетических установок: результаты мониторинга и прогноза производительности // Альтернативная энергетика и экология. — 2015. — № 19(183). — С. 48–54.

8. О.С. Попель, С.В. Киселева, М.О. Моргунова, **Т.С. Габдерахманова**, А.Б. Тарасенко. Использование возобновляемых источников энергии для энергоснабжения потребителей в арктической зоне // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 1(17). — С. 64–69.

в других изданиях:

9. **Т.С. Габдерахманова**, О.С. Попель. Оценка конкурентоспособности солнечной микрогенерации в условиях Якутии // Возобновляемые источники энергии: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием и XI научной молодежной школы. — М: Изд-во «МАКС пресс» — 2018. — С. 32-40.

10. **Т.С. Габдерахманова**, А.Б. Тарасенко, В.П. Шакун. Исследование производительности автономной фотоэлектрической установки в условиях Москвы // Современные проблемы геофизики и экологии (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды): Материалы Международной школы молодых ученых. — Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В.О.» — 2016. — С. 164-70.

11. **Т.С. Габдерахманова**, В.П. Шакун. Геоинформационное картографирование ресурсов и объектов возобновляемой энергетики в Арктической зоне РФ // Возобновляемые источники энергии: Материалы Всероссийской научной

конференции с международным участием и X научной молодежной школы: сборник. Под ред. С.В. Киселевой. – М.: Университетская книга. — 2016 – С. 348-356.

12. **Т.С. Габдерахманова**, С.В. Киселева, С.И. Зайцев, А.Б. Тарасенко, В.П. Шакун. Результаты мониторинга автономной солнечной фотоэлектрической установки в условиях г. Москвы // Сборник трудов III Всероссийской научной конференции «Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечной энергетики». – г. Чебоксары. – 2015. – С. 135-140.

13. **Т.С. Габдерахманова**, С.В. Киселева, А.Б. Тарасенко. О результатах мониторинга и эксплуатации автономной фотоэлектрической установки // Сборник трудов российской конференции «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики». – Спб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2015. – С. 226-227.

14. С.И. Зайцев, А.Б. Тарасенко, **Т.С. Габдерахманова**. Разработка солнечно-аккумуляторной установки для потребителей, подключенных к централизованной сети // Материалы всероссийской научной конференции с международным участием и IX научной молодежной школы "Возобновляемые источники энергии". – М. : Университетская книга. – 2014. – С. 135-141.

15. С.И. Зайцев, С.В. Киселева, О.С. Попель, **Т.С. Габдерахманова**, В.Ф. Титов, И.Т. Пар. Опыт-демонстрационная учебная энергоустановка на основе двусторонних фотоэлектрических модулей // Сборник трудов конференции «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики». – Спб.: Изд-во политехн. ун-та. – 2013. – С. 275-276.

Габдерахманова Татьяна Сергеевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ МИКРОГЕНЕРАЦИИ В УСЛОВИЯХ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

Автореферат

Подписано в печать	Формат 60x84/16	
Печать офсетная	Уч.-изд.л.	Усл.-печ.л.
Тираж 100 экз.	Заказ N	Бесплатно

ОИВТ РАН. 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2