

На правах рукописи



ВЕЛЬКИН Владимир Иванович

**МЕТОДОЛОГИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ
МИКРОГЕНЕРИРУЮЩИХ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ
НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

Специальность 05.14.08 – Энергоустановки на основе
возобновляемых видов энергии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург– 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

Научный консультант	–	Заслуженный энергетик РФ, доктор технических наук, профессор Щеклеин Сергей Евгеньевич
Официальные оппоненты	–	доктор технических наук, профессор Тягунов Михаил Георгиевич Национальный исследовательский университет-МЭИ (Московский энергетический институт-ТУ) (г.Москва) доктор технических наук, Низовцев Михаил Иванович Института теплофизики им. С.С.Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (г.Новосибирск) доктор технических наук, профессор Кирпичникова Ирина Михайловна, Южно-Уральский государственный университет (г.Челябинск)
Ведущая организация	–	Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Защита состоится «18» сентября 2018 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.229.17 при Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, Гидрокорпус -2, ауд.411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и сайте университета <https://www.spbstu.ru/science/defences.html>.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
доктор технических наук



Сидоренко
Геннадий Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Развитие возобновляемой энергетики в мире приняло устойчивый характер и достигает в ряде стран динамики ввода новых мощностей 10-15 % в год (Китай –до 35%). Россия, располагающая значительными запасами углеводородов, в 2017 г. достигла динамики ввода ВИЭ за год 4 %, а выработка составляет всего 1,5%.

Большие пространства РФ, наличие удаленных поселений и автономных объектов требуют надежных независимых энергоисточников, и сейчас эта задача решается, в основном, за счет дизель-генераторов, работающих на органическом топливе.

Одним из решений задачи внедрения ВИЭ для удаленных объектов могло бы стать использование микрогенерирующих комплексных систем с расширенным составом ВИЭ – (далее –мКС ВИЭ), использующих разнообразный имеющийся на данной территории энергетический потенциал, созданный Природой.

До последнего времени не существовало механизма привлечения широких слоев населения для активного участия во внедрении ВИЭ.

Сегодня такой механизм разрабатывается по поручению Правительства РФ от 24.07.2017 «О механизме микрогенерации на основе ВИЭ». Проект закона по стимулированию микрогенерации планируется рассмотреть в течение 2018 г. совместно с ФАС, Минэнерго и Минэкономразвития РФ. Под микрогенерацией в документе подразумевается выработка мощности до 15 кВт.

Представленная работа рассматривает микрогенерирующие комплексные системы на основе ВИЭ. Отличительным их качеством является использование нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в различном сочетании оборудования: ветро-электрические установки (ВЭУ), фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), солнечные коллекторы (СК), малые гидроэлектростанции (мГЭС), биогазовые установки БГУ), тепловые насосы (ТН).

Роль использования микрогенерирующих энергетических комплексов с расширенным рядом ВИЭ для России, с учетом ее огромных пространств, отсутствием на 70% территории страны централизованных источников энергии и усилением в последнее время климатических и политических угроз, возрастает. Внедрение мКС ВИЭ предполагает повышение надежности энергоснабжения удаленных территорий, рост качества жизни децентрализованных потребителей, создание новых рабочих мест, формирование предпосылок к снижению потребления органических топлив и загрязнения окружающей среды. Все это в целом, как никогда ранее, определяет актуальность разработки методологии использования мКС ВИЭ, необходимость их классификации и создание алгоритмов расчета энергетических систем с расширенным составом возобновляемых источников энергии.

В диссертационной работе использовались результаты исследований, выполненных автором в рамках приоритетного направления развития фундаментальных и прикладных наук «Энергосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (х/д тема 1681 «Комплексная оптимизация энергопотребления удаленного жилого объекта с целью устойчивого энергообеспечения нетрадиционными и возобновляемыми источниками энергии» (2001 г.), бюджетная тема № 1671 «Разработка научных основ создания системы автономного энергообеспечения объектов специального назначения на основе возобновляемых источников энергии (2002 г.); х/д тема 1692 «Энергоэффективный сельский дом с резервированием ответственных потребителей энергии на основе комплекса возобновляемых источников» (2003, 2004 г.); в рамках Межотраслевой научно-технической программы сотрудничества Министерства образования Российской Федерации и Министерства Российской Федерации по атомной энергии по направлению “Научно-инновационное сотрудничество” в рамках темы НИР «Исследование возможностей малых энергетических установок возобновляемой

энергетики для целей резервного электроснабжения потребителей собственных нужд АЭС»; в рамках программы «Энерго- и ресурсосбережение Свердловской области» по теме «Исследование гидроэнергетического потенциала рек и водохранилищ Свердловской области» (2001, 2009 гг.), в рамках работ по формированию Стратегии развития ТЭК Свердловской области на период до 2020 г.

В связи с принятием Закона № 261 «Об энергосбережении, о повышении энергетической эффективности...», постановлений Правительства РФ № 449 от 28.05.2013 г. «О механизме поддержки внедрения ВИЭ в России» и № 47 от 23.01.2015 г. «О стимулировании использования возобновляемых источников энергии», Приказа ФАС № 900/15 от 30.09.2015 «Об утверждении методических указаний по установлению цен (тарифов) на электрическую энергию, произведенную с помощью ВИЭ на квалифицированных генерирующих объектах...», актуализируется задача развития технологий ВИЭ для территорий субъектов Российской Федерации, включенных в перечень технологически изолированных территориальных электроэнергетических систем, и на территориях, технологически не связанных с Единой энергетической системой России.

Цель работы – разработка методологии оптимизации параметров комплексной энергосистемы микрогенерации до 15 кВт и более (до 100 кВт) на основе оборудования ВИЭ (мКС ВИЭ).

Основные задачи:

- разработка классификации энергокомплексов для электро- и теплоснабжения автономных объектов с расширенным рядом ВИЭ;
- разработка многофакторной дискретной стохастической математической модели микрогенерирующей КС ВИЭ;
- разработка методологии расчета эффективной мКС ВИЭ на основе метода выпуклой оптимизации;
- разработка компьютерной программы автоматизированного расчета и программы визуализации построения энергокомплекса для определения оптимального состава оборудования микрогенерирующей КС ВИЭ;
- создание экспериментального объекта с широким рядом возобновляемых источников энергии;
- анализ расчетных и экспериментальных данных применения ВИЭ и их различных сочетаний, полученных при использовании микро-генерирующей КС ВИЭ;
- разработка и патентная защита устройств и способов повышения эффективности использования энергии солнца, ветра, гидропотенциала, биоотходов животноводства низкопотенциального тепла в тепловых насосах для автономного энергоснабжения удаленных потребителей.

Научная новизна. В ходе выполнения диссертационной работы впервые предложены:

- метод выпуклой оптимизации для выбора эффективной мКС с расширенным составом ВИЭ в зависимости от географических координат;
- классификация мКС ВИЭ, необходимая для обоснования состава и установленной мощности каждого вида оборудования комплексной системы ВИЭ;
- методология расчета мКС ВИЭ малой мощности (до 100 кВт) для тепло- и электроснабжения автономных объектов, базирующаяся на методе выпуклой оптимизации;
- математическая модель, целевая функция, алгоритм и компьютерная программа расчета оптимального состава оборудования мКС ВИЭ для электро- и теплоснабжения автономного объекта «АРК–ВИЭ» (зарегистр. в Федеральной службе по ИС);
- графическая интерпретация, методика и компьютерная программа расчета оптимальной (по соотношениям долей мощностей и видов оборудования) мКС ВИЭ «VIZPRO-RES» (зарегистрирована в Федеральной службе по ИС);
- способы и конструкции устройств для интенсификации процессов теплообмена в оборудовании ВИЭ, повышающие эффективность теплоснабжения автономного объекта, защищенные патентами РФ.

Объект исследований – комплексные микрогенерирующие энергосистемы на базе возобновляемых источников энергии (мКС ВИЭ).

Предмет исследований – эффективность комплексных систем электро- и теплоснабжения на базе возобновляемых источников энергии.

Методы исследования. В диссертационной работе, исходя из постановки решаемых задач и с учетом особенностей исследуемого объекта, при получении основных результатов работы использовались как теоретические, так и экспериментальные методы исследований. Методическую базу исследований составили теоретические основы ветро- и солнечной энергетики, гидравлики, биометангенерации, теплотехники, теория автоматического управления, теоретическая электротехника. Математические построения и рассмотрение функционирования мКС ВИЭ базируются на анализе дискретной стохастической математической модели объекта и выпуклом критерии оптимальности целевой функции.

Практическая значимость определяется решением в рамках диссертации крупной проблемы – надежного энергообеспечения автономных объектов за счет использования мКС ВИЭ, имеющей важное народнохозяйственное значение в области совершенствования энергетического комплекса Российской Федерации, развития малой и возобновляемой энергетики, а также энергообеспечения зданий и сооружений, не имеющих централизованного энергоснабжения и находящихся на удаленных территориях.

Практическая ценность заключается в рекомендациях и обосновании параметров и состава мКС ВИЭ для автономных объектов, включении в программу развития ТЭК Свердловской области в 2011-2020 г. нового раздела «Возобновляемые источники энергии», конкретизации их по видам, мощностям и срокам ввода.

Обоснованность и достоверность результатов исследований, выводов и рекомендаций, содержащихся в работе, подтверждены следующим:

- полученные научные результаты базируются на классических положениях теоретических основ нетрадиционных и возобновляемых источников энергии;

- удовлетворительным соответствием результатов расчетов, полученных на разработанной дискретной стохастической математической модели, экспериментальным данным испытаний мКС ВИЭ на объекте «Энергоэффективный дом» и отдельных полномасштабных установках;

- представленные в работе математические зависимости, целевая функция и полученные графики базируются на положениях теории оптимизации с поиском экстремума выпуклой функции.

На защиту выносятся:

- классификация мКС ВИЭ по составу оборудования и доли мощности, идущей на обеспечение потребностей объекта;

- методология применения микрогенерирующих комплексных систем с расширенным рядом ВИЭ для удаленных децентрализованных объектов, базирующаяся на методе выпуклой оптимизации с поиском экстремума (минимума) функции, позволяющая определить наиболее эффективный состав и соотношения мощностей оборудования ВИЭ;

- математическая дискретная стохастическая модель мКС ВИЭ и ее целевая функция, решение которой приводит к минимизации стоимости выработки одного кВт·ч электроэнергии всей системой оборудования ВИЭ на объекте;

- математическая модель, алгоритм и компьютерная программа расчета оптимальной (по составу и соотношениям долей мощностей оборудования) мКС ВИЭ «АРК-ВИЭ»;

- графическая интерпретация поиска эффективной мКС ВИЭ, базирующаяся на методе выпуклой оптимизации, определении области достижимого и эффективного множеств выпуклой функции;

- результаты экспериментальных исследований комплексного применения возобновляемых источников энергии на внедрённом объекте «Энергоэффективный дом» в пос. Растущий, Белоярского района, Свердловской области;

- результаты внедрения и исследований системы вакуумных коллекторов для отопления и ГВС на многоэтажном доме в мегаполисе (г. Екатеринбург);

- конструкции устройств и результаты экспериментальных исследований их влияния на повышение эффективности, надежности и ресурса оборудования мКС ВИЭ.

Личный вклад автора определяется:

- постановкой задач исследования и разработкой методологии комплексного использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в мКС ВИЭ для автономных объектов с децентрализованным энергообеспечением;

- созданием классификации мКС ВИЭ по мощности и составу оборудования возобновляемых источников энергии для использования в программах расчета;

- разработкой математической модели, алгоритма и программы расчета оптимального энергокомплекса на базе различных видов ВИЭ, с использованием метода выпуклой оптимизации и анализа выпуклой функции с поиском условного глобального минимума;

- разработкой научно обоснованных проектных и компоновочных решений, авторским надзором за процессом проектирования и монтажа «Энергоэффективного дома», оснащением его различными энергетическими системами на базе возобновляемых источников энергии;

- проведением на экспериментальных объектах натурных испытаний мКС ВИЭ в различных сочетаниях оборудования;

- разработкой алгоритма и компьютерной программы «АРК-ВИЭ» для расчета оптимального состава оборудования мКС ВИЭ (по критерию минимальной стоимости выработки одного кВт×ч при простом сроке окупаемости) и программы визуализации поиска оптимальной мКС ВИЭ «VIZPRO-RES» в среде «Adobe Flash Professional CS6»;

- участием в разработке программы развития малой гидроэнергетики в Свердловской области и включении в неё (с финансированием) 14 объектов мГЭС;

- разработкой и включением (впервые) в программу «Стратегия развития топливно-энергетического комплекса Свердловской области до 2020 года раздела «Возобновляемые источники энергии» с указанием сроков и конкретных показателей по малым ГЭС, ВЭУ, СК, ФЭП, БГУ и ТН.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на Международных, Всероссийских, региональных конференциях, совещаниях и научных семинарах, в числе которых:

Всероссийский симпозиум «Безопасность биосферы», Екатеринбург (2004, 2006, 2009, 2012); ежегодная Всероссийская конференция по энергосбережению и ВИЭ» (2000-2016 гг.), Екатеринбург, VII–IX Всероссийские совещания-конференции по энергосбережению в ЖКХ и ТЭК (Екатеринбург, 2006–2009), XIX-я Всероссийская конференция «Региональные проблемы энергосбережения и пути их решения» (Н.Новгород, 2006); Чешско-Российский семинар по вопросам энергетики (Прага, 2007); Российско-Британский симпозиум молодых ученых и аспирантов (Екатеринбург, 2007); Всероссийская выставка «Энергосбережение» (Н. Новгород, 2008 г.); Франко-Российский семинар по проблемам развития высшей школы и энергосбережения (Франция, Париж, Гренобль, 2008); Ю. Корея выставка инновационных технологий в компьютерной технике и энергетике KES-2009 (Ю. Корея, Сеул, 2009 г.); Международный конгресс «International Congress “Days of clean energy in St.Petersburg”» (2010 г.); «Научно-практическая конференция «Вопросы развития и функционирования топливно-энергетического комплекса в приполярных регионах России» на Ямальском газовом форуме (17–20 марта 2010 г., Новый Уренгой); Российско-Итальянский круглый стол по проблемам инновационных технологий в атомной и возобновляемой энергетике (УрФУ, Екатеринбург, октябрь, 2010 г.); X-я Международная научно-практическая конференция «Проблемы и достижения в промышленной энергетике»

ке» (Екатеринбург, ноябрь, 2011 г.), Российско-Чешский семинар «Проблемы малой энергетики» (Екатеринбург, 2012 г.); Индийско-Российский семинар «Renewable energy in India», Dayananda Sagar Institute, (India, Bangalore, 25–28 февраля 2013г.); научная конференция «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий», (19–20 марта 2013 г., Новосибирск, Институт теплофизики СО РАН); X Международная конференция по возобновляемой и малой энергетике (Москва, 17-19 июня 2013 г.), First International forum «Renewable energy: towards raising energy and economic efficiencies», (22–23 October, 2013, Moscow); Международная научно-практическая конференция ученых ВУЗов России и Казахстана «Зелёная среда» в рамках встречи Президентов России и Казахстана (Екатеринбург, 11 ноября 2013 г.), Всероссийская конференция с Международным участием «Теплофизика и энергетика» (Екатеринбург, 12–15 ноября 2013 г.); Международная научно-практическая конференция «Energy Qwest» (Екатеринбург, 23–25.04.2014 г.), Международная конференция «Reenfor-2014», (РАН, Москва, ноябрь 2014 г.); 6-th International Conference On Energy and Sustainability (Malaysia, Putrajaya, 14–17.12.2014 г.), II Всероссийская научная конференция с международным участием «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий» (ИТФ СО РАН, Новосибирск, 24–26.03.2015 г.), 10-th International Conference «Ecosud-2015» (Испания, Валенсия, 02–05.06.2015 г.), XII Международная ежегодная НПК «Возобновляемая и малая энергетика», (Москва, 8-9 июня, 2015г.), XIII Международная ежегодная НПК «Возобновляемая и малая энергетика», (Москва, 7-8 июня, 2016 г.), Республиканская НПК «Электроэнергетика, гидроэнергетика, надежность и безопасность» (Таджикистан, Душанбе, 24.12.2016), Египетский тур по вопросам внедрения атомной и возобновляемой энергетики (Египет, Каир, Александрия, 18-22.03.2017), XIV Международная ежегодная НПК «Возобновляемая и малая энергетика», (Москва, 17-18 апреля, 2017 г.), Всероссийский Сибирский теплофизический семинар «СТС 33» (СО РАН, Новосибирск, 6-8 июня 2017 г.), Международный форум «Чистая энергия...» (Швейцария, Женева, 20-22 ноября 2017 г.), VII Международный Форум «Арктика: настоящее и будущее» (Санкт-Петербург, 4-6 декабря 2017 г.), VI Форум «Будущее возобновляемой энергетики» (Москва, 13.12.2017).

Публикации. Основное содержание диссертации представлено в **34** статьях рецензируемых журналов, рекомендуемых ВАК (из них лично автором 6,2 п.л.); 6 отчётах НИР, 144 научных публикациях, в том числе в **2-х монографиях, 11-ти патентах** на изобретения и полезные модели, а также **3-х программах ЭВМ**, зарегистрированных Федеральной службой по интеллектуальной собственности.

Специальность, которой соответствует диссертация. Согласно сформулированной цели работы, научной новизне и практической значимости результатов, тема диссертации соответствует паспорту специальности 05.14.08 - Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии, а именно п.п. 2. *Теоретический анализ, экспериментальные исследования, физическое и математическое моделирование энергоустановок, электростанций и энергетических комплексов на базе возобновляемых видов энергии с целью оптимизации их параметров и режимов использования.* 3. *Совершенствование существующих и разработка принципиально новых технических схем комплексного использования возобновляемых видов энергии с целью экономии ископаемых видов топлива и решения проблем социально-экономического характера.*

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературы из 154 наименований, изложена на 253 страницах машинописного текста, включает 40 таблиц, 135 иллюстраций и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, формулируются цель и задачи исследований, отмечена научная новизна, практическая ценность и реализация диссертационной работы.

В главе 1 представлен уровень развития возобновляемой энергетики в мире и в России, описаны комплексные системы ВИЭ в различных регионах, показаны подходы и методы расчета мКС ВИЭ различными исследователями. Подчеркнуто, что развитие ВИЭ в России имеет существенные особенности, связанные с удаленными от централизованных источников объектами, обширными территориями, различными климатическими зонами. Не смотря на наличие достаточных запасов органических топлив, внедрение ВИЭ для России имеет важное значение для настоящего и будущего страны.

Значительный вклад в развитие нетрадиционной и возобновляемой энергетики внесли российские ученые, такие как Алферов Ж.И., Алексеев В.А., Алексеенко С.В., Бальзаников М.И., Безруких П.П., Бреусов В.П., Бутузов В.А., Васильев Ю.С., Виссарионов В.И., Дьяков А.Ф., Елистратов В.В., Евдокимов В. М., Заддэ В.В., Зысин Л.В., Лидоренко А.П., Ковалев А.А., Коган М.Б., Кирпичникова И.М., Малинин Н.К., Накоряков В.Е., Николаев В.Г., Осипов М.И., Саплин Л.А, Соловьев А.А., Стребков Д.С, Селезнев И.С., Соломин Е.В., Панцхава Е.С., Поваров О.А., Попель О.С., Трофимов А. И., Тверьянович Э.В., Тарнижевский Б.В., Томаров Г.В., Тягунов М.Г., Харченко В.В., Шакарян Ю.Г. и др.

Вопросам комбинированного использования ВИЭ посвящены работы таких российских ученых как: Безруких П.П., Васильев Ю.С., Виссарионов В.И., Денисенко В.В., Елистратов В.В., Малинин Н.К., Стребков Д.С., Сидоренко Г.И., Тягунов М.Г., Попель О.С., Шерьязов С. К. и др.

В работах указанных авторов применялись различные методы оптимизации комплексных систем, получены значимые для развития ВИЭ результаты, учитывающие стохастичность возобновляемых источников энергии.

При оптимизации могут применяться различные методы, в том числе поэтапного спуска, ветвей и границ, цепей Маркова и многие другие.

Использование при расчетах первого момента распределения скорости ветра или инсоляции у многих авторов объективно приводило к значительным потерям информации и снижению достоверности в расчетах.

Особенностью, отличающей описываемый в диссертации подход, является синтез электро- и теплогенерирующих систем ВИЭ в составе математической модели. В общей сложности при решении целевой функции учитываются до сотни параметров и десятки тысяч значений актинометрических и ветровых характеристик с устанавливаемым шагом (от 3 сек до суток) для автоматизированного расчета второго момента распределения (дисперсии), в отличие от средних значений и математических распределений (например, Вэйбулла), используемых в подавляющем большинстве расчетов многих авторов.

Ввиду отсутствия Закона о возобновляемой энергетике и соответствующих подзаконных актов, никем из авторов не ставилась задача комплексной микрогенерации с использованием ВИЭ в России, что являлось основным сдерживающим фактором внедрения ВИЭ в стране.

Рассматриваемый в данной работе подход комплексной микрогенерации и математическая модель объекта предусматривают использование расширенного состава ВИЭ, производящих и электрическую, и тепловую энергию.

Помимо рассматриваемого в работе основного объекта исследований «Энергоэффективного дома с комплексом возобновляемых источников энергии», в период с 1997 по 2017 гг. на кафедре «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ при непосредственном участии автора были внедрены лабораторные стенды, экспериментальные установки, разработано соответствующее методическое обеспечение по ВИЭ, используемые в учебном процессе, научных исследованиях и УИРС по профилю «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», раз-

Во второй главе рассмотрена методология применения мКС ВИЭ на базе расширенного ряда возобновляемых источников энергии. мКС ВИЭ – микрогенерирующий энергокомплекс, содержащий несколько (два и более) ВИЭ для электро- и (или) теплоснабжения автономного объекта. Использование конкретного состава оборудования в мКС ВИЭ должно учитывать многолетние климатические особенности конкретной географической территории, быть математически рассчитано и экономически обосновано, что рассмотрено в данной и приводится в следующих главах.

Разработанная методология базируется на анализе математической стохастической модели объекта – мКС ВИЭ, разработанных классификации, модели и алгоритме расчета оптимальной мКС ВИЭ, методе оптимизации с определением достижимого и эффективного множеств выпуклой функции, поиска её экстремума (глобального минимума), а также сравнения с полученными экспериментальными данными на реальном объекте.

В ходе исследований в натуральных условиях при рассмотрении математических стохастических моделей и создании компьютерных программ расчета оптимального состава оборудования, понадобилась и была предложена классификация объектов по составу ВИЭ, мощности комплексных энергосистем, а также отнесение их к соответствующему типу мКС ВИЭ. В связи с этим, проанализированы существующие подходы к описанию комплексных систем (КС), определяющих объект исследований, описываемый в данной работе.

Место КС ВИЭ, как комплексной системы энергообеспечения в системе общей классификации любых производственных систем, показано на рис. 2.



Рисунок 2. Место энергокомплекса на основе возобновляемых источников энергии (КС ВИЭ) в системе общей классификации комплексных систем

Таким образом, КС ВИЭ – это технологическая, процессная комплексная система, относящейся по отраслевой специфике к энергетике, а по технологическим параметрам являющаяся инновационной, содержащей возобновляемые источники энергии.

Известны и описаны гибридные ветро-солнечные, ветро-дизельные и дизель-ветро-солнечные установки, использующие два и три ВИЭ (их можно обозначить, как дуплекс- и трио- мКС ВИЭ). Теоретически возможно наращивание мКС ВИЭ с учетом местных, региональных или территориальных возможностей до кватро- (четырёх), пента- (пяти), сикстет (шести), септ-(семи), окта-(восьми) видов ВИЭ в соответствующие КС. Указанные мКС ВИЭ могут стать востребованы лишь при определённых условиях (наличие соответствующих источников энергии), их рентабельность зависит от точного выбора типов ВИЭ, соотношений мощностей оборудования и, наконец, возможностей потребителя.

Предложена следующая классификация мКС ВИЭ по доле покрытия энергетических потребностей:

1. микро-мКС ВИЭ (эстетические функции);
2. мини-мКС ВИЭ (аварийные функции);
3. малая мКС ВИЭ (минимальные постоянно-эксплуатационные);
4. средняя мКС ВИЭ (развернутые постоянно-эксплуатационные);
5. полная мКС ВИЭ.

Каждый из пяти указанных типов мКС ВИЭ должен надежно обеспечить определённый уровень мощности (долю энергетических потребностей) от полной потребности в энергозатратах по объекту, независимо от отсутствия какого-либо одного или более источников энергии (табл. 1.).

Табл. 1.

Классификация мКС ВИЭ по доле замещаемой энергетической потребности

Тип КС ВИЭ по мощности			Доля замещаемых энергетических потребностей (%)
Полная мКС ВИЭ	F	(Full)	100 %
Средняя мКС ВИЭ	M	(Middle)	25–50 %
Малая мКС ВИЭ	S	(Small)	15–25 %
Мини-мКС ВИЭ (Аварийная)	A		5–15 %
Микро-мКС ВИЭ (Эстет)	Э		до 5 %

Важнейшим условием эффективности мКС ВИЭ становится оптимизация структуры по типам (количеству ВИЭ) и мощности оборудования каждого из видов ВИЭ.

Оптимизация структуры по типам и мощностям означает выбор установленной мощности для каждого вида оборудования ВИЭ, входящего в состав мКС ВИЭ.

Возможные сочетания по видам ВИЭ могут быть представлены следующими соотношениями (табл. 2).

Классификация КС ВИЭ по типу и составу оборудования

Табл. 2.

Обознач.	Тип мКС ВИЭ по составу оборудования	Состав оборудования мКС ВИЭ (по видам; вариант 1)	Состав оборудования мКС ВИЭ (по видам; вариант 2)
d	Дуплекс-мКС ВИЭ	ДГ+ВЭУ	ВЭУ+мГЭС или ВЭУ+АКБ (и т.п.)
h	Трио-мКС ВИЭ	ДГ+ВЭУ+ФЭП	ВЭУ+мГЭС+ ФЭП
k	Кватро-мКС ВИЭ	ДГ+ВЭУ+ФЭП+мГЭС	ВЭУ+ мГЭС+ФЭП+БГУ
p	Пента-мКС ВИЭ	ДГ+ВЭУ+ФЭП+мГЭС+БГУ	ВЭУ+мГЭС+ФЭП+БГУ+СК
s	Сикстет-мКС ВИЭ	ДГ+ВЭУ+ФЭП+СК+мГЭС +БГУ	ВЭУ+мГЭС+ФЭП+СК+БГУ+ТН
sp	Септ-мКС ВИЭ	ДГ+ВЭУ+ФЭП+СК+мГЭС +БГУ+ТН	ВЭУ+мГЭС+ФЭП+СК _{ит} +БГУ+ТН+СК _{вак}

Важнейший фактор, влияющий на внедрение ВИЭ – их удельные стоимостные характеристики. Они зависят от состояния и потенциального изменения установленной мощности, текущей и ожидаемой стоимости энергии от ВИЭ в мире, которые в настоящее время специалистам известны.

При комплексном подходе конкретный состав и соотношения долей мощности оборудования ВИЭ определяются тремя основными факторами:

1) энергетическим потенциалом на территории соответствующих источников энергии (на основе многолетних наблюдений актинометрических характеристик и ветрового потенциала в регионе размещения и конкретной площадки);

2) удельными технико-экономическими показателями ВИЭ;

3) стоимостными характеристиками оборудования в составе мКС ВИЭ (Э, А, S, М, F).

Точные, экономически оправданные соотношения мощностей оборудования для различных типов мКС ВИЭ в различных регионах требуют сложных математических расчетов. Для решения этой задачи предлагается дискретная стохастическая математическая модель мКС ВИЭ, учитывающая перечисленные факторы (1–3), необходимые для поиска эффективного множества и определения экстремума (минимума) выпуклой функции, а в итоге – оптимального по составу (видам ВИЭ) и соотношениям установленных мощностей оборудования мКС ВИЭ.

Эффективность расчетной математической модели мКС ВИЭ в общем виде может быть представлена уравнением:

$$G_{\text{кс}} = f [v(R1); v(R2); CC_i; U_j] \quad (1)$$

где $G_{\text{кс}}$ – показатель эффективности КС ВИЭ (комплекса установок);

v – совокупность факторов воздействия внешней среды:

(скорость ветра (ВЭУ), инсоляция (ФЭП, СК), напор, расход (мГЭС),

температура низко-потенциального источника (НПИ) ТН, режим метангенерации в БГУ (психрофильный, мезофильный, термофильный);

R1: Э, А, S, М, F – тип мКС ВИЭ в зависимости от доли замещаемой мощности (КС ВИЭ: Э – микро-; А – мини-; S – малая; М – средняя; F – полная);

R2: d-, h-, k-, p-, s-, sp – тип мКС в зависимости от видов ВИЭ в системе (см. табл. 2);

CC_i – себестоимость производства 1 кВт×ч разными видами ВИЭ;

U_j – стоимость кВт установленной мощности вида ВИЭ.

По мере повышения ранга системы энергообеспечения с «дуплекс-» до «окта-мКС ВИЭ» возникает новое качество энергосистемы:

-возрастает надежность энергообеспечения потребителя за счет резервирования другими системами ВИЭ;

-появляется возможность снижения установленной мощности дизель генератора;

-снижаются затраты на поставку органического топлива и объемы выбросов.

Основной недостаток при повышении ранга любой мКС ВИЭ – значительный рост её стоимости. Именно вследствие этого требуется использование методов математической оптимизации мКС ВИЭ по составу оборудования и установленной мощности.

В общем случае для математического анализа мКС ВИЭ можно представить в виде структурной схемы, показанной на рисунке 3. Рассмотрение объекта в виде, представленном на схеме, базируется на принципе «черного ящика», как основе при решении задач оптимизации, который в данном случае учитывает генетическую связь ресурсной базы ВИЭ в любом регионе с процессом получения и себестоимостью выработки энергии.

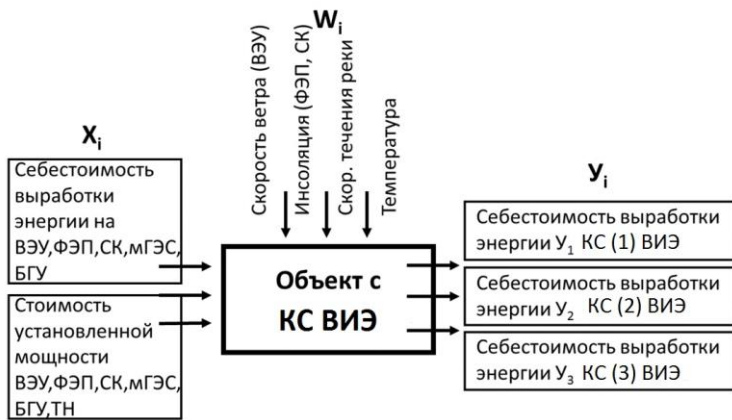


Рисунок 3. Алгоритм многофакторной дискретной математической модели мКС ВИЭ

энергии или удельная стоимость оборудования (1 кВт установленной мощности).

Комбинацию факторов можно представить, как точку в многомерном пространстве, характеризующую состояние системы.

На практике целью многофакторного эксперимента является установление зависимости для дискретной стохастической модели:

$$y_i = f [x_1 (W_1), x_2 (W_2), \dots, x_n (W_n)] \quad (2)$$

описывающей поведение объекта. Чаще всего функция (2) строится в виде полинома:

$$y_i = a_0 + a_1 x_1 (W_1) + a_2 x_2 (W_2) \quad (3)$$

Целью расчетов было определение зависимости (3) при минимальном количестве измерений значений управляющих параметров x_i .

Оборудование ВИЭ имеет не статические, а динамические характеристики, т. е. входные факторы и параметры объекта зависят от времени. Для большинства сложных объектов характерно наличие случайных возмущений и задача идентификации требует статистических методов для определения динамических характеристик.

Нахождение оптимальных условий для исследуемого объекта – важнейшая практическая задача. Чаще всего при многофакторном эксперименте требуется найти значения факторов x_i такие, при которых отклик системы y_i принимает значения y_{\max} или y_{\min} . Таким образом, строится функция отклика

$$y_i = y [x_1 (W_1), x_2 (W_2), \dots, x_k (W_k)] \quad (4)$$

и задача оптимизации сводится к нахождению $x_{1\text{опт}}, x_{2\text{опт}}, \dots, x_{k\text{опт}}$, обеспечивающих экстремум функции:

$$y_i = y (x_{1\text{опт}}, x_{2\text{опт}}, \dots, x_{k\text{опт}}) = y_{\min} (y_{\max}) \quad (5)$$

Кроме того, на значения факторов накладываются дополнительные ограничения:

$$y_i = y (x_1, x_2, \dots, x_k) \{<, =, >\} R_i, \text{ где } r = 1 \dots r \quad (6)$$

Таким образом, задачей оптимизации является нахождение экстремума функции отклика при том условии, что сама функция априори неизвестна.

Использование математической модели позволяет определить эффективную конфигурацию мКС ВИЭ по составу и установленной мощности оборудования на основе оптимизации с поиском экстремума (глобального минимума) выпуклой функции.

Справедливо предполагается, что возмущающие воздействия W_i не поддаются контролю и либо являются случайными, либо меняются во времени (скорость ветра, инсоляция, температура), определяя стохастичность математической модели.

Каждый фактор X_i имеет область определения, которая должна быть установлена до проведения эксперимента (себестоимость выработки кВт·ч

В качестве целевой функции для математической модели мКС ВИЭ была принята квадратичная функция от x_1, x_2, \dots, x_n следующего вида:

$$D(Y/a) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_{ij} x_i x_j \Rightarrow \min, \quad (7)$$

где x_i – доли установленной мощности каждого из видов возобновляемых источников энергии, входящих в мКС ВИЭ;

Y/a – стоимость энергии, вырабатываемой мКС ВИЭ за единицу времени;

σ_{ij} – выборочная ковариация, посчитанная по выборкам для Y_i, Y_j .

Физический смысл функции – минимизация дисперсии стоимости энергии, вырабатываемой микро-генерирующим комплексом - мКС ВИЭ за единицу времени.

Анализируя целевую функцию отметим, что она относится к классу задач квадратичного программирования.

Используя аналогию с математической теорией Шарпа-Марковитца (для рискованных портфельных инвестиций) и Дж. Тобина (для рискованных и безрисковых), работу одного из источников энергии ($n+1$) будем считать независимой от случайных возмущений. Такой источник энергии называется безрисковым (дизель-генератор).

Работа других n источников ВИЭ подвержена случайным возмущениям (например, использование ветровой и солнечной энергии ВЭУ+ФЭП). Это – рискованные источники, зависящие от случайных величин (ветер, солнце и т. д.).

Важно отметить, что ввиду стохастичности факторов и разных природно-климатических условий, весьма актуальным при рассмотрении проблематики использования ВИЭ для конкретного региона является оценка ресурсной базы. Методы оценки и потенциал ресурсов ВИЭ для Свердловской области приведены в главе 4.

Для анализа целевой функции вводим обозначения:

a – количество электроэнергии, вырабатываемое мКС ВИЭ (в единицу времени);

r_0 – стоимость эксплуатации безрискового источника за единицу времени (здесь содержится как стоимость оборудования, так и стоимость обслуживания);

r_k – стоимость эксплуатации в течение часа k -типа оборудования из рискованных источников (ВИЭ);

x_0 – доля (от a), вырабатываемая безрисковым источником (дизель-генератор);

x_k – доля (от a), вырабатываемая k – рискованным источником (ВИЭ).

Измеряемые случайные величины:

Z_k – количество энергии, вырабатываемой за единицу времени k рискованным источником (из состава мКС ВИЭ).

Полагаем, что для каждой из случайных величин Z_k имеется выборка из N наблюдений.

Вычисляемые (по выборке для Z_k) случайные величины:

$Y_k = r_k / Z_k$ – стоимость энергии, произведенной k - рискованным источником за единицу времени.

Тогда для каждой из случайных величин Y_k получим выборку, также состоящую из N наблюдений:

$Y/a = x_0 r_0 + x_1 Y_1 + x_2 Y_2 + \dots + x_n Y_n$ – стоимость энергии, вырабатываемой мКС ВИЭ за единицу времени (это случайная величина, тогда как первое слагаемое в правой части – не случайно).

По выборкам для Y_k находим:

m_k – средняя стоимость энергии, вырабатываемой k источником за единицу времени (выборочное среднее по Y_k);

m_2 – средняя стоимость 1 кВт×ч, вырабатываемого за счет использования солнечной энергии (выборочное среднее по Y_2);

$m = M(Y/a) = x_0 r_0 + x_1 m_1 + x_2 m_2$ – средняя стоимость энергии, вырабатываемой мкс ВИЭ за единицу времени;

A – допустимый уровень средней стоимости 1 кВт×ч, вырабатываемого мкс ВИЭ ($A < r_0$).

Задача заключается в выборе x_k с «минимальным риском» и минимальной стоимостью выработки 1 кВт×ч при следующих ограничениях:

$$x_0 + x_1 + x_2 + \dots + x_n = 1; \quad x_0 r_0 + x_1 m_1 + \dots + x_n m_n = A;$$

$$A < r_0;$$

$$x_i \geq 0, \quad i = 0, 1, \dots, n$$

Это – задача выпуклого программирования, которая решается использованием модуля «поиск решения» в Excel. В результате получим вектор (x_0, x_1, \dots, x_n) , задающий оптимальную по составу оборудования мкс ВИЭ. Применительно к мкс ВИЭ это не что иное, как нахождение оптимальных соотношений долей мощности хдг, хвэу, хфэп, ... хп.

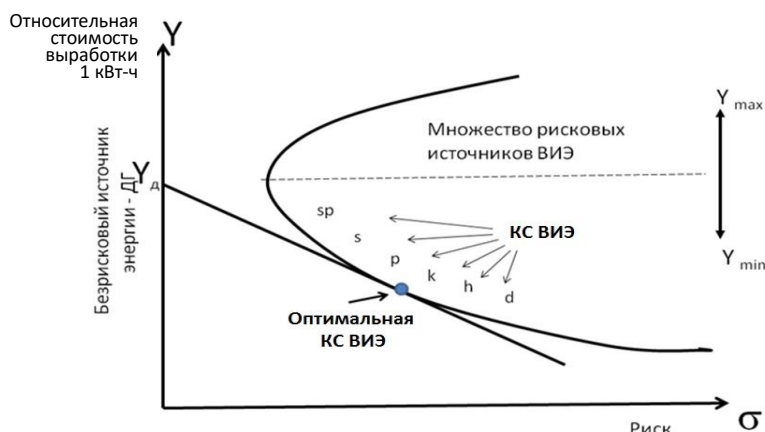


Рисунок 4. График области определения мкс ВИЭ и оценки риска обеспечения энергией (%)

Визуализация алгоритма поиска оптимальной мкс ВИЭ представлена на рисунке 4.

Величина σ является оценкой риска, т. е. разброса стоимости электроэнергии, вырабатываемой мкс ВИЭ за единицу времени. Задача такого типа известна в инвестиционном анализе, где соответствующая модель, содержащая как рискованные, так и безрисковые финансовые инструменты, называется портфелем Дж. Тобина.

На основе решения (7) определяется область значений целевой функции и находятся оптимальные

сочетания долей установленной мощности оборудования в составе разных мкс ВИЭ.

В третьей главе представлен экспериментальный объект – жилой дом-таунхаус, построенный в период 2001-2006 г. в 20 км от Екатеринбурга и оснащённый комплексом возобновляемых источников энергии с целью проведения натуральных экспериментов на различных мкс ВИЭ (рис. 5), проанализирован состав оборудования и дано описание алгоритма и программы расчёты оптимальной мкс ВИЭ. В основу решений самого объекта легли теоретические и практические разработки известных специалистов в области энергосбережения Данилова Н.И., Низовцева М.И. и др.



Рисунок 5. Фото «Энергоэффективного дома» с мкс ВИЭ (2006 г.)

На первом этапе исследований (2001–2005 гг.) обеспечение энергией «Энергоэффективного дома» реализовывалось через две централизованные системы: линия электропередач 10/0,4 кВ и низконапорный газопровод D 88 с наземным (150 м) и подземным (180 м) участками, а также системой катодной защиты. На каждую из восьми квартир дома предусматривалось по 10 кВт мощности. Кроме квартир потребителями электроэнергии на объекте являлись: скважный насос (3 кВт); освещение территории (4 кВт); дренажный насос очистной системы (1,5 кВт); катодная защита газопровода (3 кВт); электропривод ворот (1 кВт); эл. обеспечение гаражного комплекса (2,5 кВт); дежурное освещение технического блока (0,5 кВт). «Энергоэффективный дом» был сдан Государственной приемочной комиссии в декабре 2005 года и соответствовал классу энергоэффективности «С+» по СНИП 23-02-2003 и СП 50.13300.2012.

На втором этапе исследований решался вопрос замещения централизованного энергоснабжения объекта в целом и каждой из восьми квартир дома в отдельности, энергией от возобновляемых источников.

Таким образом, главной отличительной особенностью «Энергоэффективного дома» явилось создание, наряду со штатной системой энергоснабжения, расширенного комплекса возобновляемых источников энергии. В составе комплекса ВИЭ в «Энергоэффективном доме» были последовательно внедрены системы, использующие ветровую, солнечную, гидро-, геотермальную и биоэнергию, представленные в табл. 3.

Состав оборудования ВИЭ на объекте

Табл. 3.

№	Оборудование ВИЭ	Мощность	Кол-во	Год ввода в эксплуатацию
1	Ветроустановка ВЭУ 4-5	4 кВт	1	2002
2	Ветронасос ВН-300 (подача)	300 л/сут	1	2002
3	Солнечные фотоэлектрические преобразователи (ФЭП)	2,4 кВт (N _{пик})	80	2004
4	Солнечные коллекторы (СК)	24 кВт (т)	16	2005
5	Ветроустановка ВЭУ 4-5	4 кВт	1	2006
6	Биогазовая установка (V=8м ³) с 4-х стадийной очисткой и полем фильтрации	2 м ³ /сут.	1	2006
7	Ветроустановка ВЭУ-0,3	0,3 кВт	1	2007
8	Крышная станция солнечных ФЭП	0,45кВт (N _{пик})	1	2007
9	Станция солнечных ФЭП	0,15кВт (N _{пик})	3	2008
10	Механический гелиотроп	0,15кВт (N _{пик})	1	2008
11	Усовершенствованные СК КУМЗ	3,0 кВт (т)	2	2009
12	Солнечный концентратор	2 кВт (т)	1	2010
13	Тепловой насос «Vaillant-5,5»	5,5 кВт (т)	1	2011
14	Микро ГЭС с турбиной «Банки»	1,5 кВт	1	2012
15	Солнечный вакуумный коллектор	1,7 кВт	1	2013
16	Солнечный вакуумный коллектор	3,4 кВт	1	2014
17	Аккумуляторы батареи (суммарно Ач)	400*-7000**	Компл.	2005*-2017**

Различные (поквартирные) системы ВИЭ на объекте в период 2002 по 2017годы позволили провести исследования, накопить практический опыт использования и оценить экономическую целесообразность применения различных сочетаний систем нетрадиционных и возобновляемых источников энергии.

По установленной мощности системы ВИЭ «Энергоэффективного дома» обеспечивали от 5 до 15% от максимума потребностей и гарантировали 100%-е покрытие минимально необходимых (по классификации – А (аварийных)) потребностей.

Принципиальная схема функционирования sp-мКС ВИЭ «Энергоэффективного дома» представлена на рис. 6.

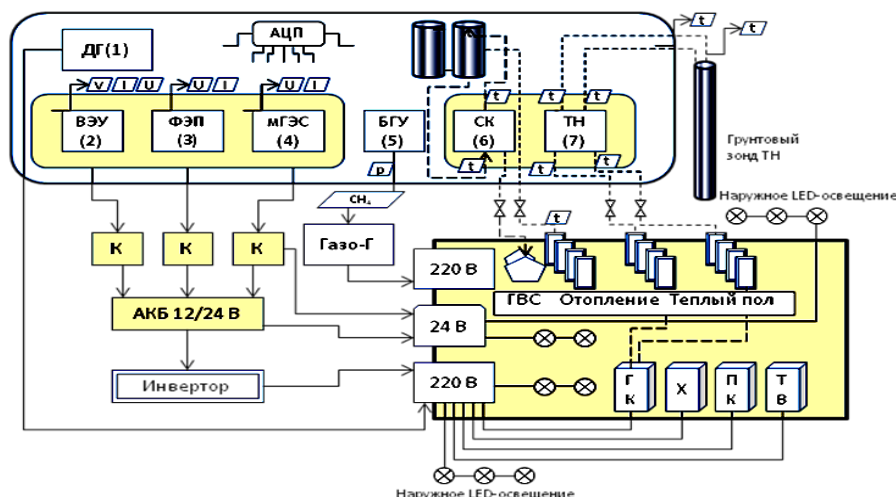


Рисунок 6. Функциональная схема мКС ВИЭ «Энергоэффективного дома»
 (ДГ – дизельгенератор; ВЭУ – ветроэнергетические установки; ФЭП – фотоэлектрические преобразователи; мГЭС – микро-ГЭС; К – контроллеры; Газо-Г – низконапорный газогенератор на очищенном биогазе; АКБ – аккумуляторные батареи; ТН – тепловой насос с грунтовым зондом (источник низкпотенциальной энергии); ГК – газовый котел «Vaillant»; Х – абсорбционный холодильник; ПК – персональный компьютер; ТВ – телевизор, радио; LED-освещение – освещение на базе светодиодов; АЦП – аналого-цифровой преобразователь)

«Энергоэффективный дом» представляет собой жилой объект в составе 8 квартир в таун-хаусе. В каждой «квартире-коттедже» была смонтирована своя мКС ВИЭ (рис.7). Состав мКС ВИЭ по квартирам следующий:

- 1 – sp-мКС ВИЭ (ДГ + ВЭУ + ФЭП + мГЭС + СК + ТН + АКБ);
- 2 – p-мКС ВИЭ (ДГ + ВЭУ + ФЭП + СК + АКБ);
- 3, 4, 5 – d-мКС ВИЭ (ДГ + АКБ);
- 6 – h-мКС ВИЭ (ДГ + ФЭП + АКБ);
- 7 – s-мКС ВИЭ (ДГ + ФЭП + ВЭУ + СК + мГЭС + АКБ);
- 8 – k-мКС ВИЭ (ДГ + ФЭП + СК + АКБ).

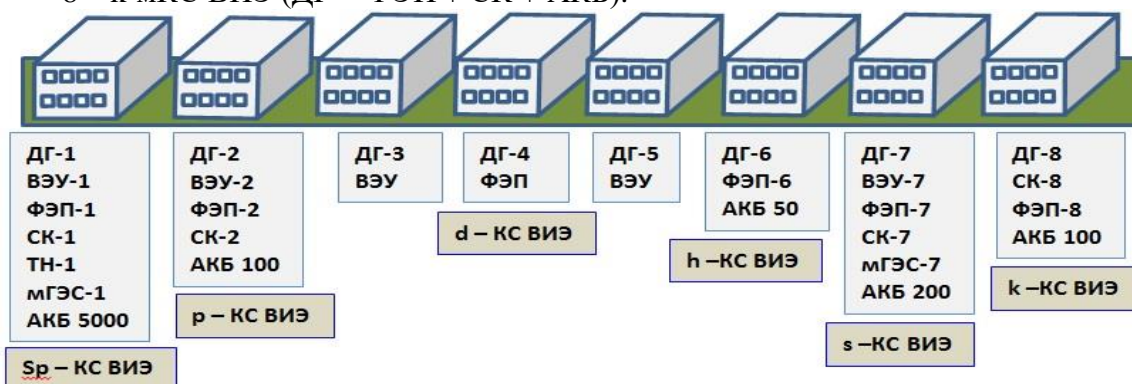


Рисунок 7. Состав оборудования мКС ВИЭ по квартирам «Энергоэффективного дома»

Высокий уровень подбора каждого из объектов, содержащих в себе различные мКС ВИЭ (высота потолков, площади и объем помещений, теплозащитные характеристики, расположение отопительных приборов, окон и т. д.) способствовал хорошей сопоставимости полученных экспериментальных данных и достоверности сравнения с расчетными показателями.

На основе предложенного алгоритма расчета оптимальных долей мощности каждого из возобновляемых источников энергии, входящих в состав мКС ВИЭ, была разработана, апробирована и зарегистрирована автоматизированная программа «АРК-ВИЭ» для быстрого определения искомых параметров, алгоритм которой представлен на рис. 8.

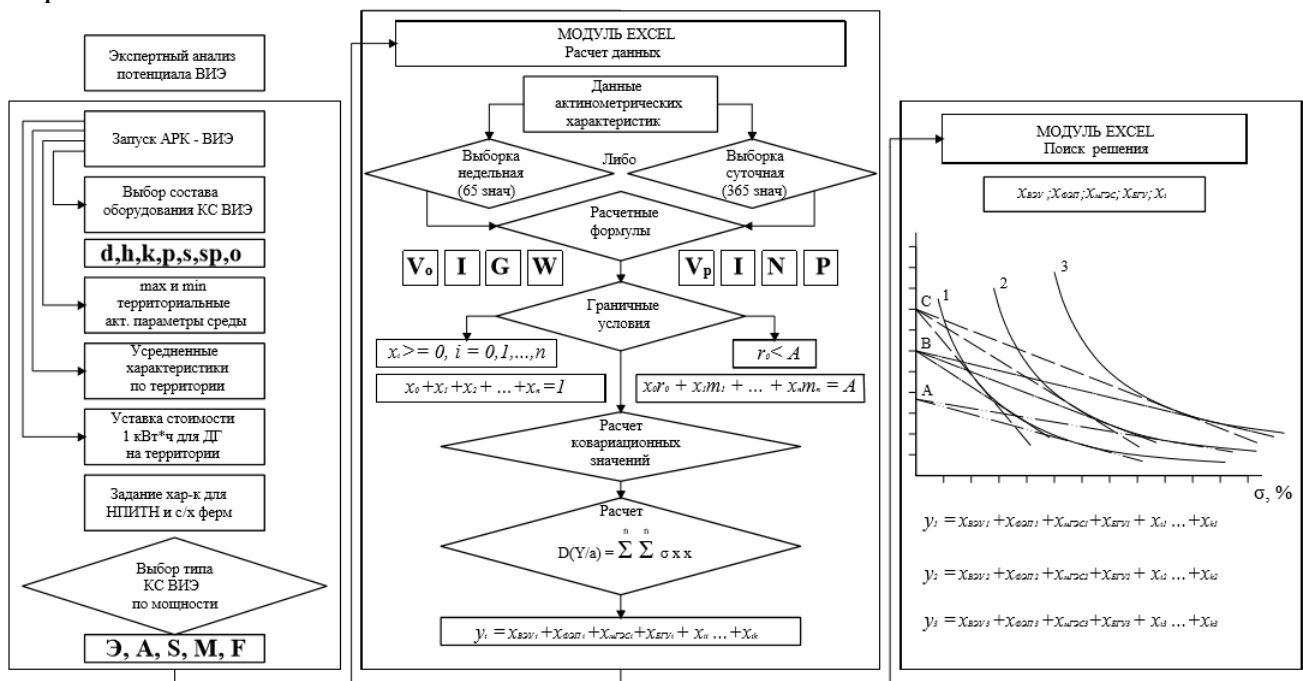


Рисунок 8. Алгоритм расчета оптимальной мКС ВИЭ

В «теле» программы заложена идеология оптимизации мКС ВИЭ, «прошиты» алгоритмы, приведённые в главе 2, характеризующие генетическую связь ресурсной базы ВИЭ в любом регионе с процессом получения и себестоимостью выработки энергии. Расчетные формулы для определения параметров мКС ВИЭ представлены в табл. 4.

Основные расчетные формулы для определения параметров мКС ВИЭ Табл. 4

№	Источник энергии	Параметр	Размерность	Кэфф. полезного действия	Определяющая величина	Мощность	Примерная стоимость 1кВт·ч (руб.)
1	2	3	4	5	6	7	8
1	ДГ	Цена 1 л	Руб.				15–50
2	ВЭУ	Скорость ветра V	м/с	$\eta_3 = 95\%$ $\eta_M = 86\%$	D – диаметр ВЭУ (м) V – скорость ветра (м/с)	$1/8 \rho \pi \eta_3 \eta_M D^2 C_p V^3$ Вт	3,5–8
3	ФЭП	Инсоляция J	Вт/м ²	$\eta^{\Phi} = 15\%$	S – площадь ФЭП (м ²)	$J \times S \times \eta^{\Phi}$ (Вт)	20–40
4	СК плоск	Инсоляция J	Вт/м ²	$\eta^{СК} = 40\%$	S – площадь СК (м ²)	$J \times S \times \eta^{СК}$ (Вт)	5–7
5	СК (вак)	Инсоляция J	Вт/м ²	$\eta^B = 88\%$	S – площадь СК (м ²)	$J \times S \times \eta^B$ (Вт)	6–12
6а	мГЭС 1, река	Скорость течения	м/с	$\eta_3 = 76\%$ $\eta_M = 84\%$	ρ (воды) = 1000 кг/м ³	$1/8 \rho \pi \eta_3 \eta_M D^2 V^3$ (Вт)	2–5
6б	мГЭС 2, плотина	Разность ниж. и верх. бьефов	Δh м		Q – расход Q = V (м/с) × S (м ²)	$\rho \times g \times Q \times \Delta h$ (Вт) $\rho \times g \times V \times S \times \Delta h$	1,5–4
7	БГУ	Кол-во голов	ед.				3–6
		КРС	1			25 Вт	
		Свиней	1			2,5 Вт	
		Птица (кура)	1			0,25 Вт	
8	ТН (т)	Температ. НПИ	(4–25) °С	$\xi = 3–6$ – коэфф. эффективности ТН		N (кВт)	2–8

Скрин-шот экранного меню программы «АРК-ВИЭ»

The screenshot shows the 'Данные' (Data) tab of an Excel spreadsheet. It contains two tables for selecting equipment for a power plant. The top table (rows 4-17) is for a 'Квадро-мкст' (quad-mix) and the bottom table (rows 18-27) is for a 'Три-мкст' (tri-mix). Both tables list equipment types like Diesel generator, Wind, Solar, and Biomass, with columns for power, characteristics, and costs.

Рисунок 9. Экранное меню программы автоматизированного поиска оптимальной мКС ВИЭ «АРК-ВИЭ»

Виды возобновляемых источников энергии в меню, отмеченные оператором «галочкой», «открываются» и доступны для использования в последующих расчетах и поиске оптимального состава мКС ВИЭ и соотношений мощностных характеристик оборудования.

Расчетные характеристики, полученные с помощью «АРК-ВИЭ», были сопоставлены с экспериментальными данными, накопленными за период эксплуатации объекта (2006–2016 гг.).

Результаты сравнения экспериментальных данных и расчетных характеристик оптимальных мКС ВИЭ представлены на рис. 10.

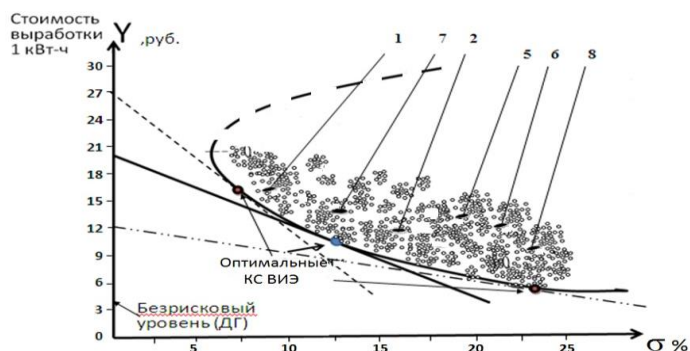


Рисунок 10. График сравнительной эффективности оптимальных расчетных и экспериментальных мКС ВИЭ в квартирах 1–8: (1 – *sp*-мКС ВИЭ (кв. 1); 2 – *p*- мКС ВИЭ (кв. 2); 5 – *d*-мКС ВИЭ (кв. 3, 4, 5); 6 – *h*-мКС ВИЭ (кв. 6); 7 – *s*-мКС ВИЭ (кв. 7); 8 – *k* мКС ВИЭ (кв. 8))

Все мКС ВИЭ в «Энергоэффективном доме», смонтированные ранее без научно-обоснованной «конфигурации», были близки, но не соответствовали оптимальному соотношению долей установленной мощности между видами оборудования ВИЭ, вследствие чего имеют резерв повышения эффективности. Этот резерв определяется 20–50% мощности установленного оборудования ВИЭ или (в абсолютных единицах) величиной 2–

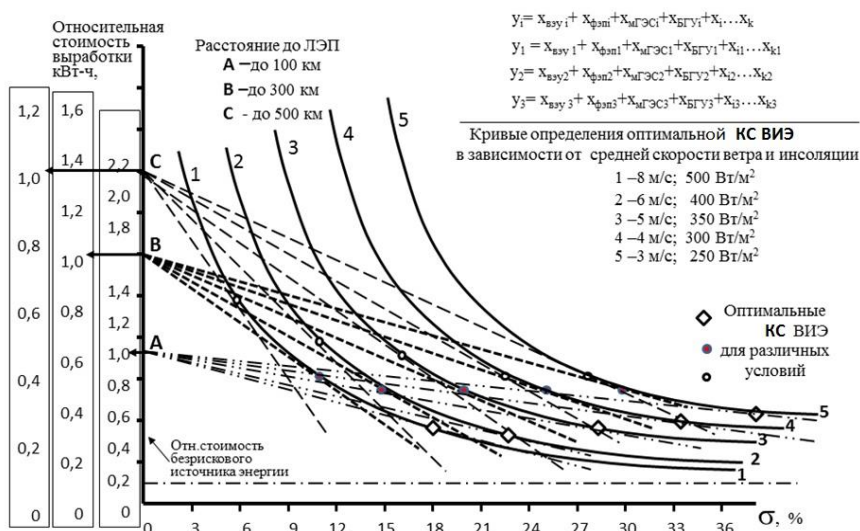


Рисунок 11. График для определения оптимальных мКС ВИЭ в зависимости от относительной стоимости выработки кВт·ч, как функции расстояния до централизованных источников энергии (ЛЭП), актинометрических и ветровых характеристик на территории потребителя

относится к соответствующему уровню относительной стоимости выработки 1 кВт·ч и может быть (в принципе) оценена в абсолютных единицах для конкретного региона расположения мКС ВИЭ.

В случае одновременного использования безрискового (ДГ) и рискованных источников оптимальная мКС ВИЭ определяется линией луча из точек А, В, С к соответствующим гиперболам до точки касания с последними.

Рекомендованные участки территорий Свердловской области с рассчитанными оптимальными по составу оборудования мКС ВИЭ (А – Восточное предгорье Уральских гор; В, С – разноудаленные районы Уральского хребта, Д – равнинные участки северной части области) показаны на рис. 12.

Возможность определения оптимального состава мКС ВИЭ для конкретной территории и с учетом потребностей заказчика является важным стимулирующим фактором для повышения интереса потребителей к возобновляемым источникам энергии, ускорения их внедрения и реализации намеченных индикаторов в развитии ВИЭ в Свердловской области и России.

Развитием данной работы стало создание отечественной программы расчета комплексной системы ВИЭ - программа ЭВМ «VizProRES». Достоинствами программы являются использование блока визуализации вырабатываемой каждым из видов ВИЭ энергии, определение конкретной номенклатуры оборудования и себестоимости выработки 1 кВт·ч.

На рисунке 13 представлен итоговый скрин-шот программы. Как и «АРК-ВИЭ», «VizProRES» прошла регистрацию в Федеральной службе по интеллектуальной собственности и апробацию при проектировании и эксплуатации реальных объектов с применением микрогенерирующих комплексных систем ВИЭ.

5 руб. за каждый вырабатываемый на объекте (за счет ВИЭ) 1 кВт·ч энергии. На рис. 11 представлена геометрическая интерпретация поиска оптимальной мКС ВИЭ.

Оптимальная мКС ВИЭ, в отсутствие безрискового источника, находится в точке касательной, исходящей от уровня относительной стоимости выработки 1 кВт·ч на безрисковом источнике энергии (ДГ) (точки А; В; С), к соответствующей гиперболе (1–5). При этом, каждая из трех шкал оси ординат



Рисунок 12. Карта Свердловской области с участками территорий (А, В, С, Д), соответствующими оптимальным мКС ВИЭ

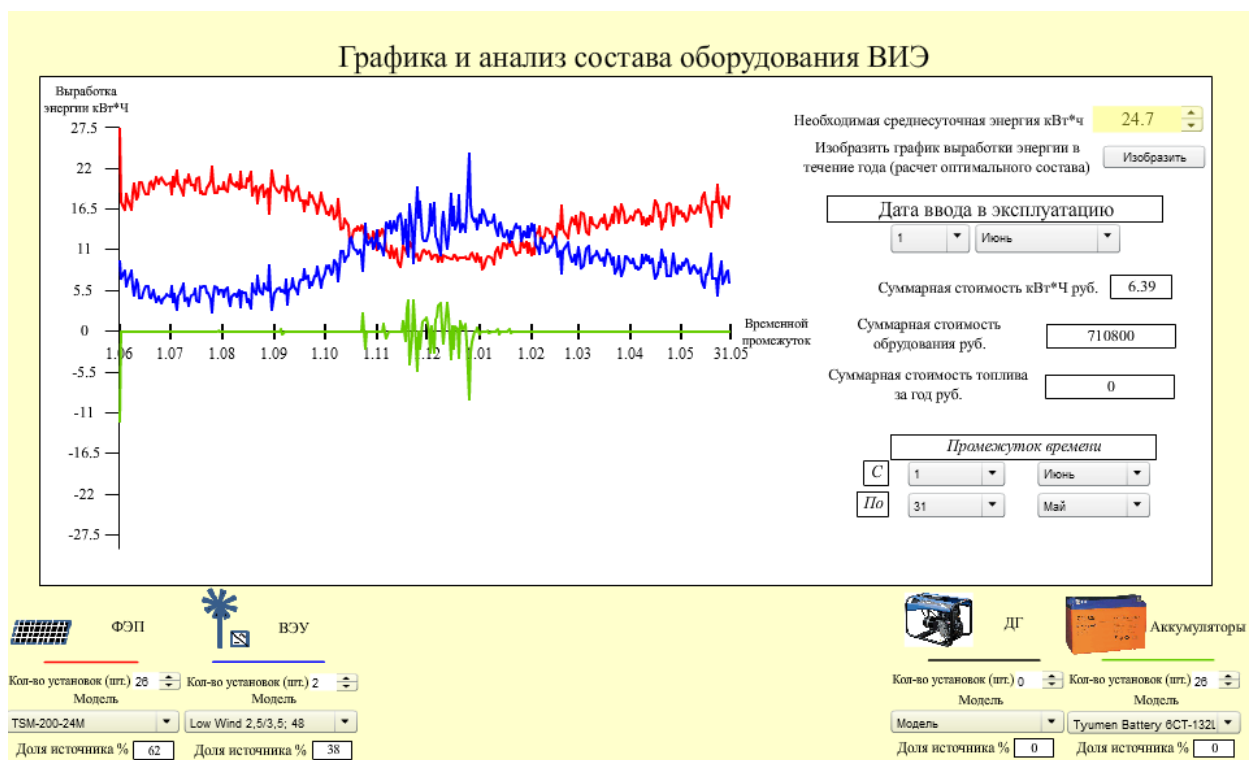


Рисунок 13. Скрин-шот программы расчета мкс ВИЭ «VizProRES»

В главе 4 представлены результаты исследований ресурсного потенциала Свердловской области по различным видам возобновляемых источников энергии и рассмотрены возможности использования различных мкс ВИЭ.

В ходе многолетних исследований, выполняемых с участием диссертанта, был определен экономический потенциал возобновляемых источников энергии Свердловской области, который представлен в таблице 5.

Ресурсный энергетический потенциал ВИЭ Свердловской области

Табл. 5.

№	Параметры	млн. т у. т. / год	%
1	Общее ежегодное потребление ТЭР по Свердловской области	50–52	100 %
2	Ветроэнергетика	0,3	0,6 %
3	Солнечная энергетика		
3а	Солнечные коллекторы (т)	0,8	1,6 %
3б	Солнечные ФЭП (э)	0,005	0,01 %
4	Гидроэнергетика (малая)	0,2	0,4 %
5	Сбросное тепло (предприятия и ЖКХ)	4,0	8 %
6	Биомасса (отходы животноводческих предприятий)	0,3	0,6 %
7	Всего потенциал ВИЭ (экономический)	5,65	11,3 %

Министерством Энергетики и ЖКХ Свердловской области в 2011 году утверждена «Стратегия развития топливно-энергетического комплекса Свердловской области на период до 2020 года» (Приказ Министра № 50 от 15.06.2011).

Разработка основных направлений и мероприятий «Стратегии» по разделу возобновляемой энергетики Свердловской области осуществлялась при непосредственном участии кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ. Основной вклад при разработке раздела 4.6 «Возобновляемые источники энергии» «Стратегии...» внесли заведующий кафедрой АС и ВИЭ, доктор технических наук, профессор С. Е. Щеклеин и автор данной работы.

В разделе 1 главы 4 рассмотрен ветропотенциал в районе объекта «Энергоэффективный дом» и проведен анализ эффективности использования ветроэнергетических установок в составе мкс ВИЭ для нужд удаленного дома в сельской местности на территориях с

резко-континентальным климатом. В основу расчетов легли теоретические и практические разработки известных специалистов в области ветроэнергетики Безруких П.П., Харитонов В.П., Николаева В.Г. и др.

Результаты исследований показали, что обеспеченность скорости ветра для тихоходных ВЭУ ($z < 2$) составляет в районе расположения «Энергоэффективного дома» (для 3–5 м/с) 0,15–0,2, а в зонах вершин Уральского хребта (для ветров 5–6 м/с) – 0,5–0,6.

Это позволяет говорить о необходимости поиска, не смотря на наличие Атласа ветров, «месторождений» ветра, выборе типа ветроустановок (I или II класса) и принимать соответствующие решения для проектирования отдельных ВЭУ или ветропарков. Для различных мест расположения объекта искомые оптимальные значения долей установленных мощностей хдг и хвэу будут зависеть от условий окружающей среды (скорость ветра, распределение Вэйбулла для скорости ветра, класса открытости местности (по Милевскому) и от правильного выбора типа ветроустановки.

Исследование эффективности ВЭУ для удаленного децентрализованного объекта (на примере «Энергоэффективного дома») осуществлялись на двух разных типах ВЭУ: первого класса (крыльчатые с быстроходностью $Z < 2$ и горизонтальной осью) и 2-го класса (роторные с вертикальной осью, $Z < 2$).

Две ВЭУ 4–5–18 крыльчатого типа функционируют на объекте с 2003 г. (рис. 5.) Инновационная ВЭУ роторно-лепесткового типа была испытана в 2010–2012 гг. в НТЦ «Кардэя» (Екатеринбург) при участии УрФУ.

Ряд выводов по использованию ВЭУ на территориях с резко-континентальным климатом:

-ветровой потенциал для объекта может использоваться в течение всего года, однако носит нерегулярный характер и позволяет говорить об эффективности использования тихоходных ветроустановок с КИУМ не более 13–15 %.

-ВЭУ в составе мКС ВИЭ уже при скорости ветра 4–5 м/с и выше выполняет одну из ключевых функций, осуществляя работу по выработке электроэнергии в любое время суток в течение года.

-быстроходные ВЭУ с $Z > 3$ (одно, двух и трехлопастные) при данных характеристиках ветра (3–5 м/с) непригодны.

В разделе 2 главы 4 представлены результаты исследований использования солнечных установок в составе мКС ВИЭ для выработки тепловой и электрической энергии в «Энергоэффективном доме». Для выработки электроэнергии использованы панели ФЭП производства Всероссийского института электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ, г. Москва), суммарной пиковой мощностью 2,4 кВт (80 солнечных панелей). В основу расчетов по ФЭП легли теоретические работы Стребкова Д.С., Харченко В.В., Арбузова Ю.Д., Евдокимова В.М., Безруких П.П., Попеля О.С. и др..

На объекте «Энергоэффективный дом» была проведена серия исследований по влиянию уровня (высоты) снежного покрова на эффективность ФЭП.

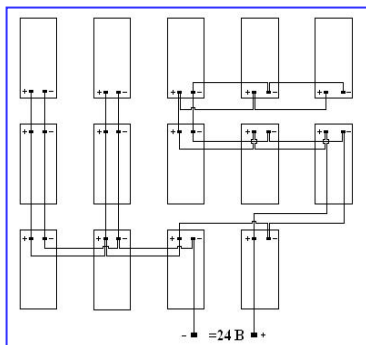
Исследования подтвердили, что использование вертикальной (рис. 14) ориентации солнечных ФЭП для районов со снежными осадками в период вероятного выпадения снега существенно эффективнее заснеженных ФЭП, отслеживающих движение солнца по горизонту, и тем более, чем классическая строгая ориентация, учитывающая широту местности.

Было продемонстрировано, что строго вертикальное расположение гарантирует зимой функционирование ФЭП при любом уровне снежных осадков на территории. На рис.15 представлена



Рисунок 14. Монтаж ФЭП с вертикальным расположением на объекте «Энергоэффективный дом»

ФЭС с углом наклона 15 % и схема коммутации ее ФЭП на крыше объекта «Энергоэффективный дом».



Подобное расположение ФЭП в районах с высоким значением ГСОП практически исключает в зимний период зарядку АКБ ввиду устойчивого снежного покрова.

Рисунок 15. Фото ФЭС $N_{\text{пик}} 420 \text{ Вт}$ и схема коммутации ФЭП

В ходе экспериментов было показано, что при вертикальном расположении в случае использования ФЭС $N_{\text{пик}}=150 \text{ Вт}$ в зимнее время автоматика газового котла на второй день автономной работы энергокомплекса ФЭП+АКБ начинала «испытывать проблемы» из-за недостаточного напряжения АКБ (инвертор не сможет поддерживать стандартное напряжение (220В, 50 Гц) при напряжении на аккумуляторе менее 24 В). На рис. 16 представлен пример графика подзарядки АКБ.

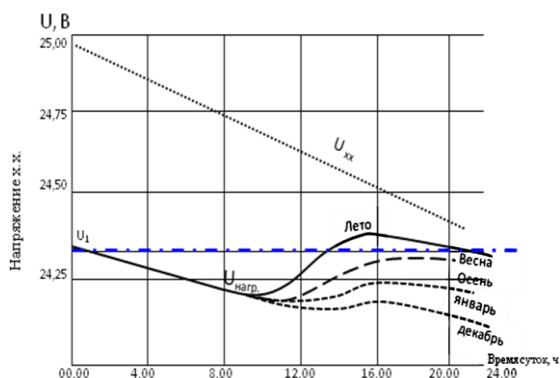


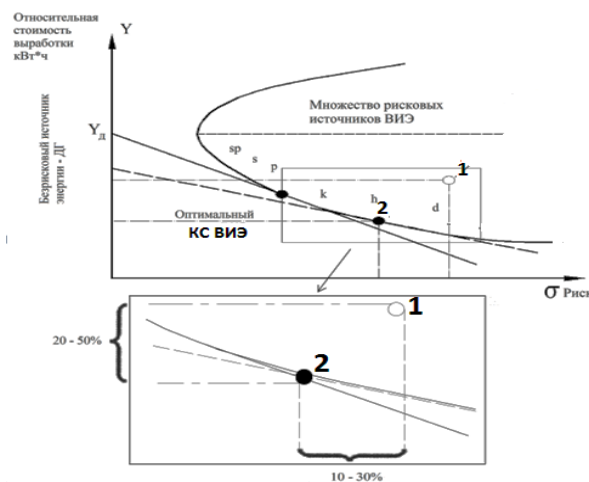
Рисунок 16. Влияние времени года на эффективность заряда АКБ емкостью 45 Ач от солнечной станции ФЭП $N_{\text{пик}} 150 \text{ Вт}$

Из графика очевидно: в летнее время при функционировании автоматики газового котла от системы «ФЭП-инвертор» аккумуляторная батарея 45Ач в течение дневного времени «успевает» с уровня 65–70 % полностью подзарядиться.

В зимний период, из-за сокращения светового дня, АКБ емкостью 45 Ач «не успевает» полностью зарядиться от станции ФЭП пиковой мощностью 150 Вт. При этом необходимое расположе-

ние панелей ФЭП в зимний период во всех районах с резкоконтинентальным климатом России – строго вертикальное. Пример эффектив-

тивности применения программы расчета «АРК-ВИЭ» демонстрирует геометрическая интерпретация оптимальной (расчетной) МКС ВИЭ и поставляемой в составе оборудования, импортируемого из КНР (рис. 17).



1 КС ВИЭ (КНР)	Кол-во	Стоимость (руб.) за ед.
Солнечные панели 150 Вт	10	9231
Ветрогенератор 400 Вт	1	17190
Контроллер 30 А 48 В	1	18989
Аккумулятор 2 В 50 Ач	24	9557
Инвертор 3 кВт 48 В	1	32181
Общая стоимость системы		390038
2 КС ВИЭ (РФ)	Кол-во	Стоимость (руб.) за ед.
Солнечные панели 150 Вт	4	9231
Ветрогенератор 800 Вт	2	17190
Контроллер 30 А 48 В	1	18989
Аккумулятор 12 В 200 Ач	4	18557
Инвертор 3 кВт 48 В	1	32181
Общая стоимость системы		223924

Рисунок 17. Графическая визуализация эффективности штатного комплекта d -МКС ВИЭ КНР (1) и оптимизированной по программе «АРК-ВИЭ» МКС ВИЭ (2) того же производителя.

Результаты сравнения выработки электроэнергии мКС ВИЭ Китая и «оптимизированной» мКС ВИЭ России, представлены в таблице 6.

Табл. 6

Показатель (рассчитан для условий Уральского региона)	КНР	АРК-ВИЭ
Выработка эл. энергии в зимний период (декабрь), кВт·ч/мес.	40	92
Выработка эл. энергии в летний период (апрель-сентябрь) кВт·ч/мес.	159,9	101,0
Общая стоимость d-комплексной системы ВИЭ (тыс. руб.) (ВЭУ+ФЭП)	390	224

Из таблицы видно, что комплект поставляемого из КНР оборудования без оптимизации ВЭУ и ФЭП по мощности – в два раза дороже, а выработка им электроэнергии (в зимний период) в условиях Уральского региона более чем в два раза ниже оптимизированного с помощью предложенного алгоритма расчета мКС ВИЭ.



Рисунок 18. Солнечные коллекторы на объекте «Энергоэффективный дом»

Солнечная энергия, помимо прямого преобразования на ФЭП, использовалась на объекте для выработки тепла солнечными коллекторами производства Каменск-Уральского металлургического завода (Свердловская обл.) (рис. 18).

В разделе 3 главы 4 представлены результаты экспериментального исследования эффективности системы производства тепловой энергии для условий резко континентального климата, характерного для Урало-Сибирской климатической зоны. В основу расчетов СК легли теоретические и экспериментальные разработки в области использования солнечной энергии Стребкова

Д.С., Безруких П.П., Бутузова В.А., Амерханова Р.А., Тарнижевского Б.В. и др..

Показатели нагрузки, рассчитанные для экспериментального энергоэффективного дома в пос. Растущий, представлены на рис. 19 и 20.

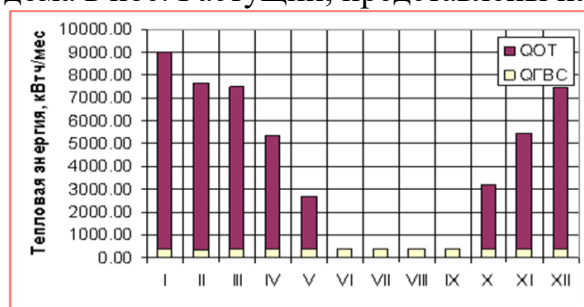


Рисунок 19. Суммарная тепловая нагрузка системы

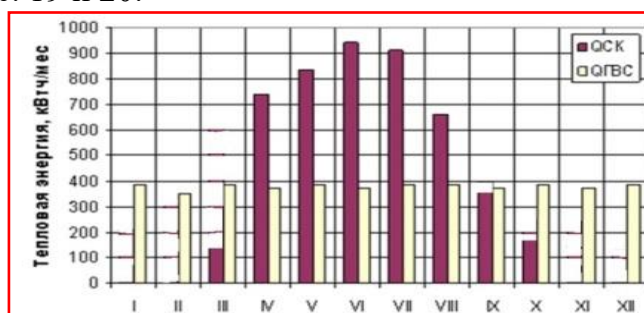


Рисунок 20. Тепловая энергия, отпущенная СК

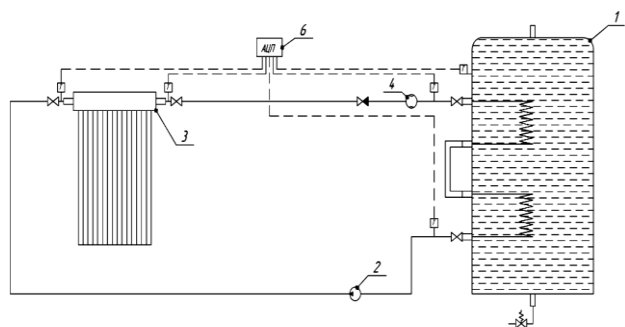


Рисунок 21. Принципиальная схема установки для исследования эффективности вакуумного солнечного коллектора в натуральных условиях 1 – двухконтурный бак-аккумулятор объемом 250 литров; 2 – циркуляционный насос Wilo 48 Вт; 3 – вакуумный солнечный коллектор Ariston Kairos VT-15; 4 – расходомер; 5 – арматура; 6 – аналого-цифровой преобразователь

Экспериментально полученные данные подтвердили потенциальную возможность обеспечения за счет солнечных коллекторов потребностей в ГВС в период с марта по сентябрь (включительно).

В ходе исследований в условиях Уральского региона были апробированы, помимо плоских СК, солнечные коллекторы с вакуумными трубками: определялись приходы солнечной радиации, изменение тепловых характеристик элементов, энергетическая производительность и эффективность установки, общая схема которой представлена на рис. 21. Исследования энергетических характеристик установки имели длительный (многочесный) характер, сбор и накопление информации, как по приходу солнечной радиации, так и по температурным характери-

кам, был максимально автоматизирован.

Температурные характеристики системы вакуумных коллекторов при запуске в зимний период показаны на рис. 22.

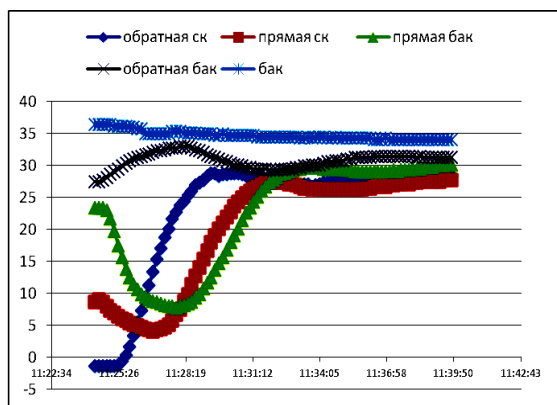


Рисунок 22. Температурные характеристики системы вакуумных коллекторов

Возможность применения СК_{вак} в зимний период подтверждается нагревом прямой нитки теплоносителя за непродолжительный промежуток солнечного дня с +8 до +30°C.

Для исследования радиационных характеристик применялись два независимых автоматических метеорологических комплекса «Vantage PRO-2» (фирма Davis, США), регистрирующих прямую и рассеянную радиацию, температуру и влажность окружающей среды, силу и направление ветра в автоматическом режиме с сохранением данных в памяти компьютера.

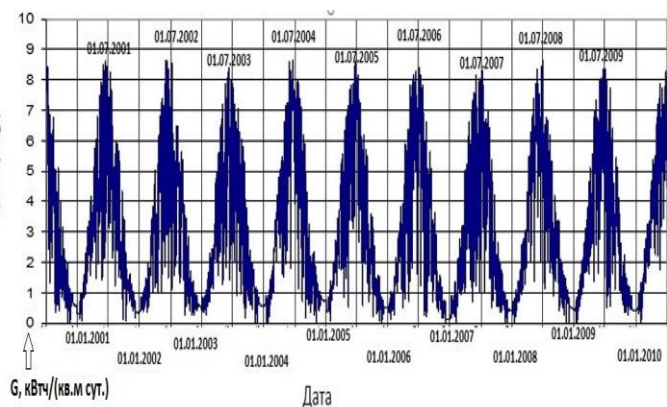


Рисунок 23. Данные по приходу солнечной радиации в многодневном цикле

Солнечные коллекторы имели южную ориентацию и стационарный угол наклона к горизонту 45°. Характерные данные по измерению приходов солнечной радиации в районе расположения «Энергоэффективного дома» приведены на рис. 23.

Внешний вид графика показывает наличие циклической (суточной) составляющей прихода энергии солнца, однако маскирует стохастический характер, связанный с облачностью, прозрачностью атмосферы и прочими факторами.

На рис. 24 приведен детальный суточный график прихода солнечной радиации, учитывающий упомянутые выше явления.

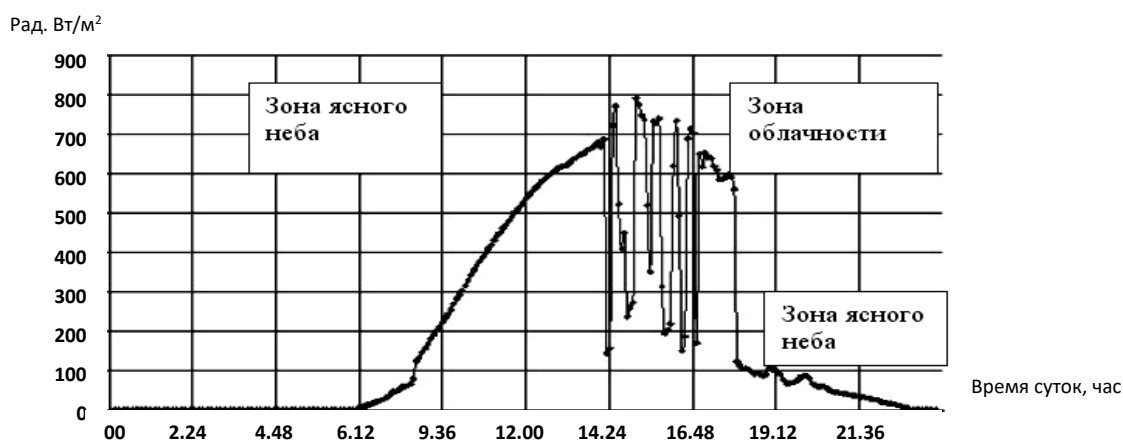


Рисунок 24. Характерный суточный график прихода солнечной радиации

На рис. 25 представлены данные суточных графиков изменения температур в системе «солнечный коллектор – бак-накопитель», записанные с использованием системы дистанционного мониторинга установок ВИЭ «National Instruments».

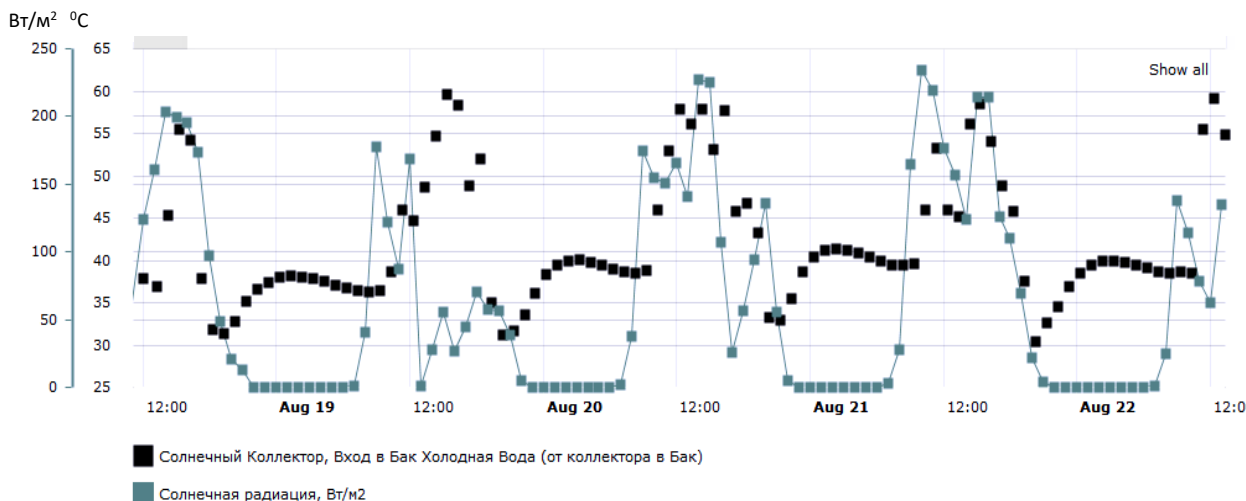
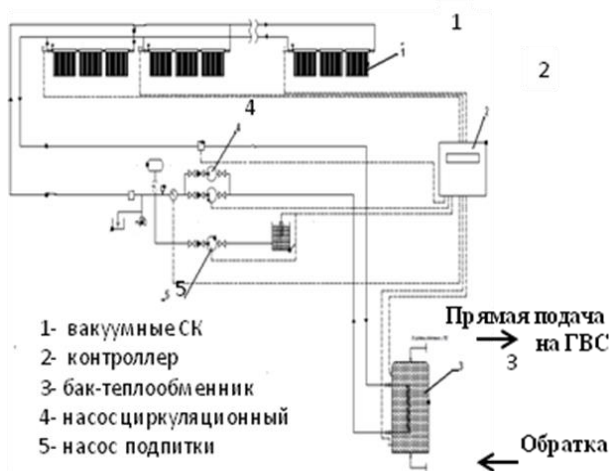


Рисунок 25. Суточные графики изменения температур в системе «солнечный коллектор – бак-накопитель»

В апреле 2012 г. в УрФУ, на основе расчетов и полученных экспериментальных данных, разработана схема и выполнен монтаж вакуумных солнечных коллекторов на 10-этажном многоквартирном доме в Екатеринбурге. Схема функционирования системы солнечных вакуумных коллекторов представлена на рис. 26.



достижение высоких температур, поскольку теплоноситель не успевает прогреться через 1 коллектор.

Рисунок 26. Схема подключения вакуумных СК к штатной системе отопления и ГВС 10-тиэтажного дома (Екатеринбург)



Рисунок 27. Монтаж вакуумных солнечных коллекторов на 10-ти этажном доме в мегаполисе (Екатеринбург, ул. Родонитовая, д. 8, июнь 2012 г.)

Система состояла из 21 коллектора на 30 вакуумных трубок и 28 коллекторов на 10 (общее количество трубок: 910). Все трубки соединены в секции по 90 единиц каждая (допускаются 80 и 100 соответственно). Таким образом, в систему входят 10 параллельно подключенных к магистральным трубопроводам секций СК.

Параллельное присоединение коллекторов имеет такие плюсы, как возможность вывода в ремонт, меньшие потери давления, однако при этом требуется большее количество труб присоединения.

При таком соединении не всегда возможно теплоноситель не успевает прогреться через 1 коллектор.

Процесс монтажа вакуумных СК на доме в мегаполисе приведен на фото (рис. 27).

В случае последовательного соединения возможно при малом расходе догревать рабочую жидкость до необходимых параметров, однако в этом случае необходимо учитывать большие потери давления, а также вывод из строя всей системы при неисправности одного коллектора.

Был выполнен расчет эффективного угла наклона СК для круглогодичного стационарного использования системы вакуумных коллекторов. Для гелеосистем, основной задачей которых служит отопление, наиболее целесообразным являются

«зимние» углы (от 60 до 75°). Так, для угла наклона СК 65° в январе генерируемая мощность составляет порядка 400 Вт/м² (рисунок 28), тогда как в аналогичное время для угла в 10 градусов $I_H = 180$ Вт/м². Дальнейшее увеличение угла нецелесообразно, так как при угле в 90° $I_H = 415$ Вт/м² для января, при этом в летний период будет значительный недобор энергии, поскольку солнечное излучение попадает на вертикальную поверхность лишь частично.

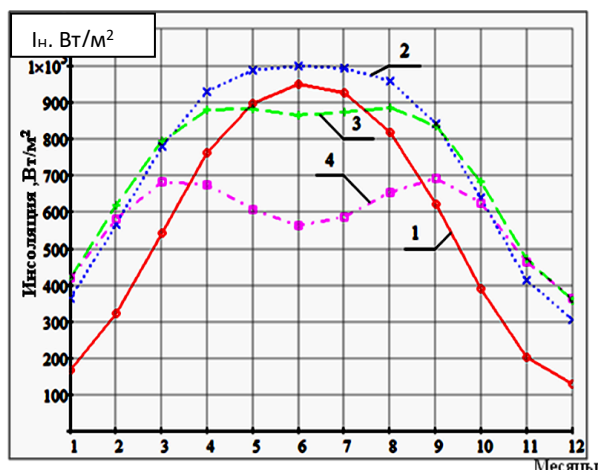


Рисунок 28. Расчетная зависимость мощности потока солнечной радиации от месяца года для углов наклона СК: 1 – 10°; 2 – 45°; 3 – 65°; 4 – 90°

Расчетная годовая прибыль при использовании солнечных вакуумных коллекторов для 10-ти этажного дома (250 квартир) на параллели 58° с.ш. составила около 180 тыс. руб. при цене 1 Гкал 900 руб., что соответствует 12–15 % всех затрат на отопление и ГВС. Таким образом, использование солнечных коллекторов в средней полосе России может покрыть в летние месяцы нужды на ГВС для потребителя автономного децентрализованного объекта.

Использование СК в составе КС ВИЭ обеспечивает повышение надежности и эффективность теплоснабжения и ГВС в период «весна-лето-осень», а также снижает расход более качественной электроэнергии.

В разделе 4 главы 4 представлен анализ возможностей гидроэнергетического потенциала Свердловской области, проведено исследование особенностей малой гидроэнергетики для включения в энергобаланс местных и территориальных образований и рассмотрен вариант использования микро-ГЭС в составе мКС ВИЭ (на примере «Энергоэффективного дома»).

В основу расчетов гидроэнергетического потенциала Свердловской области легли теоретические работы известных российских специалистов Васильева Ю.С., Елистратова В.В., Сидоренко Г.И., Виссарионова В.И. и др..

В результате исследований и расчетов, выполненных при участии диссертанта на кафедре «Атомные станции и ВИЭ» УрФУ, было установлено, что на 18 тысячах рек Свердловской области для малых ГЭС возможно использование 320 существующих гидротехнических сооружений (ГТС). Из них на 80-ти ГТС малые ГЭС уже сегодня могут быть экономически выгодны.

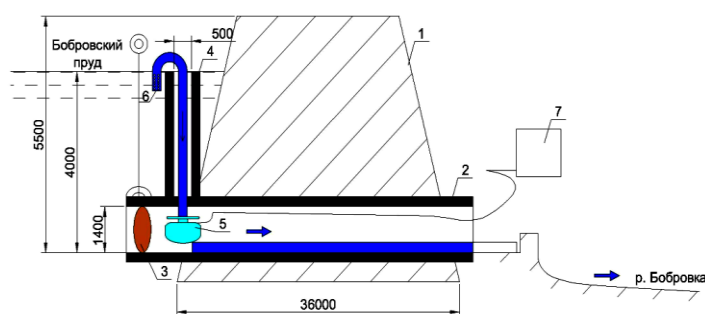


Рисунок 29. Схема микро-гидроэлектростанции с сифонным водозабором на Верхне-Бобровском пруду близ «Энергоэффективного дома» (1 – плотина В-Бобровского пруда; 2 – сливной ствол трубы D 1400 мм; 3 – гидрозатвор регулирующего сброса; 4 – труба-сифон поддержания уровня зеркала пруда; 5 – микроГЭС; 6 – сифонный рукав

Использование микро-ГЭС в составе мКС ВИЭ было реализовано на Верхне-Бобровском пруду, расположенном в 0,5 км от «Энергоэффективного дома». Организация подачи воды на турбину и схема гидротехнического сооружения для установки микро-ГЭС представлена на рис. 29. Мощность микро-ГЭС составляла 1,5 кВт. Забор и подача воды на турбину «банки» микро-ГЭС осуществлялись посредством сифонного рукава d=200 мм, при напоре 3,8 м.

Оптимальные соотношения долей установленных мощностей оборудования в составе мКС ВИЭ с применением микроГЭС были определены с использованием уже описанного алгоритма и программы автоматического расчета «АРК-ВИЭ».

Существующие вблизи каждого поселка пруды могут быть использованы для выработки электроэнергии на микро- и мини ГЭС посредством легко возводимых водозаборов сифонного типа. Микро- и мини ГЭС могут быть применены в районах с высоким значением ГСОП в составе любой мКС ВИЭ в течение трех из четырех кварталов года.

По итогам расчетов, выполненных в УрФУ с участием диссертанта, были определены 14 малых ГЭС, которые вошли в распоряжение Правительства Свердловской области №261-РП «О развитии малой гидроэнергетики» от 02.04.2004г. В 2009 г. состоялся пуск Киселевской мини-ГЭС мощностью 200 кВт, в 2011 Верхне-Сысертской мГЭС N=100 кВт и в 2012 г. Нижнеиргинской мГЭС N=100 кВт (реконструирована в 2016 г.).

В целом анализ гидрологических данных ГТС водохранилищ Свердловской области показал, что существующие стоки позволяют разместить на них малые ГЭС суммарной мощностью не менее 55 МВт и осуществлять производство не менее 200 млн. кВт×час. электроэнергии ежегодно.

Использование мГЭС в составе мКС ВИЭ в случае наличия водохранилища возможно и эффективно в Уральском регионе в течение года, а при наличии пруда или реки – в период с мая по октябрь.



Рисунок 30. Фото БГУ-1,5 УрФУ. На переднем плане – блок вспомогательных устройств с системой управления

В разделе 5 главы 4 представлено исследование биоэнергетического потенциала Свердловской области на основе использования отходов сельскохозяйственных животноводческих комплексов. В основу расчетов биоэнергетического потенциала легли теоретические и экспериментальные разработки известных российских специалистов Панцхавы Е.С., Ковалева А.А. и др..

Было проведено экспериментальное исследование эффективности биогазовой установки в составе мКС ВИЭ для нужд удаленного сельского дома.

Для исследований эффективности режимов метангенерации, в УрФУ была смонтирована БГУ-1,5 (рис. 30), которая использовалась на полигоне нетрадиционных и возобновляемых источников энергии УралЭНИН.

Пуск опытной биогазовой установки физическим объемом метантенка 1,5 куб. м был осуществлен в УрФУ в июле 2002 г. при поддержке специалистов ВИЭСХ.

Исходное сырье – жидкий навоз КРС, доставлялось к биореактору из ЗАО «Тепличное» (г. Екатеринбург) в контейнерах емкостью по 50 л каждый и очищалось от посторонних включений, в основном, подстилочной соломы.

В результате исследований было показано, что использование биогазовых технологий в РФ на территориях с высоким уровнем ГСОП требует создания специальных конструкций биогазовых установок с рекуперацией тепла воды и высокой степенью тепловой защиты. Достоинство БГУ в составе мКС ВИЭ заключается в отсутствии стохастичности обеспечения сырьем (пометом) при условии стабильной работы с/х фермы (форс-мажором может быть забой скота по предписанию санитарных служб).

В целом, анализ биоэнергетического потенциала Свердловской области показал, что птицепром, насчитывающий около 15 млн. голов птицы (второй в РФ), может покрыть собственные энергетические нужды хозяйств за счет отходов животноводческого производства на них.

Если же рассматривать биогазовые технологии с позиции экологии, нейтрализации и обезвреживания отходов животноводческих ферм, то их использование, несмотря на низкие коэффициенты энергетической эффективности в зимний период (ввиду поддержания мезофильного режима метангенерации), оправдано в течение всего года.

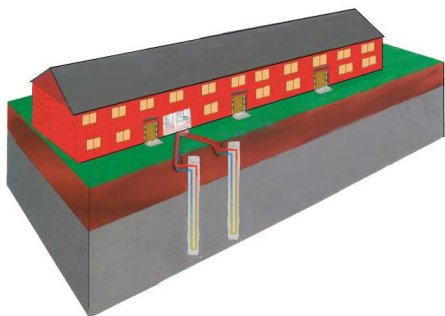


Рисунок 31. Разрез по линии размещения вертикальных зондов испарительных каналов теплонасосной установки «Энергоэффективного дома» для одной квартиры (Глубина скважины для зонда – 70-100 м; теплотъем с 1-го п.м. скважины - 30-45 Вт/час)

В разделе 6 главы 4 представлены результаты исследований эффективности использования теплового насоса в составе мКС ВИЭ.

В основу расчетов по использованию геотермального тепла легли теоретические работы известных российских специалистов Алексеенко С.В., Поварова О.А., Томарова Г.В., Низовцева М.И. и др..

Схема размещения грунтового зонда для использования теплового насоса на удаленном децентрализованном объекте «Энергоэффективный дом» представлена на рис. 31.

Графики тепловой нагрузки одной квартиры «Энергоэффективного дома» по месяцам года и по продолжительности в течение года представлены на рис. 32.

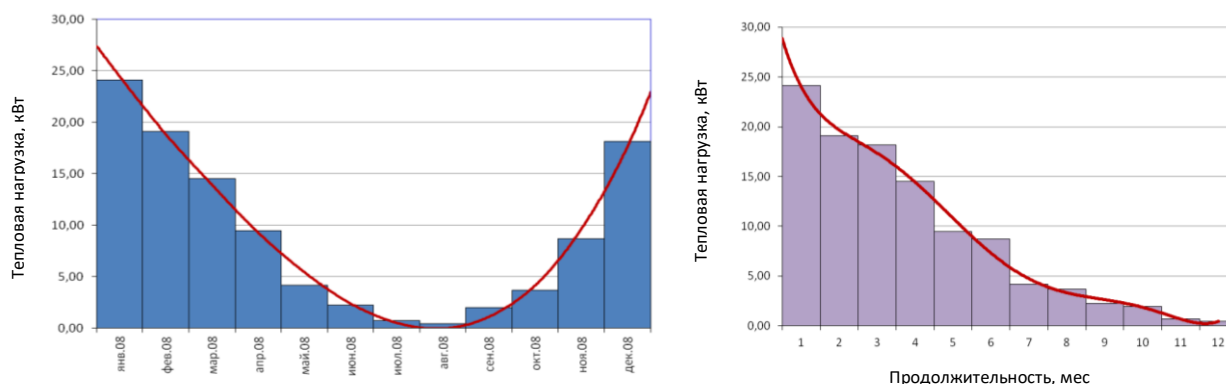


Рисунок 32. График тепловой нагрузки одной квартиры ЭЭД по месяцам и по продолжительности

Тепловой насос за счет использования «бесплатного» низкопотенциального тепла грунта, воды, воздуха в 3,5–4 раза выгоднее прямого электрообогрева и по итогам зимних периодов 2013–2017 гг. (впервые с 2005 г.) показал 1,5-кратное преимущество по сравнению с эксплуатационными затратами штатного газового котла (за счет существенного повышения тарифов на газ с 01.07.2013 г.).

Кроме того, скважины с грунтовыми зондами для использования низкопотенциального тепла в летнее время могут «реабилитироваться», выполняя функцию конденсатора для сброса тепла от теплового насоса, переведенного (используя реверсивную функцию) в режим кондиционера. В пики солнечной энергии фотоэлектрические преобразователи в составе мКС ВИЭ могут направлять все излишки энергии на компрессор ТН для функционирования «бесплатной» системы кондиционирования. Применение ТН в составе мКС ВИЭ позволяет использовать низкопотенциальное тепло и повышать эффективность энергосистемы в целом.

В главе 5 рассматривается влияние инновационных решений и разработанных на их основе устройств для повышения эффективности мКС ВИЭ.

Энергетические нагрузки, создаваемые ВИЭ, в сравнении с генерацией в традиционных энергетических системах (ТЭС, АЭС, ГРЭС, ГЭС), существенно меньше. Это обстоятельство определяет «борьбу» за энергосбережение, повышение

эффективности использования каждого Вт \times ч, рост к.п.д.ВИЭ, повышение теплоотдачи и требует разработки новых способов и устройств для их реализации.

Для демонстрации эффективности мКС ВИЭ не только на стадии производства, но и при передаче тепловой энергии, в главе приведены экспериментальные результаты исследований запатентованных автором способов повышения энергетической эффективности теплообменного оборудования.

На экспериментальном стенде (рис. 33) исследовалось влияние наложения низкочастотных колебаний на теплоотдачу от нагреваемой поверхности к гравитационной пленке жидкости, стекающей по плоской стенке имитатора солнечного коллектора.

Результаты экспериментов показали, что воздействие на расход жидкости с частотой 3–7 Гц повышает теплоотдачу на 12–25% (рис. 34, 35). Указанный эффект может быть использован для повышения эффективности солнечных коллекторов со стекающей пленкой, в том числе в составе мКС ВИЭ.

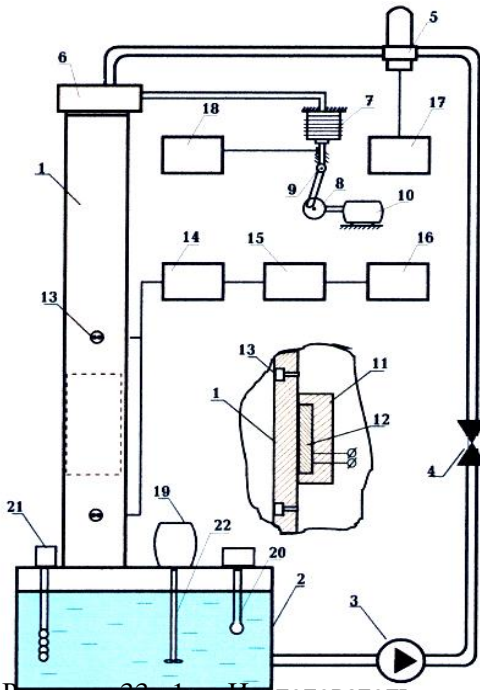


Рисунок 33. 1 – Исследовательский канал-плоская стенка (имитатор солнечного коллектора); 2 – термостат; 3 – насос; 4 – задвижка; 5 – эл. ротаметр; 6 – щелевое распределительное устройство; 7 – пульсатор; 8 – редуктор; 9 – кривошип; 10 – эл. двигатель; 11 – нагреватель; 12 – теплоизоляция; 13 – датчик толщины пленки; 14 – эл. мост; 15 – осциллограф; 16 – самописец; 17 – вторичный прибор; 18 – частотомер; 19 – эл. двигатель мешалки; 20 – холодильник; 21 – кипятильник; 22 – мешалка

В качестве устройства, создающего колебания стекающей жидкости с указанной частотой, был выбран, экспериментально апробирован и запатентован роторный пульсатор.

Основными достоинствами указанного типа пульсатора явились малое энергопотребление при создании пульсаций и простота конструкции. Недостатком – необходимость механического (электрического) привода.

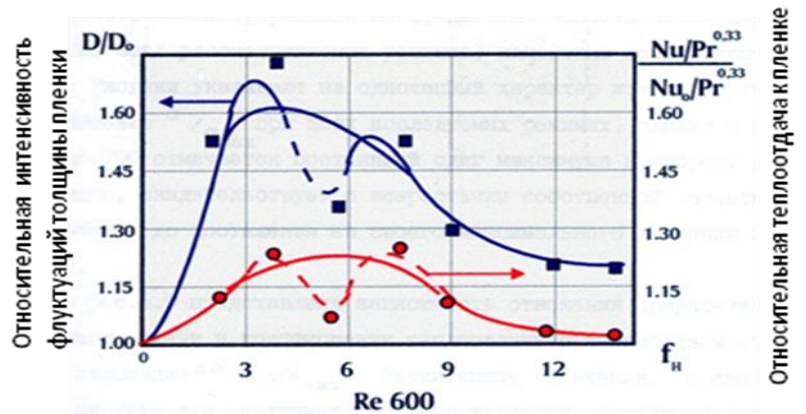


Рисунок 34. Экспериментальные зависимости интенсивностей (дисперсий) флуктуаций толщины пленки и теплоотдачи от частоты наложенных возмущений

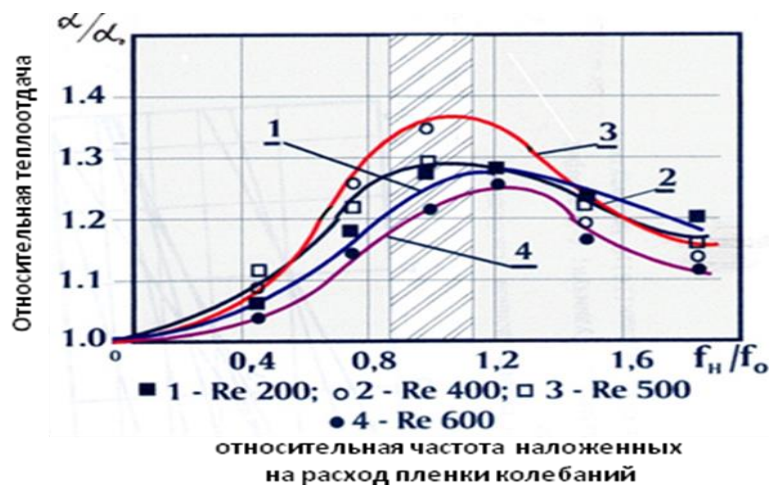


Рисунок 35. Зависимость относительной теплоотдачи от относительной частоты наложенных колебаний стекающей пленки.

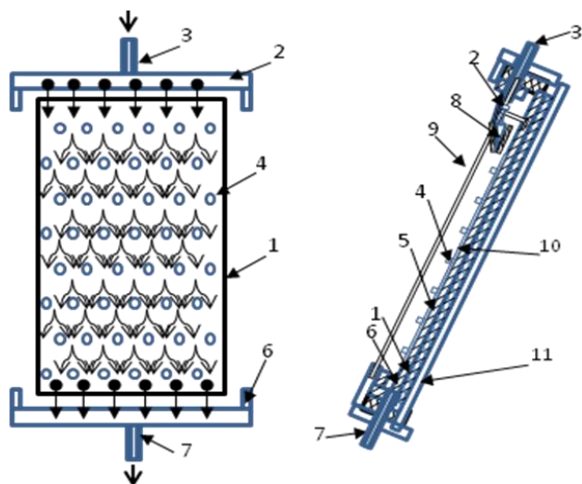


Рисунок 36. Солнечный коллектор со стекающей пленкой жидкости (1 – корпус СК; 2 – щелевое распределительное устройство; 3 – вход теплоносителя; 4 – волнообразователи; 5 – поверхность СК; 6 – накопитель; 7 – выход нагретой воды; 8 – конфузор; 9 – стекло; 10 – теплоизолятор; 11 – задняя стенка корпуса)

Практическая реализация эффекта влияния наложенных колебаний пленочного течения на повышение теплообмена в солнечном коллекторе представлена на рис. 36. Колебания стекающей пленки создаются в солнечном коллекторе посредством стационарных (пассивных) волнообразователей, расположенных в шахматном порядке (поз. 4).

Использование данной конструкции солнечного коллектора позволяет на 15–25 % снизить расход теплоносителя при достижении тех же характеристик по теплоотдаче.

Далее в главе 5 рассмотрен вопрос повышения энергетической эффективности систем теплообмена за счет применения активных и пассивных устройств при течении теплоносителя в трубопроводах с учетом проблематики гидродинамики неоднородных потоков в поле действия объемных и стационарных сил. Двухфазное течение в трубопроводах энергетического оборудования реализуется в виде различных гидродинамических структур и проявляется в форме пульсаций основных параметров потока в геотермальных и теплонасосных системах. Максимальный уровень пульсаций газосодержания, скорости и давления соответствует снарядному режиму с прерывистой структурой потока, что служит причиной опасных вибраций трубопроводов.

Одной из задач исследований в рамках данного раздела главы являлся поиск способов и разработка устройств пассивного управления структурой газо-жидкостного потока, возникающего, например, на выходе добычных скважин геотермальных ЭС или в системах низкопотенциального тепла, подающегося на испаритель теплового насоса.

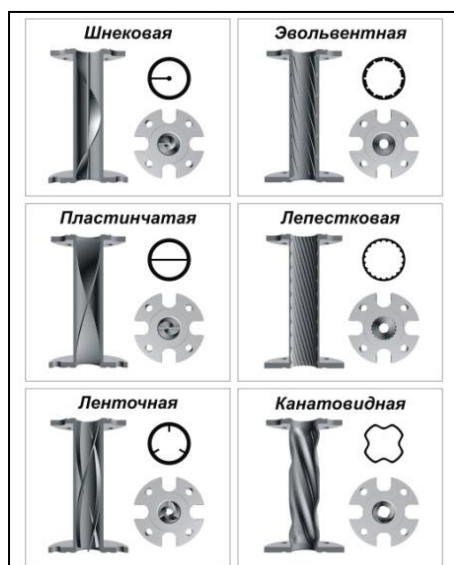


Рисунок 37. Конструкции вставок – завихрителей различной внутренней геометрии

В ходе экспериментальных исследований эффективности вставок-завихрителей были опробованы конструкции различных пассивных устройств (рис. 37).

Экспериментальные исследования эффективности воздействия различных типов вставок-завихрителей, относящихся к пассивным средствам снижения вибраций трубопроводов, показали, что использование вставок с эвольвентными поверхностными канавками является перспективным и обладает определенным преимуществом по сравнению с устройствами закрутки потока по всему сечению трубопровода с помощью вставок, перекрывающих всю ширину канала.

Исследования влияния закрутки двухфазного потока с помощью вставок-завихрителей проводились на гидродинамическом стенде с воздухо-водяным потоком, циркулирующим в замкнутом контуре из труб диаметром 40 мм с прозрачными секциями из оргстекла для визуализации режимов течения (рис. 38).

Подача воды осуществлялась из бака емкостью 2,0 м³ центробежным насосом с расходом воды до 30 м³/час и напором до 0,5 МПа. Воздух подавался из компрессора с тем же предельным расходом и давлением до 1,0 МПа.

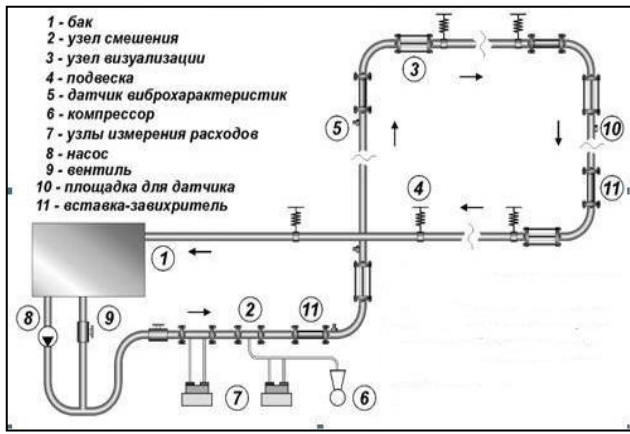


Рисунок 38. Экспериментальный стенд для исследований эффективности вставок-завихрителей

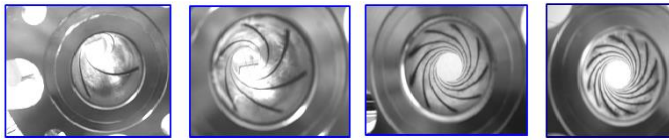


Рисунок 39. Завихрители с эвольвентными канавками (3, 6, 9, 12) и углом закрутки 180°

ской энергией закрученной части потока и энергией поступательного (осевого) потока на выходе из завихрителя:

$$\varepsilon = (tg \varphi)^2 nf/F_0; \quad tg \varphi = U_\varphi/U_0 \quad (12)$$

Где n – число канавок завихрителя; f и F_0 – значение суммарной площади поперечного сечения канавок и цилиндрического канала; U_φ и U_0 – тангенциальная и осевая скорости потока.

Гидравлические характеристики вставок-завихрителей находились по измерениям перепада давления в уравнении Дарси-Вейсбаха для однофазного потока:

$$\xi = 2 (d/L) (\Delta p/\rho U_0^2) \quad (13)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) вставки; d и L – гидравлический диаметр и длина вставки.

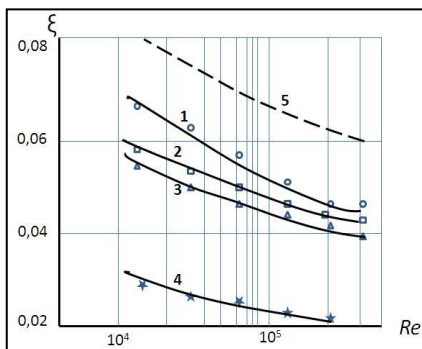


Рисунок 40. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления вставки завихрителя от числа Re (1, 2, 3 – вставки с числом канавок 6, 12 и 22; 4 – вставка с гладкими стенками; 5 – винтовая вставка с относительным шагом, соответствующим углу закрутки $\varphi = 65^\circ$)

Для образования устойчивого кольцевого слоя жидкости требуется определенная тангенциальная (окружная) скорость U_φ закрутки, зависящая при выбранном угле закрутки от осевой скорости потока U_0 или числа Рейнольдса жидкой фазы. Минимальное значение Re_m для выполнения этого условия можно оценить из аналитического выражения скорости вращения при получении полых заготовок в процессах центро-

В состав основной измерительной аппаратуры входили расходомеры типа Сапфир-22 DD, манометры, виброанализатор СД-12М для сбора и статистического анализа вибраций. Управление частотно-регулируемыми электроприводами насоса и компрессора вместе с измерительной аппаратурой осуществлялось микропроцессорной системой специально разработанного программного комплекса.

На рис. 39 представлены фото вставок-завихрителей с различной внутренней гео-

метрией завихряющих канавок. Размеры канавок составляли 2×2 мм при длине всей вставки 200 мм, причем угол закрутки канавок равнялся $\varphi = 65^\circ$ для всех вставок. Интенсивность закрутки потока определялась числом канавок на внутренней поверхности вставок, равным 3, 6, 9, 12, 22 и 30.

В качестве энергетической характеристики интенсивности закрутки использовалось соотношение между кинетической энергией закрученной части потока и энергией поступательного (осевого) потока на выходе из завихрителя:

$$\varepsilon = (tg \varphi)^2 nf/F_0; \quad tg \varphi = U_\varphi/U_0 \quad (12)$$

Где n – число канавок завихрителя; f и F_0 – значение суммарной площади поперечного сечения канавок и цилиндрического канала; U_φ и U_0 – тангенциальная и осевая скорости потока.

Гидравлические характеристики вставок-завихрителей находились по измерениям перепада давления в уравнении Дарси-Вейсбаха для однофазного потока:

$$\xi = 2 (d/L) (\Delta p/\rho U_0^2) \quad (13)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) вставки; d и L – гидравлический диаметр и длина вставки.

На рис. 40. приведены значения КГС вставок-завихрителей с различным числом канавок в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = U_0 d / \nu$ от 10^4 до 2×10^5 . Полученные данные по КГС обобщены степенной зависимостью 14:

$$\xi/\xi_0 = 1 + 2,65\varepsilon^{0,25} \quad (14)$$

где ξ_0 – КГС для вставки с гладкой внутренней поверхностью (без закрутки потока), практически совпадающей с формулой Блаузиса $\xi_0 = 0,316 / Re^{0,25}$

Здесь же приведены значения КГС для труб с винтовой вставкой, рассчитанные для относительного шага закрутки, соответствующего углу $\varphi = 65^\circ$.

Вставка-завихритель придает газо-жидкостному потоку вращательно-поступательное движение с интенсивностью, определяемой числом канавок и расходной скоростью потока. При снарядном режиме течения из жидкостной пробки формируется пристенный слой вдоль внутренней поверхности канала, т. е. режим течения становится близким к дисперсно-кольцевому.

бежного литья. В терминах двухфазного газо-жидкостного потока при равенстве истинного и объемного газосодержания условием образования устойчивого кольцевого слоя в горизонтальном канале служит выражение (15):

$$Re_m > (1,2 \pi / \operatorname{tg} \varphi) \sqrt{[gR_o^3 (1-0,14\beta)] / \nu^2 \beta^{0,5}} \quad (15)$$

где β – объемное газосодержание; R_o – радиус канала; g – ускорение силы тяжести; φ – угол закрутки потока на выходе вставки-завихрителя; ν – кинематическая вязкость жидкости.

Для условий опытного стенда с диаметром 40 мм и углом закрутки потока $\varphi = 65^\circ$ значения Re_m в соответствии с (15) составляли от $3,9 \times 10^4$ до $2,6 \times 10^4$ с увеличением объемного газосодержания от 0,2 до 0,7. Полученные значения Re_m характеризуют равновесный режим взаимодействия слоя жидкости с газовой областью, которая образуется в центральной части канала. Процесс сепарации (разрушения) жидкостной пробки требует большей интенсивности закрутки и, следовательно, больших значений чисел Re_m . Измерения значений вибрации трубопровода осуществлялись на вертикальных участках контура циркуляции за вставкой-завихрителем непосредственно за поворотным коленом.

Методика проведения измерений и обработка данных, включающих определение спектральных характеристик и среднеквадратичных значений (СКЗ) виброперемещений, приведена в работе. Заметное влияние закрутки двухфазного потока на уменьшение уровня вибраций наблюдалось при $Re > 10^5$. Как видно из рис. 41, характер изменения СКЗ виброперемещений определяется значениями газосодержания потока β и числом канавок вставки-завихрителя.

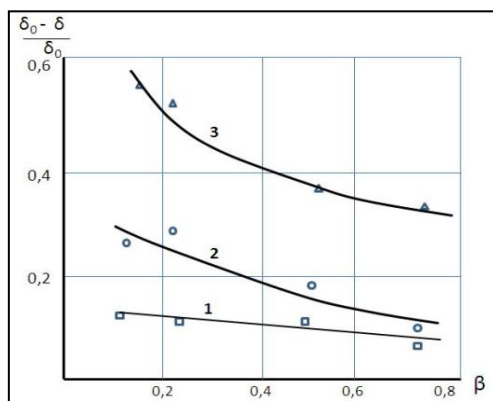


Рисунок 41. Относительное снижение СКЗ вибраций трубопровода опытного стенда в зависимости от газосодержания потока и типа вставки при $Re=4 \times 10^4$ 1, 2, 3 – вставки с 6, 12 и 22 канавками

Полученные данные аппроксимировались в виде СКЗ виброперемещений участка трубопровода с различными вставками-завихрителями δ по отношению к соответствующим значениям СКЗ для гладкой вставки δ_0 в виде:

$$\delta / \delta_0 = 1 - 6,75 Re_d^{-0,15} \beta^{-2\varepsilon} \varepsilon; \quad Re = 4G / \pi d \nu; \quad (16)$$

где G – объемный расход жидкости; d – диаметр трубопровода.

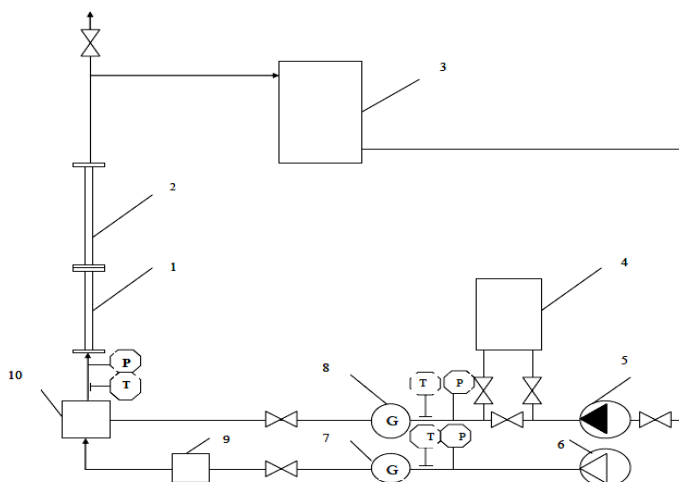
В диапазоне изменения расхода жидкости с $Re=4 \times 10^5 \dots 2 \times 10^6$ и объемного газосодержания $\beta = 0,1 \dots 0,7$ погрешность обработки данных по формуле (16) не превышала 25 %.

Значение ε в формуле (16) характеризует начальную энергию закрученного потока непосредственно за вставкой – завихрителем, которая расходуется не только на разрушение жидкостных пробок двухфазного потока, но и на преодоление дополнительного

гидравлического сопротивления из-за вращательной составляющей скорости в пристенной области в направлении течения. Эти факторы проявляются в снижении эффективности закрутки потока на уровень вибраций трубопровода с возрастанием числа Re .

Для исследований структуры завихрения по сечению трубопровода был создан экспериментальный лазерный стенд с принудительной циркуляцией теплоносителя и впрыском воздушной смеси для формирования различных режимов двухфазного течения (рис.42).

Рисунок 42. Схема экспериментальной установки. 1 – вставка-завихритель; 2- рабочий участок канала; 3 – бак; 4 –панель управления; 5 – насос; 6 – компрессор; 7 – расходомер по воздуху; 8 –расходомер по воде; 9 – демпфер; 10-узел смешения.



Стенд представляет из себя контур циркуляции теплоносителя (воды), оснащен устройством засева потока трассерами (генератор тумана Martin Magnum 1800). Установка позволяет проводить исследования режимов течения при числе Рейнольдса 10^4 - 10^6 , что обеспечивает применимость полученных результатов для анализа аэродинамики установок реального масштаба. Диагностика закрученного потока осуществлялась методом цифровой трассерной визуализации (PIV). PIV метод - полевой оптический метод измерения полей скорости жидкости и газа. Для измерения полей скорости в интересующих сечениях модели применялась PIV- система «Полис», разработанная в ИТ СО РАН.

Система позволяет измерять две компоненты вектора скорости одновременно во всем заданном сечении (D 50 мм). «Полис» включает в себя: двойной импульсный Nd:YAG-лазер Quantel EVG с энергией в импульсе 145 мДж; объектив для формирования лазерного ножа; цифровую кросскорреляционную камеру Видеоскан 4021 с разрешением 2048*2048 пикселей; широкоугольный объектив Nikon 28mm F/2.8D; синхронизирующий процессор; персональный компьютер с программным обеспечением Actual Flow.

Расчетно-теоретические и экспериментальные данные, полученные на стенде, необходимо было проанализировать с помощью более совершенных методов и инструментов исследований микропотоков. Для верификации результатов математического моделирования в рамках данной задачи рассматривалось несколько методик с точки зрения возможности получения требуемого объема и точности результатов. Это:

- метод теневых исследований Теплера;
- фотографический метод стробоскопической визуализации;
- метод лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА);
- метод цифровой трассерной велосимметрии (particle image velocimetry, PIV).

Из рассмотренных методов только последний удовлетворял требованиям поставленной задачи. Он позволяет измерять поля скорости в каналах субмиллиметрового размера с разрешением векторного поля до 2-5 мкм/вектор в сечении, толщиной всего несколько микрон. Метод PIV(цифровая трассерная визуализация) –оптический метод измерения мгновенных полей скорости жидкости или газа в выбранном сечении потока. Импульсный лазер создавал тонкий световой нож и освещал мелкие частицы, взвешенные в исследуемом потоке. Положение частиц в момент двух последовательных вспышек лазера регистрировалось на два кадра цифровой камеры. Скорость потока определялась расчетом перемещения, которое совершают частицы за время между вспышками лазера. Определение перемещения основано на применении корреляционных методов к трассерным картинкам с использованием регулярного разбиения на элементарные области.

Источником световых импульсов в данной схеме являлся лазер, который состоит из излучателя и системного блока. В излучателе расположены: 2 лазерных резонатора, 2 квантрона с активным веществом и лампой накачки, система сведения лучей, преобразователь частоты лазерного излучения и оптический аттенуатор. В системном блоке расположены: источник питания импульсных ламп накачки лазера, система охлаждения лазера и блок управления работой лазера. Фокусное расстояние оптической системы может меняться от 0,3 до 0,6 м. При этом толщина лазерного ножа меняется от 0,5 до 3 мм. Схема измерительного комплекса, примененного на экспериментальном стенде, показана на рис.43.

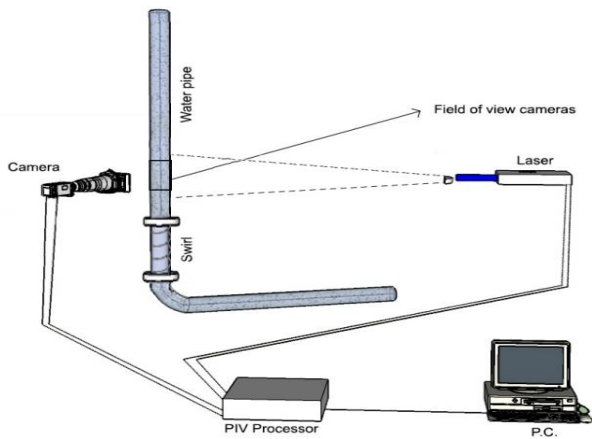


Рисунок 43. Схема измерительного комплекса «Полис» в составе лазерной установки, приемной камеры, синхронизатора, ПЭВМ-обрабатывающего комплекса.

Регистрация отраженных оптических импульсов осуществлялась кросскорреляционной камерой, которая предназначена для двукратной регистрации трассерных картин в потоке и может работать как в двухкадровом, так и в однокадровом режиме. Времен-

ная задержка между вспышками лазера при двухкадровом режиме регистрации кадров может варьироваться от 10 мкс до 259 мс.

Турбулентность двухфазного и однофазного потоков представляет собой чрезвычайно сложный объект для исследования с очень большим количеством степеней свободы и обычно характеризуется широкополосным набором различных компонент движения внутренних сил, среди которых существенную роль играют мелкомасштабные и высокочастотные составляющие, измерение которых подразумевает высокое пространственное и частотное разрешение используемого метода. На рис. 44 представлена цветная фотовизуализация закрутки потока жидкости ($f=0$) после прохождения вставки-завихрителя.

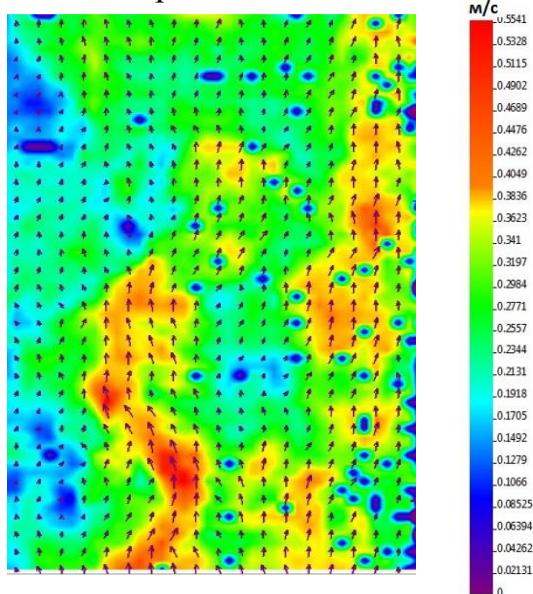


Рисунок 44. Цветная фотовизуализация закрутки потока жидкости при отсутствии газа ($f=0$) после прохождения вставки-завихрителя.

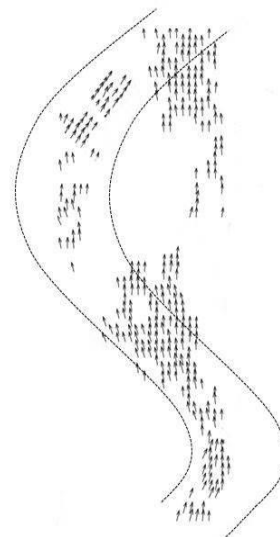


Рисунок 45. Трассер вектора скоростей течения теплоносителя после прохождения вставки-завихрителя на участке $L=0-15$ см

Разный цвет векторов на рис.44 соответствует разному значению скоростей. После небольшой обработки изображения средствами прикладной программы получаем картинку векторов скоростей закрученного потока жидкости (рис.45).

Представленный трассер векторов скоростей течения на прямолинейном участке трубопровода демонстрирует распределение векторов скоростей после выхода из вставки-завихрителя и показывает рассредоточение градиента давления водной среды от наружной стенки по всему объему трубопровода. Указанный эффект демонстрирует возможность пассивного управления виброперемещением за счет диссипации давления на наружную стенку в поворотных участках трубопроводов посредством вставок, установленных перед входением в поворот.

Анализ результатов проведенных измерений и их статистическая обработка показали, что вставки-завихрители являются эффективными пассивными устройствами, позволяющими, при сравнительно малом гидравлическом сопротивлении, повысить теплоотдачу до 12–20 %, снизить уровень виброперемещений трубопроводов с двухфазными потоками в 1,2...1,5 раза.

Применение разработанных и запатентованных устройств, представленных в главе, позволяет увеличить теплоотдачу, ресурс и надежность оборудования и, как результат – повысить эффективность комплексных систем ВИЭ в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методология применения мКС ВИЭ позволяет на основе метода выпуклой оптимизации, использования многолетних статистических метеорологических характеристик и генетической связи ресурсной базы ВИЭ в любом регионе с процессом получения и себестоимостью выработки энергии, определять для конкретных территорий наиболее эффективные состав и установленную мощность каждого вида оборудования ВИЭ. Использование методологии оптимизации мКС ВИЭ позволяет начать широкое внедрение микрогенерирующих систем ВИЭ для автономных потребителей, повысить надежность и эффективность энергоснабжения удаленных объектов Минобороны, Министерства чрезвычайных ситуаций, Минздравсоцразвития, ЖКХ и энергетики, частного сектора.

ВЫВОДЫ

1. Впервые предложена классификация энергетических мКС ВИЭ для расчета эффективных многокомпонентных комплексов, состоящих из оборудования различных видов возобновляемых источников энергии.
2. Впервые предложена математическая модель мКС ВИЭ, алгоритм и методология расчета энергосистем с расширенным рядом возобновляемых источников энергии для автономных объектов, базирующаяся на методе выпуклой оптимизации с поиском экстремума функции и позволяющая определить наиболее эффективный состав оборудования и соотношения мощностей в комплексной системе ВИЭ (мКС ВИЭ).
3. Разработан, создан и внедрен в реальных условиях объект «Энергоэффективный дом» с окта-комплексной системой ВИЭ в составе ДГ, ВЭУ, ФЭП, мГЭС, СК, БГУ, ТН, АКБ.
4. Впервые на полномасштабном объекте «Энергоэффективный дом» реализован эксперимент по одновременному использованию различных типов мКС ВИЭ, позволивший в течение более 12-ти лет проводить натурные исследования различных сочетаний оборудования возобновляемых источников энергии, накопить экспериментальный материал и разработать рекомендации по оптимизации мКС ВИЭ для удаленных децентрализованных объектов, выполнить верификацию полученных результатов с теоретическими расчетами.
5. Впервые (с использованием метода выпуклой оптимизации) разработана, внедрена и зарегистрирована отечественная автоматизированная компьютерная программа расчета оптимальной (по составу оборудования и соотношениям установленных мощностей) мКС ВИЭ («АРК-ВИЭ») для любого конкретного региона с учетом многолетних статистических метеоданных, программа-плагин визуализации этого поиска «VIZPRO-RES», а также программа «VIZPRO RES», позволяющая, помимо оптимизации состава, выбирать конкретные типы оборудования ВИЭ, имеющиеся на рынке.
6. Выполнен анализ энергетического потенциала возобновляемой энергетики Свердловской области. Впервые включен в программу «Стратегия развития топливно-энергетического комплекса Свердловской области до 2020 года» раздел «Возобновляемые источники энергии» с указанием сроков внедрения и установленных мощностей ВЭУ, ФЭП, СК, мГЭС, БГУ и ТН.
7. Разработаны, научно обоснованы и защищены патентами новые способ и устройство, повышающие теплоотдачу солнечных коллекторов со стекающей пленкой и позволяющие использовать простые конструкции СК для бытовых нужд; разработаны и защищены патентами способ и устройство для снижения вибрации и эрозионного

износа в трубопроводных системах, позволяющие повысить надежность и эффективность теплоэнергетического оборудования с двухфазным течением, таких как трубопроводы добычных скважин геотермальных ЭС.

8. Разработаны рекомендации по практическому использованию и повышению эффективности различных видов ВИЭ для территорий с высоким значением градусо-суток отопительного периода (ГСОП 5000 и выше).

9. Получена «Национальная экологическая премия» фонда им. В. И. Вернадского за внедренный проект «Энергоэффективный дом с комплексом возобновляемых источников энергии» (2009 г.).

Результаты диссертационной работы представляют собой разработанные теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как новые научно-обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА В НАУЧНЫХ ЖУРНАЛАХ, РЕКОМЕНДОВАННЫХ ВАК

1. Щеклеин С. Е., Велькин В. И., Власов С. М. Гидродинамические особенности нестационарного пленочного течения при высоких плотностях орошения // Известия вузов СССР, Энергетика, 1987.

2. Щеклеин С. Е., Велькин В. И. Теплообмен пленки жидкости с нагретой поверхностью при периодических колебаниях расхода // Теплофизика высоких температур, 1988, Т. 25. С. 406–407.

3. Shcheklein S. E., Velkin V. I. Experimental investigation of the effect of low-frequency fluctuations of the liquid flow rate on the minimum irrigation density in film flow // Journal of engineering physics, 1989. Т. 55, № 1. С. 756–759

4. Велькин В. И. Оптимизация выбора энергообеспечения на основе кластерного подхода в использовании возобновляемых источников энергии // Альтернативная энергетика и экология № 2, 2012. С. 67–71.

5. Велькин В. И., Дмитриевский В. А., Прахт В. А., Якимов А. И., Якимов Ю. И. Разработка конструкции роторно-лепестковой ВЭУ с тихоходным безредукторным генератором // Альтернативная энергетика и экология № 3, 2012. С. 72–76.

6. Щеклеин С. Е., Тягунов Г. В., Велькин В. Е., Ефимова А. В. Тепловизионный мониторинг теплозащитных характеристик здания в рамках проекта «Энергоэффективный дом» // Альтернативная энергетика и экология № 3, 2012. С. 113–118.

7. Велькин В. И., Щеклеин С. Е. Обеспечение минимальных энергетических потребностей удаленного дома за счет солнечных ФЭП // Альтернативная энергетика и экология. № 3, 2012. С. 52–54.

8. Велькин В. И. Влияние снежного покрова на эффективность функционирования солнечных ФЭП // Альтернативная энергетика и экология №3, 2012. С. 59–62.

9. Велькин В. И., Логинов М. И. Выбор оптимального состава оборудования в кластере возобновляемых источников энергии на основе регрессионного анализа // Альтернативная энергетика и экология. № 3, 2012. С. 100–104.

10. Данилов В. Ю., Коржавин С., Щеклеин С. Е., Велькин В. И. Экспериментальное исследование эффективности комбинированной системы солнечной теплогенерации // Альтернативная энергетика и экология, № 3, 2012, С. 77–81.

11. Щеклеин С. Е., Немихин В. Е., Велькин В. И., Серкова Е. А. Исследование эффективности солнечных фотоэлектрических преобразователей в природных условиях. // Альтернативная энергетика и экология, № 3, 2012. С. 55–58.

12. Шерьязов С. К., Велькин В. И., Семёнов А. Ю. Основы исследования системы энергоснабжения с использованием возобновляемых источников // Альтернативная энергетика и экология. № 4, 2012. С. 147–151.

13. Велькин В. И., Щеклеин С. Е. Светодиодное освещение энергоэффективного дома в системе «ФЭП-аккумулятор-LED» // Альтернативная энергетика и экология, №3, 2012, 37–38

14. Андреева Т. А., Завьялов А. С., Велькин В. И. Исследование эффективности светодиодных светильников в комплексе с солнечными ФЭП // Альтернативная энергетика и экология. № 4, 2012. С. 79–81.

15. Велькин В. И., Данилов В. Ю. Экспериментальные исследования вакуумного солнечного коллектора в условиях отрицательных температур // *Альтернативная энергетика и экология*, № 11, 2012. С. 82–85.
16. Велькин В. И., Данилов В. Ю. Опыт использования вакуумных солнечных коллекторов для многоэтажного дома в мегаполисе // *Альтернативная энергетика и экология*. № 11, 2012. С. 24–27.
17. Велькин В. И., Дмитриевский В. А., Прахт В. А., Якимов А. И., Якимов Ю. И. Модульная ветроэнергетическая установка с тихоходным генератором приземного расположения // *Энергобезопасность и энергосбережение*. № 6, 2012. С. 28–31.
18. Велькин В. И., Пахалуев В. М., Щеклеин С. Е. Исследование устройств снижения вибраций трубопроводов с двухфазным течением для геотермальных ТЭС // *Надежность и безопасность энергетики*. № 1(20), 2013. С. 48–50.
19. Vel'kin V.I., Loginov M.I., Chernobai E.V. Development of the mathematical model and software to compute the RES cluster// *Advances in Mathematics*. 2013. Т. 1. С. 66.
20. Велькин В. И., Щеклеин С. Е., Логинов М. И., Чернобай Е. В. Графический анализ экспериментальных данных и результатов математической модели кластеров ВИЭ // *Альтернативная энергетика и экология*. № 2, 2013. С. 130–136.
21. Велькин В. И., Логинов М. И., Чернобай Е. В., Рахимова Н. М. Графическая модель поиска оптимального состава оборудования в кластере возобновляемых источников энергии // *Вестник Таджикского технического университета им. акад. М. С. Осими*. № 2(22), 2013. С. 38–42.
22. Велькин В. И. Энергообеспечение удаленных сельских районов на базе кластеров возобновляемых источников энергии // *Вестник Таджикского технического университета им. акад. М. С. Осими*. № 3(23), 2013. С. 55–60.
23. Velkin V. I. The use of the graphical model for the RES cluster for determining the optimal composition of the equipment of renewable energy sources// *World Applied Sciences Journal*, 29(9); 2013. P. 1343–1348.
24. Завьялов А. С., Рахимова Н. М., Велькин В. И. Разработка отечественной компьютерной программы расчета энергосистем ВИЭ с учетом зарубежного опыта // *Альтернативная энергетика и экология*. Саров, № 15, 2013. С. 64–68.
25. Велькин В. И., Щеклеин С. Е., Трапезников Л. И. Разработка модульных микро-кластеров ВИЭ высокой заводской готовности // *Альтернативная энергетика и экология*. 2013, №15. С. 61–63.
26. Велькин В. И. Оптимизация состава оборудования в кластере ВИЭ и геометрическая интерпретация его эффективности // *Альтернативная энергетика и экология*. № 15, 2013, С.50-54.
27. Velkin V. I. Research efficiency of complex systems with spread spectrum renewable energy for electric power supply decentralized objects in Russia. Proceedings of the scientific-practical conference «Energy Qwest», Ekaterinburg. 2014. PP. 357–362.
28. Arbuzova E.V, Shcheklein S.E., Velkin V.I. Features of biogas technology application in severe climatic conditions / *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, Vol 186, *Energy and Sustainability V: Special Contributions*, 2015; 347-359 pp.
29. Велькин В. И., Власов В. В. Щеклеин С. Е. Энергоэффективный дом с комплексным использованием возобновляемых источников энергии в суровых климатических условиях // *Альтернативная энергетика и экология*. № 8-9, 2015, С.47-53.
30. Velkin V.I., Vlasov V.V. Shcheklein S.E. Energy-efficient building with the integrated use of renewable energy sources in severe weather condition. *WIT Transaction on The Built Environment*. Vol.168.2015, WIT Press. *Sustainable Development*. Vol. 1 pp.191-199.
31. V.I. Velkin., S.E. Shcheklein. Influence of use of RES integrated systems on improvement of energy supply reliability and risks. // *Journal of fundamental and applied sciences*.- 2016, №8, pp. 1470-1480.
32. Vladimir I. Velkin, Sergey E. Shcheklein, Hossain Ismail, A. Nikitin, and G.Chikansev. Investigation of the effect of passive vortex inserts of different geometrical shapes on the vibrations reduction efficiency in pipelines with two-phase flow// *MATEC Web of Conferences* 33. Сер. "33rd Siberian Thermophysical Seminar, STS 2017" 2017. С. 05012.

МОНОГРАФИИ

33. Велькин В. И. Энергоснабжение удаленного объекта на основе оптимизации кластера ВИЭ: монография / В. И. Велькин. Екатеринбург: УрФУ, 2013. 100 с.

34. Велькин В. И. Методология расчета комплексной системы ВИЭ для автономного объекта: монография / В. И. Велькин. Екатеринбург: УрФУ, 2015. 228 с.

ПАТЕНТЫ РФ

35. Патент РФ № 93049701 06.03.1993. Велькин В. И., Щеклеин С. Е. // Способ повышения теплоотдачи и предотвращения высыхания пленки жидкости и устройство для модуляции колебаний потока жидкости / Патент России № 2053480, 1996. Бюл. № 3.

36. Патент РФ № 2004107612 15.03.2004. Велькин В. И., Щеклеин С. Е., Максимов А. Н., Немихин И. Ю. // Завихритель / Патент России № 41499, 2004.

37. Патент РФ № 2005109850, 05.04.2005. Велькин В. И., Стариков Е. В. Гелиотроп / Патент России № 47496, 2005.

38. Патент РФ № 20066141016, 20.11.2006. Велькин В. И., Медведева, Ухов А. Л. Ветроэнергетическая установка / Патент России № 65579, 2006.

39. Патент РФ №200512104, 05.06.2005. Велькин В. И., Стариков Е. В., Смирнова П. В., Ухов А. Л. Гелиокухня / Патент России № 451717, 2006.

40. Патент РФ № 2005119095, 20.06.2005. Велькин В. И., Числов З. А., Ухов А. Л. Теплообменник / Патент России №49966. 2005.

41. Патент РФ № 2006144050/06, 11.12.2006 Велькин В. И., Школьный А. В., Кириллов М. П., Ачкеев М. В. Завихритель / Патент России № 2321779, 2008.

42. Патент РФ №2005106435, 09.03.2005 Щеклеин С. Е., Тягунов Г. В., Велькин В. И., Ухов А. Л. Энергоэффективный дом / Патент России № 61760, 2007.

43. Патент РФ № 128297. Велькин В. И., Щеклеин С. Е., Попов. А. И. Солнечный коллектор с теплообменом в жидких пленках / Патент России № 128297, 2013.

44. Патент № 2013132095 Щеклеин С. Е., Попов А. И., Велькин В. И. Биогазовая установка/ Патент России № 2013132095 от 10.07.13.

45. Свидетельство о Государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013610600, 29.01.2013; Велькин В. И., Логинов М. И., Чернобай Е. В. Программа автоматизированного расчета кластера ВИЭ «АРК-ВИЭ» / Свидетельство РФ 2013613097 25 марта 2013 г.

46. Свидетельство о Государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014611503, 25.02.2014; Велькин В. И., Денисов К. С., Чернобай Е. В. Программа визуализации поиска оптимального кластера ВИЭ «VIZPO-RES» / Свидетельство РФ 2014614024 14 апреля 2014 г.

47. Свидетельство о Государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016610783, 19.01.2016; Велькин В. И., Денисов К. С. Программа расчета и визуализации оптимальной комплексной системы ВИЭ «VizProRES» / Свидетельство РФ 2016610783 19 января 2016 г.

48. Патент РФ № 2015116614, 24.01.2017, Щеклеин С.Е., Попов А.И., Велькин В.И. Шнековая волновая электростанция/ Патент России № 268795, 2017г.