

На правах рукописи



Бежан Алексей Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ
УДАЛЕННЫХ РАЙОНОВ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ
ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ НА БАЗЕ
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК (НА ПРИМЕРЕ
МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ)**

2.4.5 - Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Апатиты - 2023

Работа выполнена в Центре физико-технических проблем энергетики Севера - филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», в лаборатории «Энергосбережения и возобновляемых источников энергии»

Научный руководитель: кандидат технических наук
Минин Валерий Андреевич

Официальные оппоненты: **Безруких Павел Павлович,**
доктор технических наук, ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский университет
«МЭИ», г. Москва, кафедра «Гидроэнергетики и
возобновляемых источников энергии», профессор

Кириченко Анна Сергеевна,
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО
«Кубанский государственный аграрный
университет им. И.Т. Трубилина», г. Краснодар,
кафедра «Электротехники, теплотехники и
возобновляемых источников энергии», доцент

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина
Ю.А.», г. Саратов**

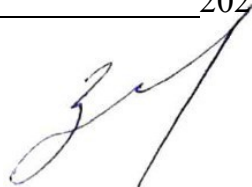
Защита состоится 19 декабря 2023 года в 11 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.310.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, ауд. Д- 224, тел./факс (843) 519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, КГЭУ, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.02.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и на официальном сайте КГЭУ <http://www.kgeu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ш.Г. Зиганшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Для современной России важным условием стабильного развития и дальнейшего существования районов Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) является обеспечение комфортных условий проживания местного населения. Особая роль в этом процессе отведена системам теплоснабжения, надежная и бесперебойная работа которых сопряжена с различными проблемами. Особенно остро это проявляется в удаленных, труднодоступных и изолированных районах АЗРФ, где имеется множество потребителей тепловой энергии, испытывающих различные трудности с теплоснабжением. Прежде всего, это связано с суровыми природно-климатическими условиями, усложняющими доставку органического топлива в удаленные районы и являющимися причиной повышенных потребностей в тепловой энергии на протяжении продолжительного отопительного периода, достигающего в отдельных районах АЗРФ 8-10 месяцев в году и более. Вместе с этим удаленность потребителей от мест добычи органического топлива, конечная стоимость которого у потребителей может быть в несколько раз выше по сравнению с отпускной ценой у поставщиков, является основной причиной повышенных денежных расходов на покупку такого топлива и его завоз в удаленные районы. Такая ситуация приводит к тому, что себестоимость тепловой энергии оказывается больше уровня тарифов, в результате чего деятельность теплоснабжающих организаций получается убыточной, и поэтому государство вынуждено субсидировать покупку и завоз органического топлива в удаленные районы АЗРФ. Также использование источников тепловой энергии, работающих на органическом топливе, оказывает негативное воздействие на окружающую природную среду. Всё это вызывает необходимость в поиске путей, направленных на энергосбережение и повышение энергетической эффективности теплоснабжения. В качестве отдельного направления энергосбережения можно рассматривать развитие и вовлечение в производство тепла местных возобновляемых источников энергии, в том числе энергии ветра.

В районах АЗРФ с повышенным потенциалом ветра имеется возможность использования ветроэнергетических установок (ВЭУ) совместно с котельными, работающими на органическом топливе, на нужды теплоснабжения. Одним из таких районов является Мурманская область, которая расположена в северо-западной части АЗРФ. Наибольшие среднегодовые скорости ветра в Мурманской области наблюдаются в прибрежных районах Баренцева и Белого морей и составляют 5-8 м/с на высоте 10 метров от поверхности земли. При этом наибольшие значения скорости ветра отмечаются в зимнее время, когда и существует наибольшая потребность в тепловой энергии. В целом можно констатировать, что в Мурманской области складываются благоприятные условия для эффективного использования энергии ветра на нужды теплоснабжения для широкого круга удаленных потребителей тепловой энергии.

Таким образом, актуальность диссертационной работы определяется современным состоянием развития теплоснабжения и связанной с этим необходимостью решения проблемы энергосбережения и повышения энергетической эффективности систем теплоснабжения, в том числе с привлечением энергии ветра для широкого круга удаленных и изолированных потребителей АЗРФ.

Цель работы. Теоретическое обоснование целесообразности использования энергокомплексов, включающих котельные, ветроэнергетические установки и тепловые аккумуляторы, для теплоснабжения удаленных районов Арктической зоны РФ.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Проведён анализ современного состояния развития теплоснабжения Мурманской области и обоснованы предпосылки для эффективного освоения ресурсов энергии ветра для целей теплоснабжения.

2. Разработана математическая модель системы теплоснабжения, где источниками тепловой энергии являются котельная и ВЭУ соизмеримой мощности, работающая совместно с тепловым аккумулятором.

3. Выполнен расчет энергетической эффективности системы теплоснабжения на примере работы энергокомплекса на базе котельной и ВЭУ в поселке Лодейное Мурманской области с учетом изменения климатических факторов.

4. Разработана математическая модель здания как аккумулятора тепла большой емкости для оценки изменения температуры внутреннего воздуха в зависимости от режимов работы котельной и ВЭУ.

5. Выполнена оценка экономической эффективности сооружения и использования ВЭУ совместно с котельными для целей теплоснабжения в удаленных районах Мурманской области.

Указанные цель и задачи предопределили структуру и содержание данной работы.

Объект исследования – энергокомплекс, состоящий из котельной и ВЭУ соизмеримой мощности, с обоснованием эффективности его использования на нужды теплоснабжения в удаленных районах АЗРФ (на примере Мурманской области).

Предмет исследования – способ повышения эффективности теплоснабжения за счет усовершенствования и модернизации схем, и оптимизации режимов работы современных систем теплоснабжения путем использования ВЭУ.

Степень разработанности проблемы. Исследования в области теплоснабжения, регулирования тепловых нагрузок в системах теплоснабжения и обеспечения теплового режима в зданиях связано с такими именами отечественных и зарубежных авторов, как Богословский В. Н., Громов Н. К., Дроздов В.Ф., Зингер Н. М., Ионин А. А., Козин В.Е., Кононович Ю. В., Кувшинов Ю. Я., Сканави А. Н., Соколов Е. Я., Табунщиков Ю. А., Хасилев В. Я., Чистович С. А., Шарапов В. И., Щекин Р.В., Яковлев Б. В. и других. Вопросам использования энергии ветра посвящены работы Андрианова В.Н., Бальзанникова М.И., Безруких П.П., Быстрицкого Д.Н., Вашкевича К.П., Денисенко Г.И., Маслова Л.А., Минина В.А., Николаева В.Г., Сидоренко Г.И., Хоффмана Л., Шефтера Я.И. и других. Процессы преобразования и аккумулирования ветровой энергии изложены в трудах Астахова Ю.Н., Грибкова С.В., Зубарева В.В., Елистратова В.В., Куколева М.И., Попеля О.С., Буллингера Х., Да Роза А., Роберта Б., Твайделла Дж., Хаггинса Р.А. и других.

Методология и методы исследования. В диссертации использованы предельно общие (синтез, анализ, умозаключение, сравнение) и общенаучные (наблюдение, мысленный эксперимент) методы научного познания, а также методы технико-экономических расчетов в энергетике, физико-математического моделирования тепломассообменных процессов, протекающих в системах теплоснабжения, тепловых аккумуляторах, системах отопления зданий, методы численного эксперимента сформулированных математических моделей, графического и табличного представления информации.

Информационной базой исследования являются результаты зарубежных и отечественных научных исследований, материалы периодической печати,

законодательные и иные правовые акты Российской Федерации и Мурманской области, статистические данные, информационные ресурсы сети Интернет.

Защищаемые положения:

1. Математическая модель и результаты расчета энергетической эффективности системы теплоснабжения, где источниками тепловой энергии являются котельная и ВЭУ соизмеримой мощности, с учетом изменения климатических факторов.

2. Методический подход к математическому описанию здания как аккумулятора тепла большой емкости, позволяющий моделировать изменение температуры внутреннего воздуха в зависимости от различных режимов работы котельной совместно с ВЭУ.

3. Результаты оценки экономической эффективности использования ВЭУ совместно с котельными на нужды теплоснабжения в удаленных районах Мурманской области.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

1. Для районов с повышенным потенциалом ветра и продолжительным отопительным сезоном сформулирован и определен вариант эффективного построения современных систем теплоснабжения с привлечением энергии ветра в качестве дополнительного источника тепловой энергии, позволяющий рассматривать применение комплекса «ВЭУ + ТА» как топливосберегающую технологию.

2. Разработана математическая модель системы теплоснабжения, где источниками тепловой энергии являются котельная и комплекс, состоящий из ВЭУ и ТА. Модель представляет собой математический инструмент для расчета и анализа различных режимов работы котельной совместно с ВЭУ в зависимости от различных исходных климатических данных, определения рациональной структуры системы теплоснабжения с участием ВЭУ, определения возможных объемов экономии органического топлива.

3. Разработаны математические модели водяных аккумуляторов тепла кубической и цилиндрической форм, работающие в комплексе с ветроэнергетической установкой, позволяющие проводить вычислительный эксперимент, моделировать и исследовать процессы зарядки, разрядки и ожидания тепловой нагрузки этих аккумуляторов. Модели позволяют определить время зарядки и разрядки, и выходную температуру воды ТА.

4. Разработан и математически описан методический подход к определению температуры воздуха внутри зданий, теплоснабжение которых обеспечивается энергокомплексом «котельная + ВЭУ».

5. Проведена оценка эффективности сооружения и использования ВЭУ совместно с котельными для целей теплоснабжения в удаленных районах Мурманской области. Ожидается, что результаты, полученные в этом исследовании, восполнят недостаток информации о целесообразности сооружения ветроэнергетических установок для целей теплоснабжения, что весьма полезно и для других регионов страны, в которых имеются похожие районы, испытывающие различные проблемы с теплоснабжением.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Для районов с повышенным потенциалом ветра и продолжительным отопительным сезоном вариант модернизации и построения современных систем теплоснабжения за счет вовлечения энергии ветра в отопительный процесс может найти своё практическое применение в качестве топливосберегающей технологии.

2. Разработанные математические модели и принципы их построения могут быть использованы при проектировании современных систем теплоснабжения, что позволит прогнозировать и моделировать реальную картину теплоснабжения с точки зрения функциональности процессов, происходящих во время производства и потребления тепловой энергии, исследовать поведение водяных тепловых аккумуляторов в тепловых системах коммунального и технологического назначения, а также проводить различные вычислительные эксперименты и комплексный анализ теплоснабжения, что, несомненно, может представлять практический интерес для теплоэнергетиков и специалистов в области теплоснабжения.

3. Выполненная оценка перспектив внедрения и использования ветроэнергетических установок совместно с котельными подтвердила эффективность их использования на нужды теплоснабжения в удаленных районах Мурманской области. Практическая реализация таких проектов на территории Мурманской области для целей теплоснабжения в дальнейшем может послужить хорошим толчком к крупномасштабному использованию энергии ветра на нужды теплоснабжения не только в указанном регионе, но и на всей территории АЗРФ.

4. Результаты исследования приняты к использованию в учебном процессе кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

Достоверность научных результатов и выводов. Достоверность научных положений, теоретических выводов и практических рекомендаций диссертации подтверждается корректностью постановки исследуемых задач, хорошим совпадением результатов математического моделирования с данными экспериментального наблюдения, а также довольно широкой публикацией результатов и их обсуждением на международных и российских конференциях и конгрессе.

Личный вклад автора. Автором разработана математическая модель и выполнен большой объем длительных и трудоемких расчетов энергетической эффективности системы теплоснабжения, где источниками тепловой энергии являются котельная и ВЭУ соизмеримой мощности, с учетом изменения климатических факторов. Автором разработана математическая модель здания как аккумулятора тепла большой емкости для оценки изменения температуры внутреннего воздуха здания в зависимости от режимов работы котельной и ВЭУ. Выполнена технико-экономическая оценка перспектив внедрения ВЭУ совместно с котельными в системы теплоснабжения удаленных районов Мурманской области.

Апробация работы.

Результаты исследования были представлены на международных и российских научно-практических и научно-технических конференциях:

Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon-2020» Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 2020 г.

V Международная научная конференция «Арктика: история и современность» СПбПУ, Санкт-Петербург 2020 г.

VII, VIII Всероссийская научная молодежная школа с международным участием «Возобновляемые источники энергии» МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва 2010, 2012 гг.; Всероссийская научная конференция с международным участием и IX, X, XI

научная молодёжная школа «Возобновляемые источники энергии» МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва 2014, 2016, 2018 гг.

Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых 2009 – 2013 и 2015 - 2017 гг., соответственно Кемерово-Томск, Волгоград, Екатеринбург, Красноярск, Архангельск, Омск, Ростов-на-Дону, Екатеринбург.

Международный Конгресс «Дни чистой энергии в Петербурге» в рамках форума по возобновляемой энергетике на Северо-западе России, Санкт – Петербург 2010 г.

VI (XXXVIII) Международная научно-практическая конференция «Образование, наука, инновации - вклад молодых исследователей» Кемеровский госуниверситет, Кемерово, 2011 г.

II Всероссийская научно-практическая конференция «Морская стратегия России и экономическая деятельность в Арктике», Мурманск 2008 г.

Работа по теме исследования частично проводилась в рамках проекта РФФИ № 09-08-00210. Положения и некоторые выводы диссертации докладывались на заседаниях ученого совета в ЦЭС КНЦ РАН, включались в отчёты о научно-исследовательской работе ЦЭС КНЦ РАН (гос. задания №2-11-2010, №0226-2017-0017 и №FMEZ-2022-0014) и ФГБОУ ВО «КГЭУ» (гос. задание №075-03-2023-91 от 16.01.2023).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 19 печатных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus, 7 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 113 наименований и 2 приложений. Работа изложена на 116 страницах машинописного текста, включает в себя 51 рисунок и 10 таблиц.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю Минину Валерию Андреевичу за полезные консультации в ходе выполнения работы, а также заведующему кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» Казанского государственного энергетического университета Ванькову Юрию Витальевичу за помощь и поддержку.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, изложены научная новизна, практическая значимость работы и защищаемые положения, обоснована достоверность полученных результатов. Приведены сведения о работе и её структуре.

В первой главе «Анализ современного состояния теплоснабжения потребителей и перспективы развития возобновляемых источников энергии в Мурманской области» представлена общая характеристика теплоснабжения региона. Основное внимание уделено изолированным и труднодоступным районам, которые удалены на значительные расстояния от центральных территорий. Отмечено, что в таких районах проблема с организацией теплоснабжения проявляется особенно остро. Прежде всего, это связано с тем, что Мурманская область не имеет предприятий по добычи органических видов топлива (угля, нефти, газа). Поэтому для производства тепловой энергии преимущественно используется привозное органическое топливо, доставляемое из других регионов России, что связано с

большими финансовыми проблемами. В свою очередь плохая развитость и отсутствие автомобильных дорог из-за значительной рассредоточенности небольших потребителей тепловой энергии в удаленных районах еще больше усложняют и удорожают процесс доставки топлива в эти районы. В целом такая ситуация приводит к тому, что государство вынуждено субсидировать производство тепловой энергии на нужды теплоснабжения и в частности покупку и завоз органического топлива на территорию Мурманской области, устанавливая для населения цену за 1 Гкал тепловой энергии меньше реальной. Одним из вариантов, направленных на решение этих проблем, может быть использование в системах теплоснабжения местных возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Именно применительно к удалённым потребителям тепловой энергии заслуживает наибольшего внимания изучение этого вопроса.

Представлен обзор ВИЭ Мурманской области. Показано, что из всех имеющихся ВИЭ наибольшие возможности освоения и практического использования для целей теплоснабжения имеет энергия ветра, запасы которой велики и особенно много их сосредоточено в прибрежных районах Баренцева и Белого морей. В этих районах скорость ветра находится в интервале 5-8 м/с на высоте 10 метров от поверхности земли. Отмечено несколько положительных факторов, благоприятствующих вовлечению энергии ветра в технологии производства тепла для целей теплоснабжения, среди которых наиболее важными являются: высокий потенциал ветра и продолжительный отопительный период, длительность которого в регионе составляет 8-9 месяцев в году и больше; максимум интенсивности ветра в зимнее время, когда и существует наибольшая потребность в тепловой энергии.

Вторая глава «Формирование математической модели системы теплоснабжения на основе энергокомплекса «котельная + ветроустановка + тепловой аккумулятор» посвящена разработке математической модели комбинированной системы теплоснабжения, где источниками тепловой энергии являются котельная и ветроэнергетическая установка (ВЭУ) соизмеримой мощности, работающие совместно с тепловым аккумулятором (ТА). Общий вид схемы такой системы теплоснабжения приведен на рисунке 1. Математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений (1), описывающих все основные параметры исследуемой системы теплоснабжения. Для математического описания модели использован метод дифференциальных балансных уравнений, где в качестве зависимой переменной для составления баланса используется количество теплоты. Описание переменной основано на формуле для энтальпии теплоносителя, поступающего к рассматриваемому элементу системы теплоснабжения и уходящего от него.

С помощью полученной модели на примере работы энергокомплекса на базе котельной и ВЭУ выполнен расчет энергетической эффективности системы теплоснабжения поселка Лодейное Мурманской области. Поселок Лодейное расположен в 120 км к востоку от города Мурманска. Основным источником тепловой энергии в п. Лодейное служит котельная, работающая на мазуте. В рассматриваемом районе предлагается разместить две ВЭУ марки Vestas V52/850 мощностью 850 кВт (80% от подключенной нагрузки котельной).

Исходными данными для расчётов являются графики изменений скорости ветра и температуры наружного воздуха, полученные на метеостанции с 1 января по 31 декабря 2021 года. Используя эти данные, был получен график отопительной нагрузки п. Лодейное, покрываемый энергокомплексом «котельная + ВЭУ» (рисунок 2). Из графика видно, что в периоды сильного ветра часть нагрузки покрывается от ВЭУ (область голубого цвета), а другая часть в периоды малого ветра или его

отсутствия покрывается от котельной (область красного цвета). В периоды превышения мощности ВЭУ над ее потреблением имеют место избытки энергии ветра (область серого цвета). В летние месяцы теплоснабжение отсутствует. Результаты моделирования показали, что при таком варианте теплоснабжения суммарный годовой энергетический эффект от использования ВЭУ выражается в снижении участия котельной в теплоснабжении примерно на 75%, а следовательно на столько же и в экономии мазута, расходуемого на котельной.

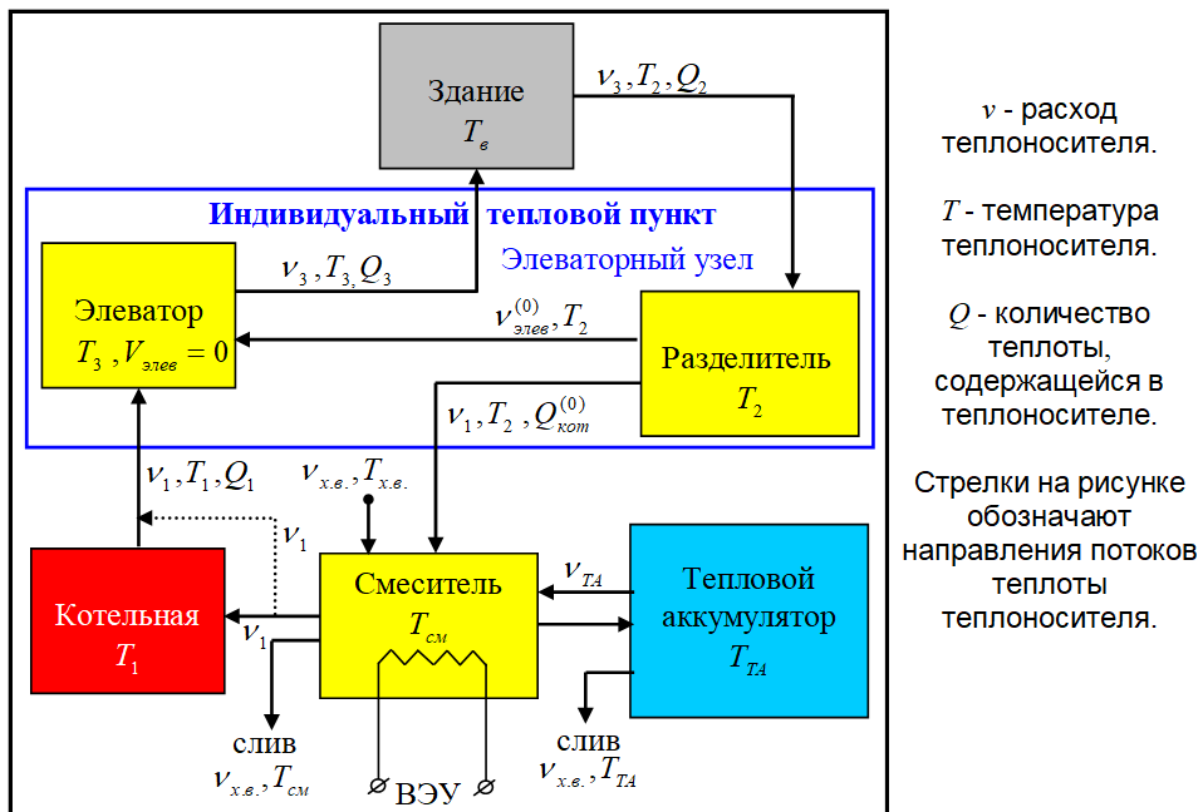


Рисунок 1 - Структурная схема системы теплоснабжения на основе энергокомплекса «котельная + ВЭУ + ТА»

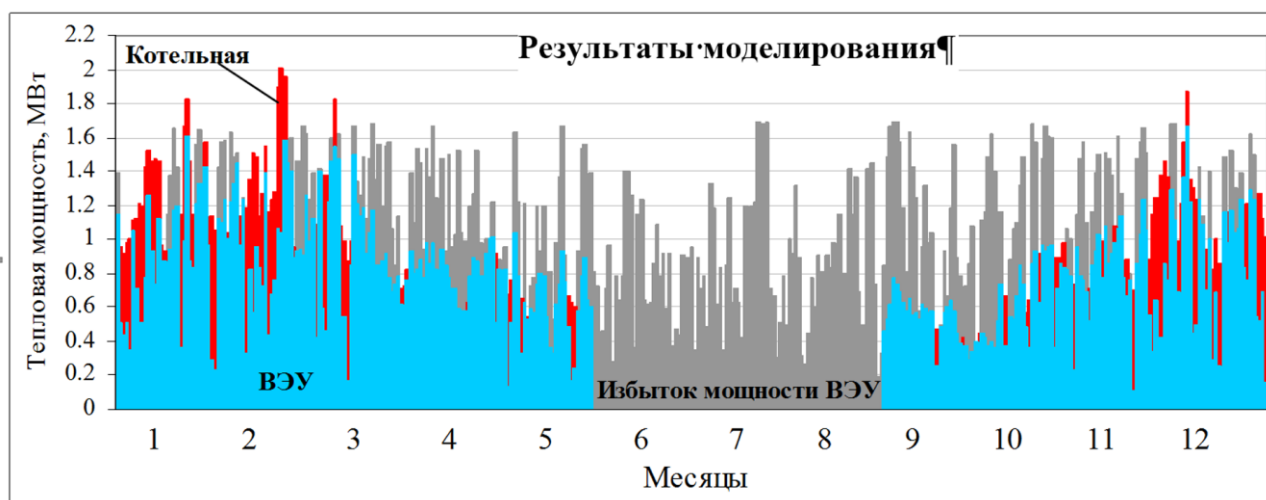


Рисунок 2 - График отопительной нагрузки поселка Лодейное

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{dT_1}{dt} = -\frac{67}{29} \frac{dT_n}{dt} \\
\frac{dT_3}{dt} = -2 \frac{dT_n}{dt} \\
\frac{dT_2}{dt} = -\frac{37}{29} \frac{dT_n}{dt} \\
\frac{dT_6}{dt} = \frac{Q_3 - Q_2 - qV_{30} k_v (T_6 - T_n)}{V_{30} (0,8 \cdot C_p^{возд} + 0,2 \cdot C_p^{стена})} \\
\frac{dT_{TA}}{dt} = \frac{v_{TA} (T_{cm} - T_{TA})}{V_{TA}} - \frac{K_{TA} F_{TA} (T_{TA} - T_6)}{V_{TA} C_p} \\
\frac{dT_{cm}}{dt} = \frac{1}{C_p v_1} \cdot \frac{dQ_{cm}}{dt} - \frac{Q_{cm}}{C_p v_1^2} \cdot \frac{dv_1}{dt} \\
\frac{dQ_1}{dt} = C_p \left(\frac{dv_1}{dt} T_1 + v_1 \frac{dT_1}{dt} \right) \\
\frac{dQ_2}{dt} = C_p \left(\frac{dv_3}{dt} T_2 + v_3 \frac{dT_2}{dt} \right) \\
\frac{dQ_3}{dt} = C_p \left(\frac{dv_3}{dt} T_3 + v_3 \frac{dT_3}{dt} \right) \\
\frac{dQ_{ком}^{(0)}}{dt} = C_p \left(\frac{dv_1}{dt} T_2 + v_1 \frac{dT_2}{dt} \right) \\
\frac{dQ_{лев}^{(0)}}{dt} = C_p \left(\frac{dv_{лев}^{(0)}}{dt} T_2 + v_{лев}^{(0)} \frac{dT_2}{dt} \right) \\
\frac{dQ_{cm}}{dt} = \frac{dQ_{ком}^{(0)}}{dt} + \frac{dQ_{ВЭУ}}{dt} + \frac{dQ_{TA}}{dt} - \frac{dQ_{TA}^{(0)}}{dt} \\
\frac{dQ_{ком}^3}{dt} = \frac{dQ_{cm}}{dt} - \frac{dQ_{ком}^{(0)}}{dt}
\end{array} \right. \quad (1)$$

В третьей главе «Аккумуляция тепловой энергии» изложены результаты математического описания водяных тепловых аккумуляторов кубической и цилиндрической форм, а также здания как аккумулятора тепла большой емкости.

Любое жилое здание можно рассматривать в качестве аккумулятора тепловой энергии, в котором теплоаккумулирующими материалами являются воздух, наружные и внутренние стены, перекрытия, крыша и т.д. Все эти материалы способны в себе как накопить некоторое количество тепловой энергии, так и постепенно его отдавать в окружающую среду. В этом случае за счёт теплоаккумулирующей способности здания в период избытков ветровой энергии можно повысить температуру внутреннего воздуха здания в пределах от 18 до 25°C и тем самым запасти тепловую энергию, а затем в периоды со слабым ветром уменьшить температуру в интервале от 25 до 18°C и тем самым использовать запасённое тепло, дополнительно уменьшая участие котельной в теплоснабжении зданий.

Математически изменение температуры внутреннего воздуха здания в зависимости от различных режимов работы котельной совместно с ВЭУ можно описать с помощью уравнений (2) и (3):

$$V_{зд} (v^e C_p^{e'} + v^m C_p^{m'}) \frac{dT_в}{dt} + qV_{зд} k_v (T_в - T_n) = Q_{к} \gamma + Q_{вэу}. \quad (2)$$

$$T_в = \frac{Q_{к} \gamma + Q_{вэу}}{qV_{зд} k_v} + \left[\exp \left(- \frac{q}{(v^e C_p^{e'} + v^m C_p^{m'})} t \right) \right] \cdot (T_{в_0} - T_n - \frac{Q_{к_0} \gamma + Q_{вэу_0}}{qV_{зд} k_v}) + T_n. \quad (3)$$

Представленные уравнения были использованы для проведения расчета, по результатам которого был построен график изменения температуры внутреннего воздуха здания поселка Лодейное при использовании избыточной энергии ВЭУ и теплоаккумулирующей способности здания в течение всего отопительного периода (рисунок 3).

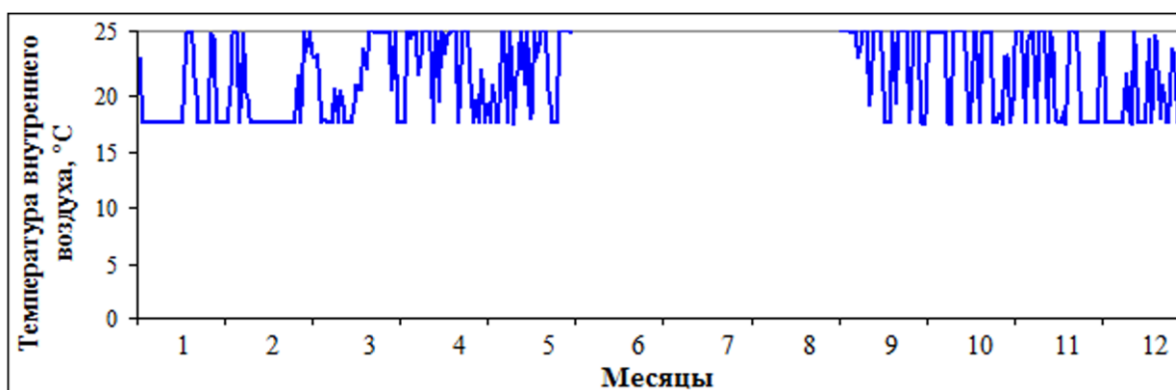


Рисунок 3 - Изменение температуры внутреннего воздуха

На рисунке 4 показано, как теперь будет выглядеть график отопительной нагрузки (после вовлечения в оборот избытков энергии ВЭУ). Видно, что ежемесячно за счёт использования избыточной энергии ВЭУ и теплоаккумулирующей способности здания можно дополнительно уменьшить участие котельной в теплоснабжении (область красного цвета) и тем самым еще больше повысить эффективность применения ВЭУ. Расчёты показали, что доля участия котельной в теплоснабжении за счет использования теплоаккумулирующей способности здания за рассматриваемый год уменьшилась с 25% до 17%. Приведенные результаты, свидетельствуют о положительном энергетическом эффекте от применения ВЭУ совместно с котельной для целей теплоснабжения.

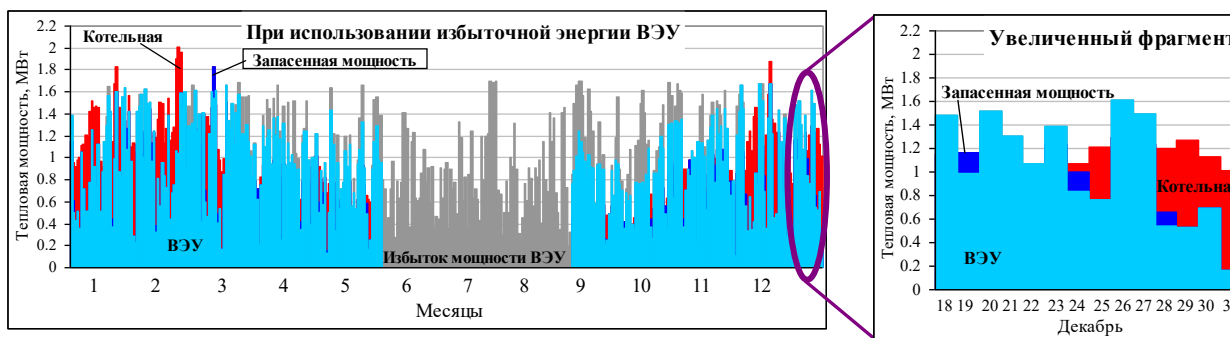


Рисунок 4 - График отопительной нагрузки п. Лодейное при утилизации избыточной энергии ВЭУ за счёт теплоаккумулирующей способности здания

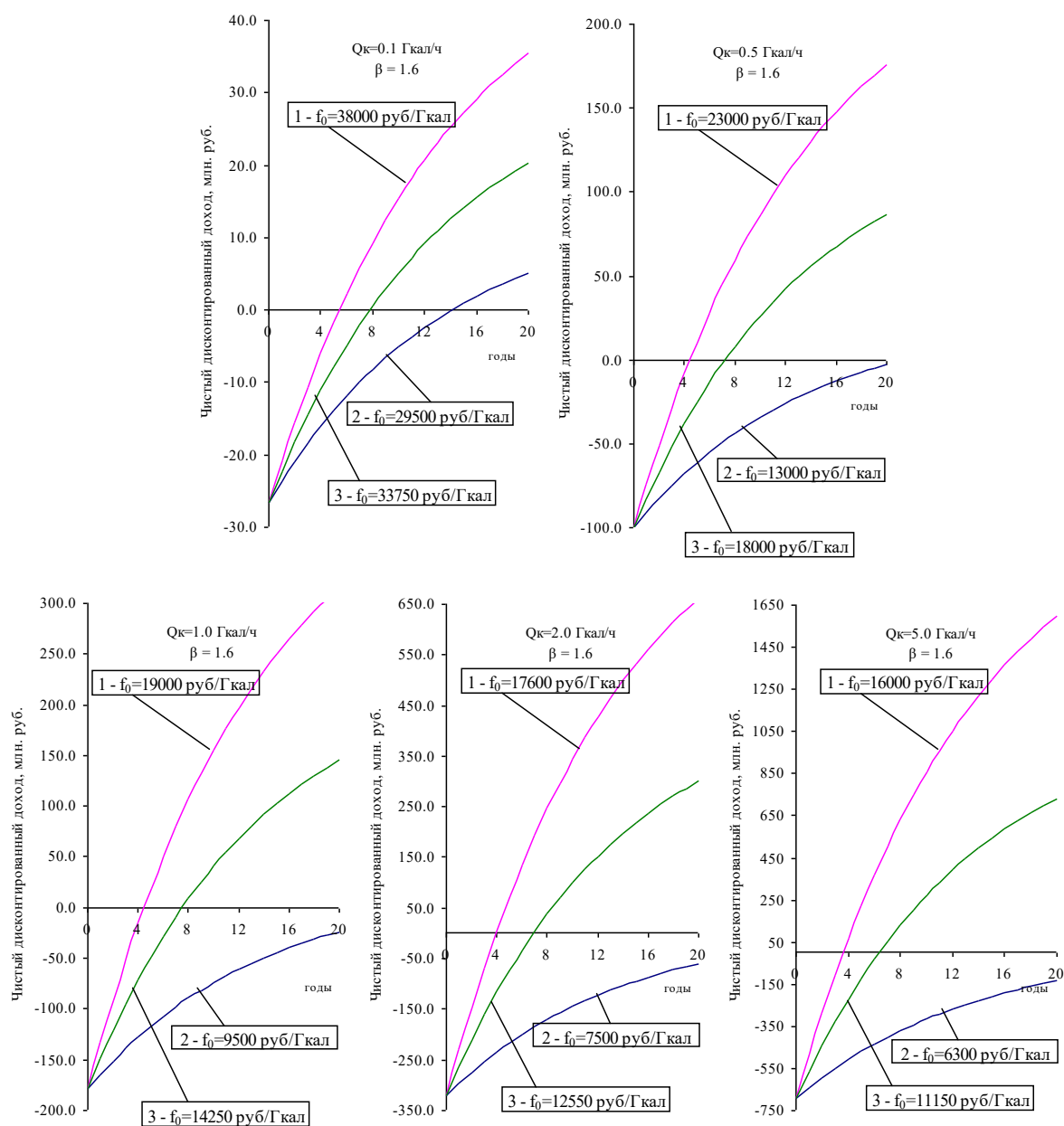


Рисунок 5 – Формирование чистого дисконтированного дохода за годы работы ВЭУ совместно с котельными мощностью от 0.1 до 5.0 Гкал/ч при стоимости топлива 72000 руб/т у.т. в зависимости от тарифа на тепловую энергию: кривая 1 – при тарифе f_0 , равном себестоимости тепловой энергии при теплоснабжении только от котельной; кривая 2 - при тарифе f_0 , равном минимуму себестоимости тепловой энергии, достигаемому за счет использования ВЭУ совместно с котельной; кривая 3 - при тарифе f_0 , равном среднему значению между тарифами, указанными на кривых 1 и 2

В четвертой главе «Оценка экономической эффективности использования ветроэнергетических установок совместно с котельными на нужды теплоснабжения в удаленных районах Мурманской области» выполнена технико-экономическая оценка перспектив внедрения и использования ветроэнергетических установок совместно с котельными на нужды теплоснабжения в удаленных районах Мурманской области. Показано, что использование ветроэнергетических установок

совместно с котельными мощностью более 0,1 Гкал/ч на нужды теплоснабжения позволяет сэкономить на котельных 60-90% органического топлива стоимостью 25000-72000 руб/т у.т. и тем самым снизить себестоимость тепловой энергии на 10-60%. Для котельных меньшей мощности эффект от использования ветроэнергетических установок снижается, причем чем меньше мощность котельной, тем больше использование ветроэнергетических установок оказывается экономически не целесообразным по сравнению с вариантом теплоснабжения только от котельной.

Анализ финансовых показателей проектов по сооружению и использованию энергокомплексов «котельная + ВЭУ» на нужды теплоснабжения в удаленных районах Мурманской области показал (рисунок 5), что с финансовой точки зрения проекты являются состоятельными, так как к завершению расчетного срока службы энергокомплексов «котельная + ВЭУ» может быть сформирована прибыль в размере 17-105% от первоначальных инвестиций, дисконтированный срок окупаемости проектов составит 6-14 лет.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по диссертационной работе.

1. Анализ современного состояния и основных проблем теплоснабжения потребителей в удаленных и изолированных районах Мурманской области показал, что одним из возможных направлений энергосбережения и повышения энергетической эффективности существующих систем теплоснабжения, снижения затрат на покупку и доставку органического топлива, а также повышения их энергетической безопасности и улучшения экологической ситуации может быть использование местных возобновляемых источников энергии, и в частности энергии ветра.

2. Разработана математическая модель системы теплоснабжения на основе энергокомплекса «котельная + ВЭУ + ТА», позволяющая математически описывать различные режимы работы котельной совместно с ВЭУ и ТА с учётом обеспечения баланса производства и потребления тепловой энергии в различные временные промежутки и в зависимости от различных исходных природно-климатических факторов (скорости ветра, температуры наружного воздуха), а также определять возможные объёмы экономии тепловой энергии на котельной, а следовательно и органического топлива.

3. Предложен способ математического описания здания как аккумулятора тепла большой емкости, позволяющий моделировать изменение температуры внутреннего воздуха в зависимости от различных режимов работы котельной и ВЭУ.

4. Выполнена оценка эффективности систем теплоснабжения на основе энергокомплекса, состоящего из котельной и ВЭУ, в удаленных районах Мурманской области. Установлено, что основной эффект от использования ВЭУ на нужды теплоснабжения выражается в снижении участия котельной в покрытии графика отопительной нагрузки до 90% и соответственно на столько же в экономии органического топлива на котельных, что позволяет снизить себестоимость тепловой энергии на 10-60%, а использование избыточной энергии ВЭУ за счёт теплоаккумулирующей способности здания дает возможность в отдельные месяцы сократить участие котельной еще на несколько процентов. С финансовой точки зрения сооружение энергокомплексов «котельная + ВЭУ» на нужды теплоснабжения является оправданным, к завершению расчетного срока службы энергокомплексов «котельная + ВЭУ» может быть сформирована прибыль в размере 17-105% от первоначальных инвестиций, дисконтированный срок возврата инвестиций составит 6-14 лет.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы диссертационного исследования. Результаты диссертационного исследования рекомендуются использовать при проектировании современных систем теплоснабжения, включающих в себя котельные, ветроэнергетические установки и тепловые аккумуляторы. В удаленных районах Арктической зоны Российской Федерации с повышенным потенциалом ветра ветроэнергетические установки целесообразно использовать совместно с котельными на нужды теплоснабжения для снижения участия котельной в покрытии графика отопительной нагрузки и экономии органического топлива на котельных. Практическая реализация проекта внедрения и использования ветроэнергетических установок совместно с котельными на территории Мурманской области для целей теплоснабжения может послужить хорошим толчком к крупномасштабному использованию энергии ветра на нужды теплоснабжения не только в указанном регионе, но и на всей территории Арктической зоны Российской Федерации.

Дальнейшими направлениями изучения возможностей использования ветроэнергетических установок на нужды теплоснабжения в удаленных районах Арктической зоны Российской Федерации могут быть исследования их работы совместно с другими альтернативными и местными возобновляемыми источниками энергии с целью еще большего повышения эффективности работы систем теплоснабжения на основе энергокомплекса, состоящего из котельной и ветроэнергетических установок.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS

1. Бежан, А.В. Повышение эффективности систем теплоснабжения за счет внедрения ветроэнергетических установок / А.В. Бежан // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. - 2020. - Т. 63. - № 3. - С. 285-296. DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-285-296> (общий объем - 0,66 п.л., личный вклад - 0,66 п.л.).

2. Bezhan, A.V. Experience and prospects for the wind power plants constructing in the north western part of the Euro-Arctic region of Russia / A.V Bezhan // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2020. – V. 539. – P. 012145 (общий объем - 0,34 п.л., личный вклад - 0,34 п.л.).

3. Bezhan, A.V. Evaluation of expediency of using wind energy for heat supply on the Barents sea coast of Russia / A.V. Bezhan // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia. - 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271641> (общий объем - 0,34 п.л., личный вклад - 0,34 п.л.).

Публикации в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ

1. Бежан, А.В. Снижение себестоимости тепловой энергии за счет использования ветроэнергетических установок совместно с котельными на нужды теплоснабжения в удаленных районах арктической зоны Российской Федерации (на примере Мурманской области) / А.В. Бежан, Ю.Н. Звонарева, Р.А. Пономарев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2023. - № 25(3). - С. 128-138 (общий объем - 0,84 п.л., личный вклад - 0,28 п.л.).

2. Бежан, А.В. Повышение энергоэффективности систем теплоснабжения путем применения ветроэнергетических установок в Арктическом регионе России / А.В. Бежан // Промышленная энергетика. – 2018. - № 10. – С. 37-40 (общий объем - 0,27 п.л., личный вклад - 0,27 п.л.).

3. Бежан, А.В. Оценка эффективности системы теплоснабжения на основе котельной и ветроустановки в условиях Севера / А.В. Бежан, В.А. Минин // Теплоэнергетика. – 2017. - №3. – С. 51-60 (общий объем - 0,47 п.л., личный вклад - 0,24 п.л.).

4. Бежан, А.В. Ветроэнергетика Мурманской области / А.В. Бежан // Электрические станции. – 2017. - № 7. - С. 51-55 (общий объем - 0,33 п.л., личный вклад - 0,33 п.л.).

5. Бежан, А.В. Математическое описание водяного аккумулятора тепла кубической формы / А.В. Бежан // Энергосбережение и водоподготовка. - 2017. - № 6 (110). - С. 59-64 (общий объем - 0,29 п.л., личный вклад - 0,29 п.л.).

6. Бежан, А.В. Математическое описание работы котельной совместно с ветроэнергетической установкой и тепловым аккумулятором / А.В. Бежан, В.А. Минин // Теплоэнергетика. – 2011. - № 11. – С.21-26 (общий объем - 0,48 п.л., личный вклад - 0,24 п.л.).

7. Минин, В.А. Теплоснабжение зданий с участием ветроэнергетических установок / В.А. Минин, А.В. Бежан // Энергосбережение и водоподготовка. - 2009. - № 2(58). - С. 17-21 (общий объем - 0,37 п.л., личный вклад - 0,19 п.л.).

Публикации в изданиях, включенных в РИНЦ

1. Бежан, А.В. Комбинированное применение котельных и ветроэнергетических установок для теплоснабжения жилых районов Арктической зоны РФ / А.В. Бежан // Энергия: экономика, техника, экология. – 2019. - № 12. – С. 54 - 58 (общий объем - 0,30 п.л., личный вклад - 0,30 п.л.).

2. Минин, В.А. Возможные направления интеграции возобновляемых источников энергии в энергетическое хозяйство Мурманской области / В.А. Минин, А.А. Рожкова, А.В. Бежан // Вестник Кольского научного центра РАН. - 2019. - Т. 11. - № 3. - С. 124-133 (общий объем - 0,58 п.л., личный вклад - 0,19 п.л.).

3. Бежан, А.В. Повышение экономической эффективности систем теплоснабжения за счёт применения ветроэнергетических установок в регионах Арктической зоны РФ / А.В. Бежан // Труды КНЦ РАН. Энергетика. – Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2018. - № 3. – С. 140-146 (общий объем - 0,34 п.л., личный вклад - 0,34 п.л.).

4. Бежан, А.В. Региональный опыт использования ветроэнергетических установок в Мурманской области / А.В. Бежан // Возобновляемые источники энергии: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием и XI научной молодежной школы: 3-6 декабря 2018 года, Москва. – М.: МАКС Пресс, 2018. – С. 209–213 (общий объем - 0,23 п.л., личный вклад - 0,23 п.л.).

5. Бежан, А.В. Математическое описание водяного аккумулятора тепла цилиндрической формы / А.В. Бежан // Труды КНЦ РАН. Энергетика. – Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2016. - № 5. – С. 55-62 (общий объем - 0,21 п.л., личный вклад - 0,21 п.л.).

6. Бежан, А.В. Моделирование режимов работы теплового аккумулятора / А.В. Бежан // Труды КНЦ РАН. Энергетика. – Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2015. - № 8. – С. 90-95 (общий объем - 0,23 п.л., личный вклад - 0,23 п.л.).

7. Бежан, А.В. Математическое моделирование комплекса, состоящего из котельной, ветроустановки и теплового аккумулятора / А.В. Бежан // Труды КНЦ РАН. Энергетика. – Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2012. - № 8. – С. 123-128 (общий объем - 0,25 п.л., личный вклад - 0,25 п.л.).

8. Бежан, А.В. Оценка перспектив использования энергии ветра для теплоснабжения посёлка Териберка / А.В. Бежан, В.А. Минин // Труды КНЦ РАН. Энергетика. – Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2011. - № 5. – С. 205-213 (общий объем - 0,34 п.л., личный вклад - 0,17 п.л.).

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023664293 Российская Федерация. Программа для расчета зависимости параметров теплового аккумулятора по времени / А.В. Бежан, Ю.В. Ваньков, Т.Р. Абдуллин, Е.В. Измайлова; заявл. №2023662820, 21.06.2023; опубл. 03.07.2023. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 03.07.2023.

Автореферат

Бежан Алексей Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ
УДАЛЕННЫХ РАЙОНОВ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ
ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ НА БАЗЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
(НА ПРИМЕРЕ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ)**

Технический редактор: В. Ю. Жиганов

Подписано к печати 11.10.2023. Формат бумаги 60×84 1/16.
Усл. печ. л. 0,93. Заказ № 62. Тираж 100 экз.

ФГБУН ФИЦ КНЦ РАН
184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14