

*На правах рукописи*

**Воронов Владимир Андреевич**

**ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА СИСТЕМ  
ЭФФЕКТИВНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ТЕПЛОВЫМ  
НАСОСОМ В МАЛОЭТАЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

05.02.22 - Организация производства (строительство)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново - 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет» (ФГБОУ ВО «ИВГПУ»)

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Федосеев Вадим Николаевич**

**Официальные оппоненты:** **Бодров Михаил Валерьевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
член-корреспондент Академии Жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, профессор кафедры "Отопление и вентиляция" ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» , г. Нижний Новгород

**Федюхин Александр Валерьевич**  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Промышленные теплоэнергетические системы», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
г. Москва

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Московский архитектурный институт (государственная академия)»,  
г. Москва

Защита состоится 27 декабря 2019 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.355.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153000, г. Иваново, Шереметьевский проспект., д.21, ауд. У-109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного политехнического университета [www.ivgpu.com](http://www.ivgpu.com).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

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



Н.В.Заянчуковская

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность избранной темы исследований.** В настоящее время особое значение приобретают проблемы разработки экологичных и инновационных организационно-технических решений, направленные на энергосбережение, как важную задачу по сохранению природных ресурсов не только в России, но и во всем мире. В условиях глобального экономического кризиса наша страна несет значительные потери от недооценки энергосбережения и энергоэффективности. Крупными потребителями энергоресурсов являются здания и сооружения (до 40% всех энергоресурсов расходуется отопительными системами).

Большой потенциал развития в сфере строительства занимает малоэтажная жилая застройка. Это обусловлено такими факторами как: экологичность, камерность, экономичность, низкая плотность соседей. Согласно прогнозам Правительства Российской Федерации из общего ввода жилья, доля малоэтажного строительства в России в 2019 должна составить не менее 60 %, а к 2020 году – не менее 70 %.

Одной из актуальных проблем организации строительства малоэтажного жилья является то, что в районах малоэтажной застройки часто отсутствуют подведенные тепловые и газовые сети, а также недостает мощности электрических сетей.

В условиях частичного отсутствия инженерных сетей (тепло, газ) в инфраструктуре, стабильно обеспечить тепловой энергией могут автономные теплогенераторы, на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Развитие теплогенераторов на основе ВИЭ поддерживается государственной программой РФ «Энергоэффективность и развитие энергетики» и нацпроектом «Жилье и городская среда».

Высокую эффективность и надежность среди теплогенераторов на основе ВИЭ могут обеспечивать тепловые насосы (ТН), что подтверждает высокий уровень продаж данных устройств в Европе и во всем мире [128]. Например, в 2015 году продажи ТН в Европе достигли свыше 870 тыс. экземпляров.

Одним из непроработанных моментов в организации проектирования систем теплоснабжения воздушными тепловыми насосами (ВТН) в малоэтажном строительстве на данный момент является то, что рассматривают их только в инструкциях заводов-изготовителей, данная документация не учитывает такие основополагающие факторы как особенности климатических условий района, удельные тепловые потери современных малоэтажных зданий, тарифы на энергоносители и т.д. Это влияет на эффективность функционирования ВТН.

Организация эффективного теплоснабжения малоэтажных строений практически не прописана в существующих регламентах по проектированию и строительству зданий. Современное положение вопроса реализации

энергоэффективной технологии ВТН предполагает необходимость совершенствования процессов их проектирования для малоэтажного жилья в условиях климатических особенностей территории РФ. Поиск решения данной проблемы определил тему диссертационного исследования.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблема организации эффективного функционирования ВТН в малоэтажном строительстве на этапе проектных работ является сравнительно новой для российской науки. Значительный вклад в развитие теоретических основ теплонасосной техники и в ее практическое использование внесли ученые: Васильев Г. П., Везиришвили О.Ш., Данилов В. В., Дильман М.Д., Дуванов С. А., Гершкович В. Ф., Ильин А. К., Ионов М. С., Огуречников Л.А., Савицкий А. И., Славин В. С., Унгиадзе Н. М., Филиппов С.П., Breembroek G., Carrington C.G., Christie T.H., Digiovanni M. A., Heinrich G., Lazaro F., Macmichael D., Najork H., Nestler W., Reay D., Sandle W.J., Warrington C.M., Webb R.L., и др. Однако в трудах ученых Васильева Г. П., Савицкого А. И., Славина В. С., Унгиадзе Н. М., Филиппова С.П., Гришков А.А., Федюхин А.В., Шувалов С.И., Бодров В.И., Ткачев В.М. не учтен такой фактор влияния на производительность ВТН как климатические особенности регионов РФ. В частности, теоретическими проблемами проектирования эффективной системы генерации тепловой энергии на основе ВТН занимались такие исследователи, как Федосеев В.Н., Опарина Л.А., Зайцева И.А., Острякова Ю.Е., однако их исследования не учитывают важные вопросы организации системы теплоснабжения малоэтажной застройки.

Учитывая особенности выбранной проблематики, которые основаны на совершенствовании процесса выработки тепловой энергии в малоэтажных зданиях, построенных в центральном регионе РФ, необходимо отметить, что большинство материалов носит дискуссионный характер. Все отмеченное и определило цель настоящей работы. Работа выполнялась в соответствии с научным направлением, развиваемом на кафедре «Организации производства и городского хозяйства» в рамках НИР и ОКР ИВГПУ.

**Целью диссертационного исследования** является разработка научно обоснованных организационно-технических решений по повышению эффективности функционирования воздушного теплового насоса для теплоснабжения малоэтажных зданий. Достижению поставленной цели способствует решение научной задачи обеспечения эффективной системы теплогенерации в малоэтажных зданиях и строениях, что обеспечит развитие строительной отрасли и соответствует приоритетным задачам Российской Федерации согласно государственной программе «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года», «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации» и национальным проектом «Жилье и городская среда».

**Задачи диссертационного исследования:**

– выявить проблемы организации эффективного функционирования системы теплоснабжения ВТН для малоэтажных зданий в климатических условиях центрального округа РФ на стадии проектных работ;

– изучить климатические особенности центрального округа РФ как фактора, влияющего на эффективность ресурсосберегающих систем теплоснабжения на основе ВИЭ в малоэтажном строительстве;

– усовершенствовать методику условий выбора рабочего тела (фреона) для организации экологической системы теплоснабжения на основе ВТН в малоэтажном строительстве;

– исследовать актуальную базу рабочих тел ВТН;

– определить оптимальные параметры низкопотенциальной среды ВТН при организации ресурсосберегающей системы теплоснабжения малоэтажного здания;

– реализовать разработанную модификацию ВТН при организации эффективной системы теплоснабжения на примере малоэтажного здания, построенного в Ивановской обл.

– доказать экономическую целесообразность и организационную возможность применения ВТН для отопления малоэтажных зданий.

– провести оптимизацию условий выбора эффективной системы теплоснабжения малоэтажных зданий применением ресурсосберегающих и экологичных теплогенераторов на основе ВИЭ;

– подтвердить важность организации энергоэффективного теплоснабжения малоэтажных зданий для улучшения показателей энергоемкости и экологичности экономики РФ.

Научная новизна исследования заключается в совершенствовании организации системы теплоснабжения объектов малоэтажного строительства на стадии проектирования на основе теплогенерации воздушным тепловым насосом. В итоге самостоятельно получены следующие авторские результаты, обладающие элементами научной новизны:

1. Предложена схема организации проектирования и производства ресурсосберегающей системы теплоснабжения на основе ВТН в малоэтажном строительстве, отличающаяся от существующих тем, что применялась авторская разработка в виде технологического устройства камеры смешения воздуха (разработка средства для смешения газовых потоков – патент № 185689);

2. Предложен новый подход в организации условий выбора рабочего тела ВТН на стадии проектирования малоэтажных зданий с использованием коэффициента трансформации тепла. Согласно данному подходу разработана инфографическая модель уровня термодинамической активности хладонов, позволяющая качественно повысить эффективность теплоснабжения объектов малоэтажного строительства.

3. С целью повышения качества и эффективности организации процессов проектирования систем теплоснабжения на основе ВТН в малоэтажном строительстве построена номограмма для определения пропорций смешения воздуха. Сформирован контрольный диапазон параметров технологического процесса теплоснабжения, отличающихся от существующих тем, что использовались конкретные климатические условия, которые в перспективе могут быть использованы в любом регионе РФ.

4. Разработана оптимизационная модель выбора системы организации теплоснабжения малоэтажных зданий в процессе проектирования, являющаяся эффективным инструментом выбора системы ресурсосберегающего и экономически выгодного теплогенератора на основе ВТН с учетом климатических особенностей регионов строительства.

**Теоретическая значимость работы** заключается в разработке следующих положений: построение инфографической модели уровня термодинамической активности хладагентов, создающей условия выбора эффективного хладагента при проектировании и организации строительства систем теплоснабжения ВТН; формирование основ организации производства экологичных систем теплоснабжения на базе ВТН, пригодных для эффективного функционирования в климатических условиях ЦФО России; определение зависимостей для дальнейшей оценки экономического эффекта применения систем теплоснабжения на основе ВТН в сравнении с аналоговыми системами в климатических условиях ЦФО России; создание оптимизационной модели для выбора энергоэффективной экологичной системы теплоснабжения малоэтажных строений.

**Практическая значимость диссертационной работы** заключается в том, что теоретические выводы и разработанные положения доведены до внедрения и обоснованы как экономически эффективные. Полученные данные позволяют выбирать на этапе проектных работ модель ВТН, которая будет эффективно обеспечивать отопительную нагрузку малоэтажного строения. С учетом проведенного исследования спроектирована и построена система теплоснабжения жилого двухэтажного здания в Ивановской области и произведена оценка её эффективности по предложенным оценочным показателям: термодинамическим, экономическим и критериям энергоэффективности, которые показала высокую эффективность по сравнению с традиционными системами теплоснабжения. Положения и выводы, полученные в диссертационном исследовании, могут быть использованы в работах строительной отрасли и сфере жилищно-городского хозяйства, в деятельности проектных организациях при выборе отопительного теплогенератора для малоэтажных строений, в учебном процессе для углубления знаний бакалавров, магистрантов и аспирантов по курсам «Основы ресурсо- и энергосбережения в строительстве», «Ресурсосберегающие технологии строительном производстве» и другим.

**Методология и методы диссертационного исследования.** Теоретико-методологической основой исследования послужили фундаментальные

основополагающие теории термодинамики, организации строительного производства, методы математической статистики, информационные технологии, актуальные своды правил проектных работ, функционирования теплового насоса, разработки отечественных и зарубежных ученых по вопросам организации систем отопления. Научно-техническая гипотеза диссертационного исследования основывается на теоретико-методических положениях, позволивших предложить авторские предложения, направленные на повышении эффективности работы системы теплоснабжения малоэтажных зданий с применением ВТН. Предметом исследования является существующая модель ВТН, характеризующаяся низкой эффективностью в климатических условиях центрального округа РФ. Объектом исследования выступают малоэтажные строения. Полученные численные значения параметров воздушной среды в камере смешения для эффективного функционирования ВТН – итог результатов длительного эксперимента с участием автора.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Проектная схема организации эффективной системы теплоснабжения объектов малоэтажного строительства на основе разработанной модификации ВТН – камеры смешения воздуха.

2. Методика выбора эффективного рабочего тела (хладона) для совершенствования организации экологичного и энергоэффективного производства тепла воздушным тепловым насосом.

3. Номограмма определения эффективных пропорций смешения воздушной среды в камере смешения воздуха.

4. Оптимизационная модель системы организации теплоснабжения малоэтажных зданий.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается использованием классических методов анализа и совершенствования рассматриваемых термодинамических циклов, а также результатами экспериментальных исследований в лабораторных и промышленных условиях.

**Апробация работы и публикации.** Основные положения и результаты работы докладывались и получили одобрение: на научно-практической конференции аспирантов, молодых ученых и студентов факультета ИСИ ИВГПУ; программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса»; над грантом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере «УМНИК»; научно-техническом форуме SMART BUILD ИВГПУ. Настоящая работа выполнялась в рамках научного направления Ивановского государственного политехнического университета «Физико-технические проблемы энергосбережения и экологии», тема ГБ 01.12 (№ гос. рег.01200117677).

**Личный вклад автора.** Автор сформулировал цели и задачи, выбрал объекты, методологию и методы исследований, разработал комплекс теоретических и экспериментальных исследований; лично осуществлял постановку и решение задачи организации производства проектных работ по повышению эффективности функционирования ВТН в условиях центрального округа РФ; обработал и проанализировал основные результаты, практическая реализациях, которых так же проводилась при непосредственном участии автора. В совместных работах, выполненных в соавторстве с научным руководителем профессором д.т.н. Федосеевым В.Н., консультантом д.т.н. Опариной Л.А., а также с д.т.н. Федосовым С.В., к.э.н. Остряковой Ю.Е., к.э.н Зайцевой И.А. Автор лично участвовал в проведении теоретических и экспериментальных исследований и обсуждении их результатов.

**Публикации.** Основные результаты исследований по теме диссертации изложены в 20 статьях, в том числе 7 статей опубликованы в изданиях, рекомендуемых ВАК и в базе SCOPUS. На основе результатов исследований было разработано и получено пять патентов на полезную модель: РФ № 165990, РФ № 166031, РФ № 174083, РФ № 177875, РФ № 185689.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объем работы: 144 страниц машинописного текста, включая 52 рисунков, 30 таблиц и список литературы из 151 наименования.

**Содержание диссертации** соответствует п. 4 (Моделирование и оптимизация организационных структур и производственных процессов, вспомогательных и обслуживающих производств. п. 7 (Организация ресурсосберегающих и экологических производственных систем) паспорта специальности 05.02.22 – Организация производства (строительство).

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследований, а также, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проанализирован потенциал развития малоэтажного строительства в Российской Федерации. Выявлены проблемы современного положения организации производства и проектирования теплоснабжения для малоэтажной жилой застройки. Проведено исследование проектных решений при выборе автономного источника теплоснабжения в малоэтажных строениях. Исследована государственная поддержка организационно-экономических схем

производства энергоэффективного теплоснабжения малоэтажного строительства. Проведен анализ возможности применения ВТН в качестве основного источника теплоты на стадии организации энергоэффективной системы теплоснабжения малоэтажного строения, что явилось основой дальнейшего исследования.

**Вторая глава** посвящена совершенствованию процессов организации условий выбора рабочего тела (хладона) в процессах проектирования и организации строительства систем теплоснабжения малоэтажных строений воздушным тепловым насосом.

На стадии проектирования систем теплоснабжения ВТН важным вопросом является выбор эффективного рабочего тела. Рабочим телом для ВТН выступает фреон. Это галогеноалканы, фторсодержащие производные насыщенных углеводородов (главным образом метана и этана), используемые как хладагенты в теплохолодильных машинах (кондиционеры; холодильники). Известно более 40 различных видов фреонов, большинство из них выпускается промышленностью. Принципиальная схема тепло-холодильного контура представлена на рисунке 1.

Организация выбора рабочего тела ВТН основополагается на изотермическом сжатии атмосферного воздуха с помощью компрессора высокого давления с последующим его адиабатным расширением. Аппаратно это происходит при извлечении вентилятором атмосферного воздуха, в составе которого всегда присутствует рассеянное тепло, и который обтекает замкнутый рабочий контур с фреоном, увеличивая его давление. В процессе анализа выведены наиболее известные и экономически выгодные хладоны, применяемые в настоящее время в малоэтажном строительстве: R 22; R134; R404; R407; R507.

Основными условиями выбора рабочего тела при организации производства и проектирования ВТН являются термодинамическая активность и стоимость, что в конечном итоге зависит от условий эксплуатации и особенностей объекта малоэтажного строительства.

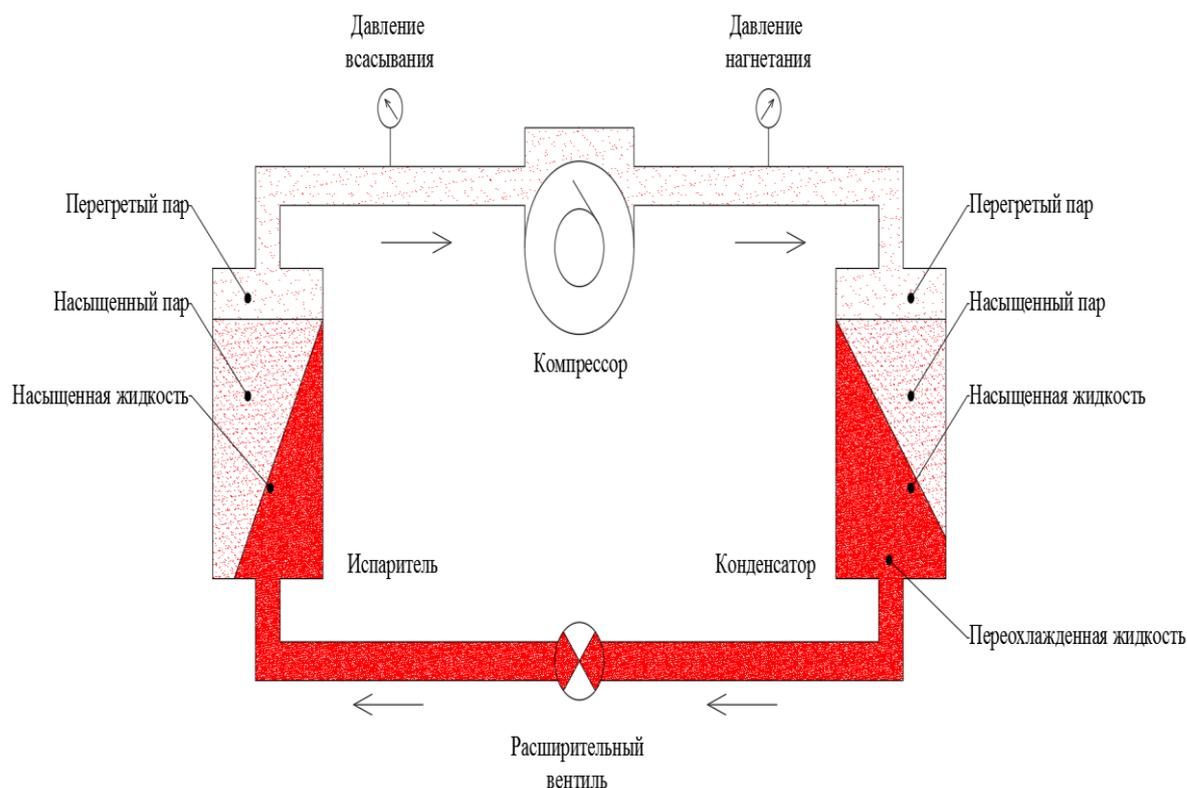


Рисунок 1. Принципиальная схема замкнутого рабочего контура ВТН

Основным фактором в процессе проектирования систем теплоснабжения ВТН является его эффективность, которая напрямую зависит от термостатической активности фреонов. Оценивая такой фактор условий выбора рабочего тела для производства и проектирования теплоснабжения ВТН как термодинамическое совершенство анализируемых фреонов, отобранные приоритетные показатели сведены автором в один обобщающий (интегральный) показатель, по значению которого появляется возможность судить о совершенстве уровня термодинамической активности фреонов (ТДАФ). Для этого рассмотрены наибольшие значения по следующим показателям: «относительная молекулярная масса», «коэффициент энергоэффективности», «теплота парообразования», а также минимальные значения по таким показателям, как: «давление», «объем фреона», «работа компрессора». Реализуя эти данные, построена диаграмма (рис. 2) – композиционная инфографическая модель.

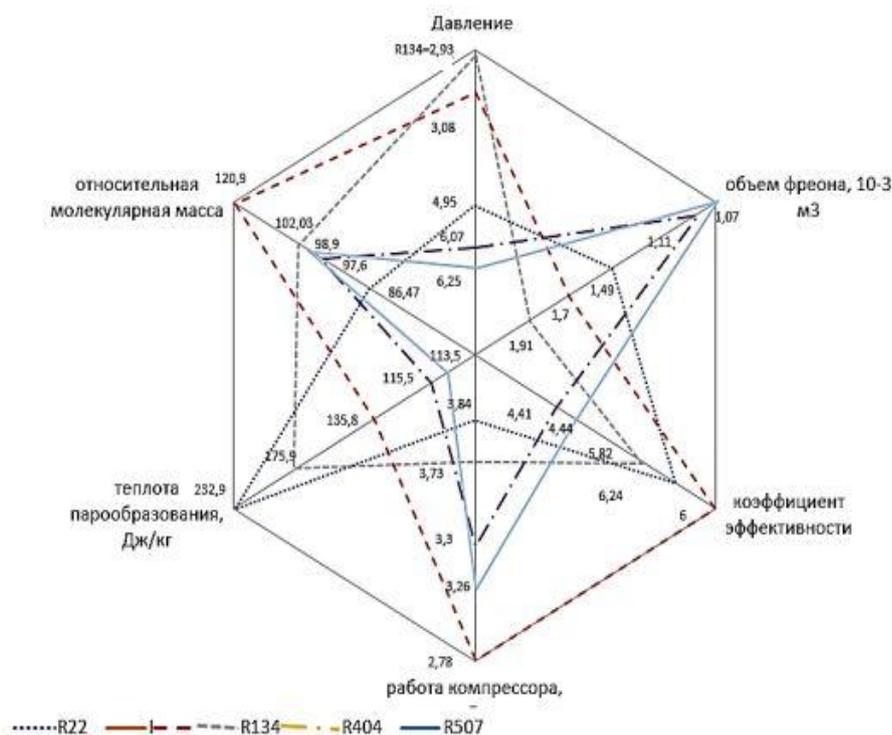


Рисунок 2 – Композиционная инфографическая модель уровня термодинамической активности фреонов

Отраженная на диаграмме (рис. 2) информационная модель позволяет показать позицию «идеального» для достигнутого уровня термодинамической активности фреона. Она характеризуется «веревочным» многоугольником, соответствующим принятым автором наилучшим значениям показателей на каждом луче диаграммы. Площадь фигуры, обобщенно ограниченная многоугольником, отражает достоинства рассматриваемых видов фреонов. Чем она больше, тем выше уровень их термодинамической активности (ТДАФ). Замер площадей по построенной диаграмме и соотношение площадей, соответствующих каждому виду фреона, с площадью «идеального» фреона позволяет оценить конкретный уровень активности каждого фреона по формуле:

$$\text{ТДАФ}_i = S_i : S_u \quad (1)$$

где ТДАФ<sub>i</sub>– значение уровня термодинамической активности i-го фреона, доли единицы;

S<sub>i</sub>– площадь многоугольника, соответствующая i-му фреону, единицы площади;

S<sub>u</sub>– то же, "идеального" фреона, единицы площади.

Для наглядности проанализированы и проранжированы актуальные фреоны в порядке уменьшения значений интегрального показателя ТДАФ (рис. 3).

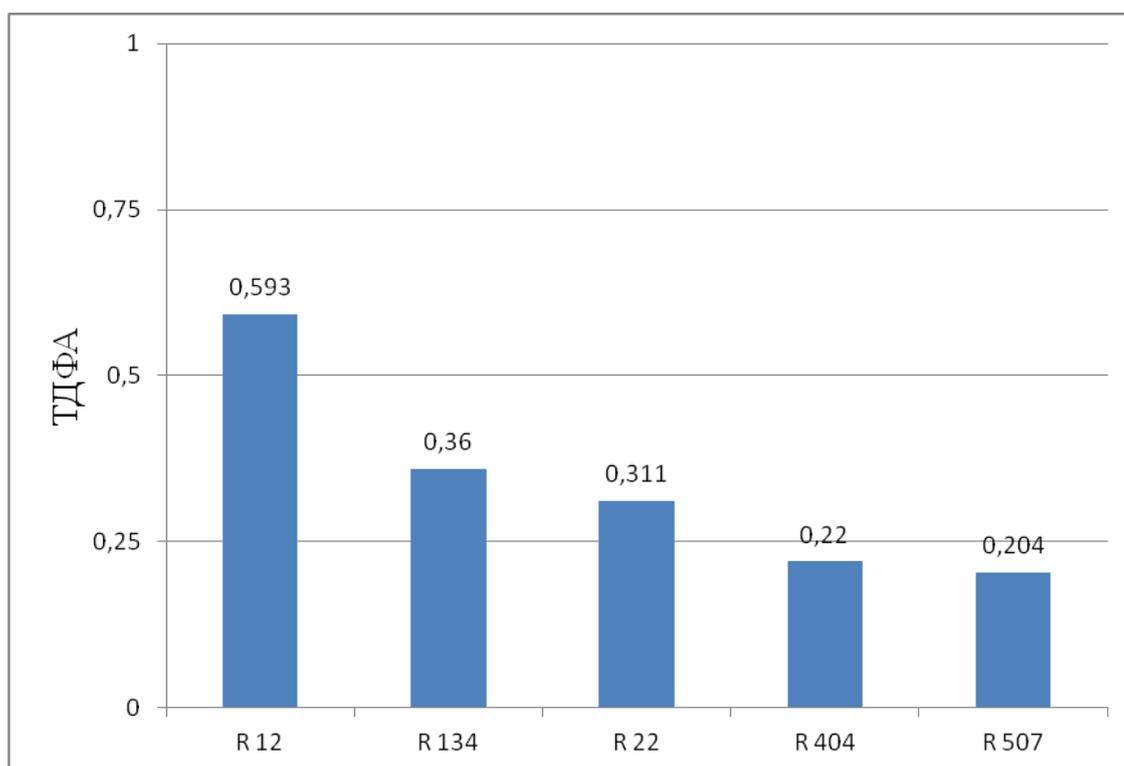


Рисунок 3 - Ранги анализируемых фреонов по уровню термодинамической активности

Ранжирование фреонов позволило установить, что наиболее эффективным по уровню термодинамической активности и наиболее полезным для теплового насоса является фреон R12. Но в настоящее время его использование с точки зрения экологии сокращается, следовательно, приоритетным является фреон R134. Все остальные анализируемые фреоны близки по объемному расходу и экономической эффективности, поэтому окончательный выбор производится исходя из экологической безопасности и энергетической эффективности.

**Третья глава** посвящена организации производства и проектирования эффективной системы теплоснабжения ВТН в малоэтажном строительстве в климатических условиях центрального региона РФ на примере Ивановской области.

Для определения эффективности работы ВТН в малоэтажном строительстве проведен анализ климатических данных Ивановской области (таблица 1).

Таблица 1- Климатические данные Ивановской области 2012 года.

Месяц	Продолжительность сохранения заданной температуры воздуха, ч			Среднее значение температуры наружного воздуха, °С
	Ниже -15°С	От 0 до -15°С	Свыше 0 °С	
1	2	3	4	5
Январь	326	328	92	-10,78

Февраль	444	252	-	-8,99
Март	118	476	150	0,76
Апрель	2	124	594	10,61
Май	-	-	744	15,45
Июнь	-	-	720	18,24
Июль	-	-	744	17,91
Август	-	-	744	14,09
Сентябрь	-	-	720	9,75
Октябрь	-	131	613	5,01
Ноябрь	-	363	357	0,82
Декабрь	345	351	48	-11,12
Итого(год)	1235	2025	5526	5,01

Полученные данные позволили автору определить амплитуду колебания значения средней температуры на рассматриваемом промежутке времени, а также определить наиболее холодный и теплый год.

Максимальное количество часов с температурой наружного воздуха в Ивановской области ниже  $-15^{\circ}\text{C}$  составило 1235 и приходится на 2012 год. Минимальное количество часов с температурой наружного воздуха ниже  $-15^{\circ}\text{C}$  составляет 461 часов и приходится на 2014 год. Эти данные говорят о том, что существующая модель ВТН неэффективно использовать в центральном регионе РФ, большое количество часов, так как они функционируют при достаточно низкой производительности.

Отсюда следует вывод, что существующая система производства и проектирования систем теплоснабжения малоэтажных зданий ВТН требует модернизации, в частности необходимо решить проблему низкой эффективности данного теплогенератора при температурах наружного воздуха менее  $-15^{\circ}\text{C}$ . Таким решением может быть использование смешанного воздушного потока, образующегося из внутреннего вытяжного и приточного наружного воздуха, устраиваемых в наружных ограждениях, конструкциях здания. Смешение воздушных потоков происходит в специальном устройстве. В развитие заявки на Патент о полезной модели №185689 автором предложена конструкция в виде камеры смешения воздуха (рис. 4).

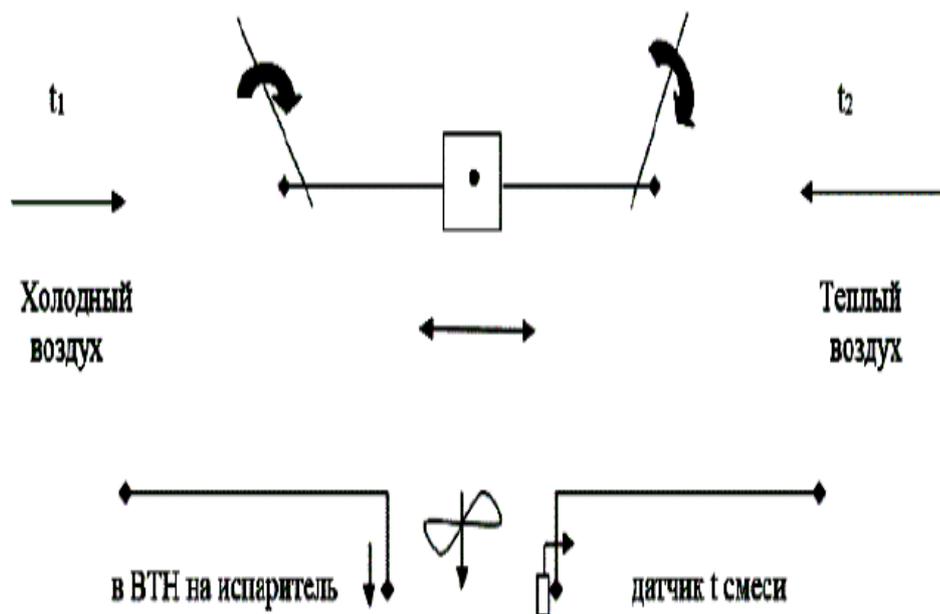


Рисунок 4 – Схема смешения воздушных потоков при помощи заслонок в камере смешения воздуха

Камера смешения в данном случае является важным звеном для подачи утилизированного смешанного воздуха с конкретной температурой через вентилятор на испаритель ВТН. Данная система воздухообмена в холодный(отапливаемый) период года работает обычно с рециркуляцией и естественной инфильтрацией, то есть на смеси воздуха наружного и внутреннего (забираемого из помещения). Автором предложено встраивать камеру смешения воздуха в наружных ограждающих конструкциях(стене) здания совместно с ВТН.

Для практического расчета эффективной температуры подаваемого смешанного воздуха на испаритель теплового насоса предлагается инженерный метод расчета, основанный на влиянии процентного соотношения температур по формуле улица-помещение для наших климатических условий ЦФО. Полученная составная номограмма, отображающая процентное соотношение воздухообмена (рис. 5).

Графическое решение в виде номограммы позволяет расширить возможности регулирования эффективной работы ВТН в течение всего года в зависимости от цели потребителя. Микропроцессорный контроллер блока управления системой смешивания воздушной массы позволяет путем программного ввода в процессор данного графического решения через исполнительный механизм данной системы обеспечить его решение с последующим выводом данных на дисплей.

Развитие предложенной технологии теплообмена через воздушный тепловой насос (ВТН) российского производства дает возможность обеспечить необходимый

микроклимат в малоэтажных зданиях и строениях, отвечающий требованиям действующих нормативов. Пользуясь номограммой и ее численными значениями для воздухообмена, становится возможным поддерживать и регулировать соответствующий микроклимат.

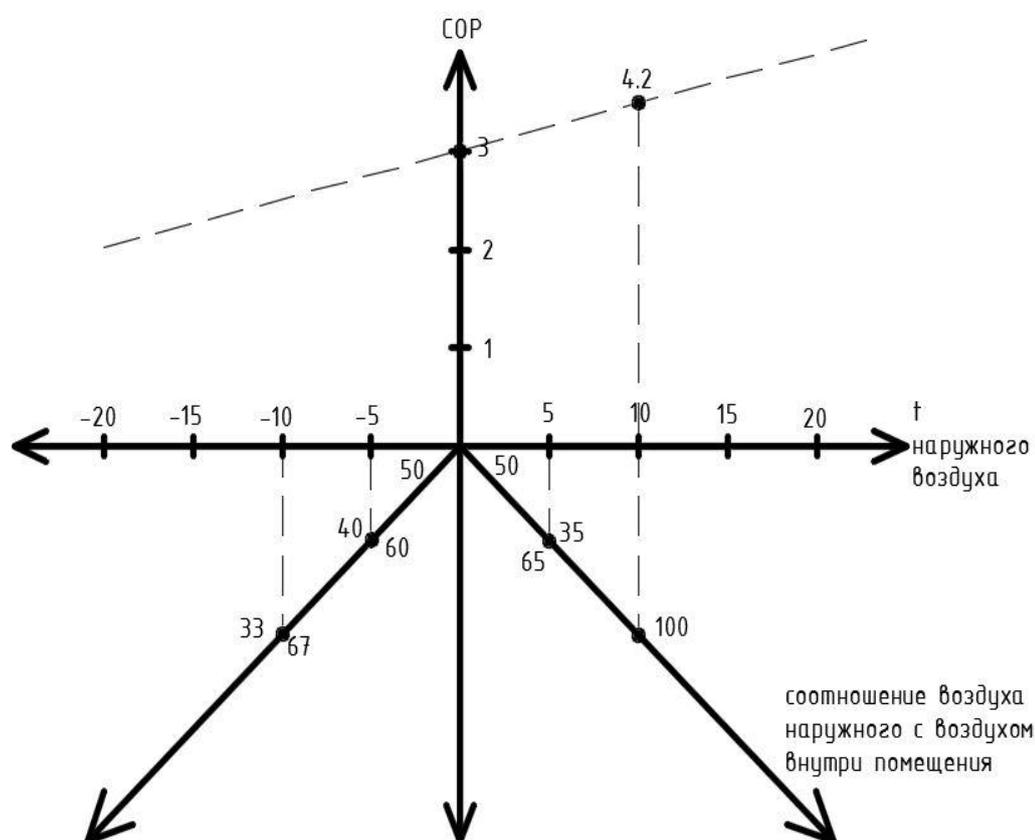


Рисунок 5 – Номограмма выбора параметров смешения внутреннего и наружного воздуха в камере смешения

Полученные результаты позволяют на стадии проектирования систем теплоснабжения малоэтажных строений создать условия выбора наиболее эффективного источника выработки тепловой энергии.

Также в данной главе автором приведены основные условия по организации производства СМР по установке и эксплуатации усовершенствованной модели ВТН с камерой смешения воздуха. Приведены два варианта расположения данного устройств: внутри и снаружи объекта малоэтажного строительства (рис. 6 и рис. 7).

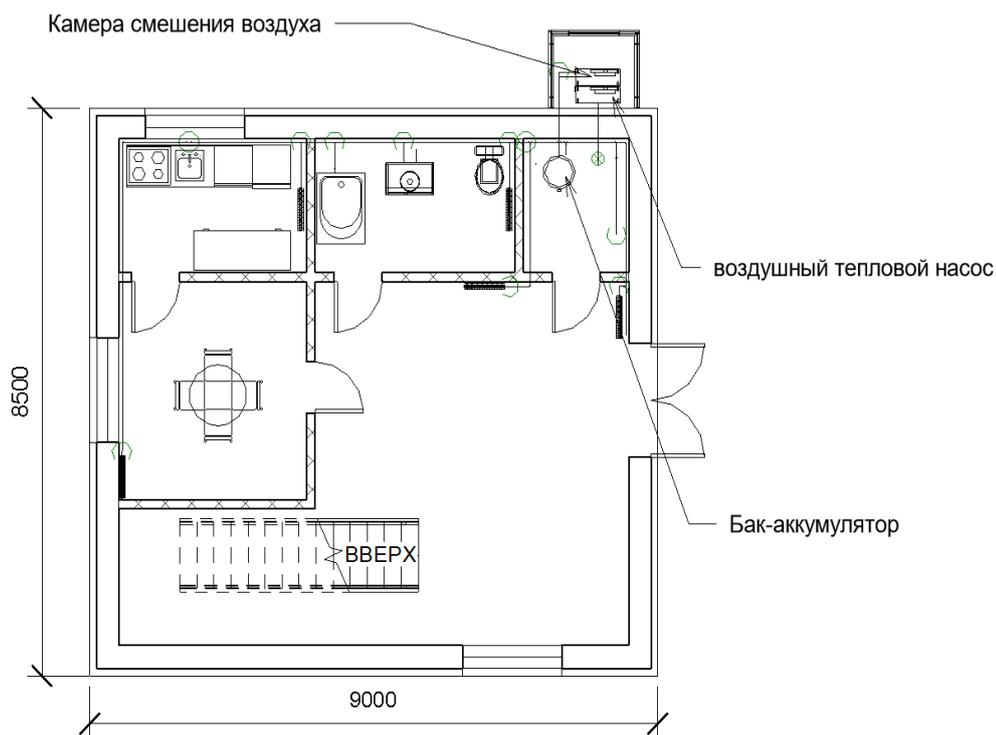


Рисунок 6 – Организация устройства ВТН с камерой смешения воздуха снаружи отапливаемого объекта малоэтажного строительства

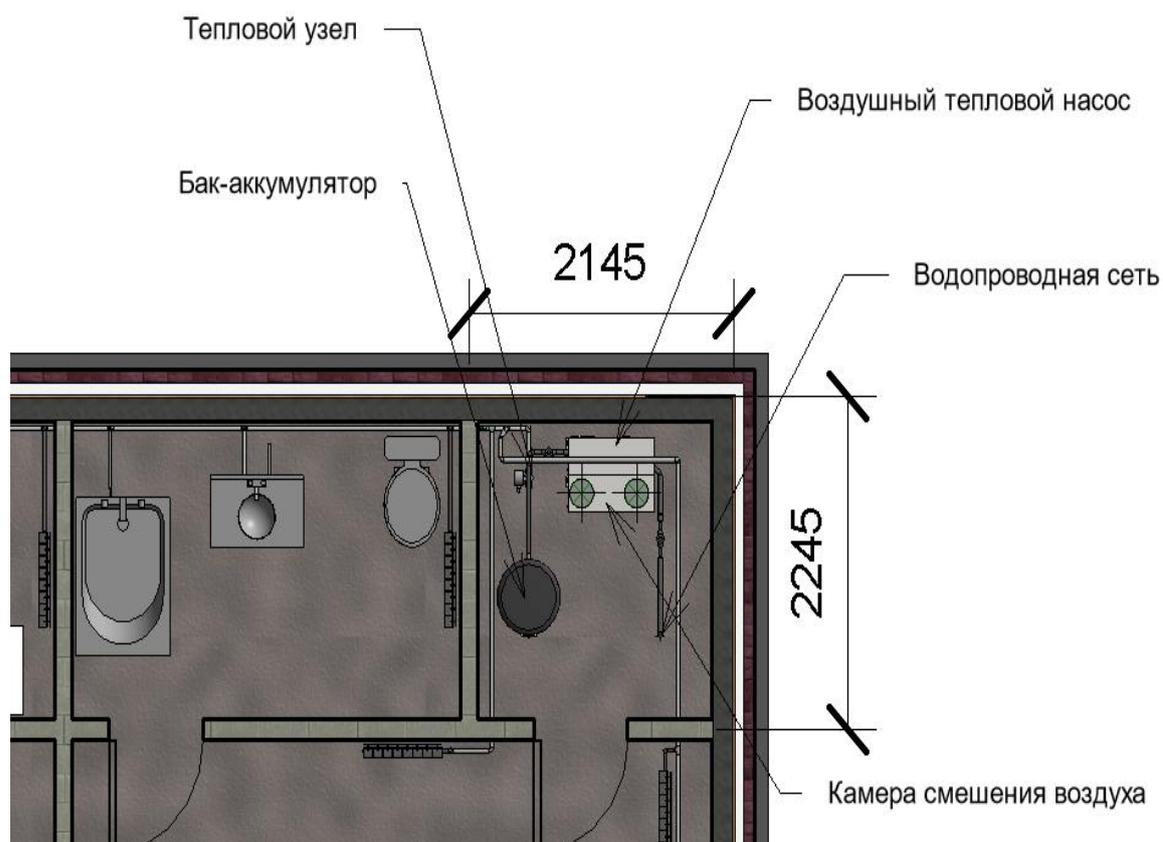


Рисунок 7 – Организация устройства ВТН с камерой смешения воздуха внутри отапливаемого объекта малоэтажного строительства

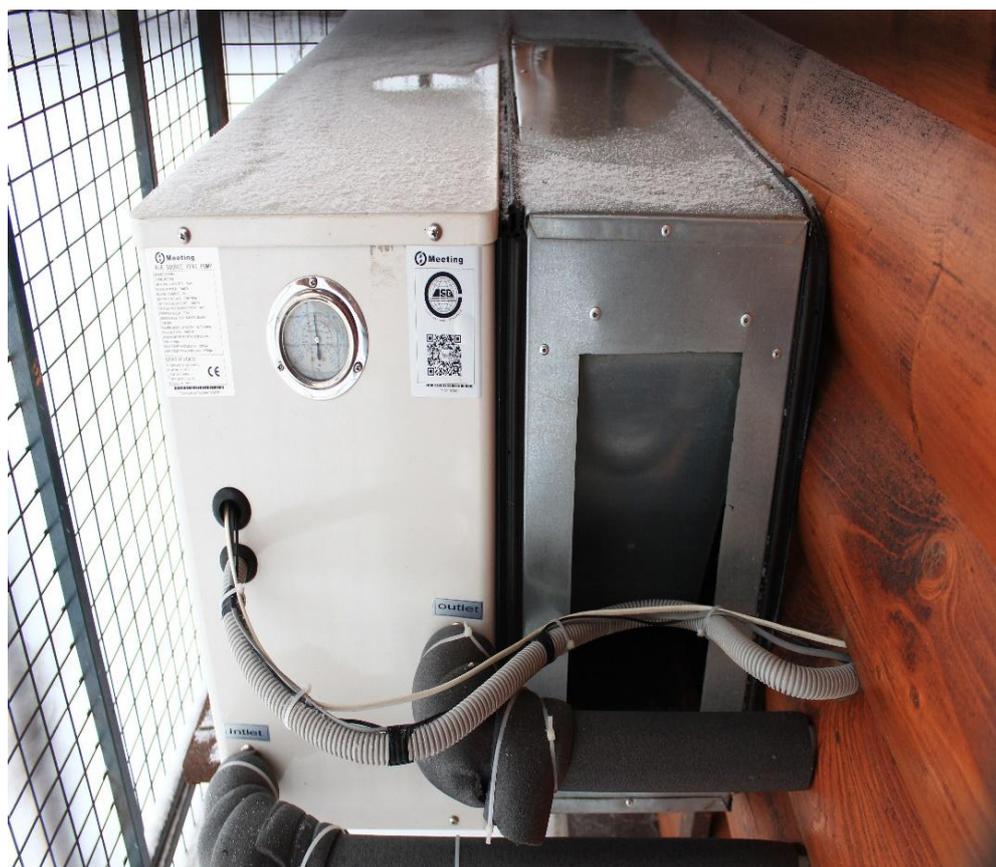


Рисунок 8 – Фото камеры смешения (патент № 185689) и ВТН установленные в малоэтажном жилом здании в Ивановской обл

**В четвертой главе** выявлены основные проблемы существующей системы организации проектирования и строительства систем теплоснабжения малоэтажных строений на основе применения воздушного теплового насоса и предложено эффективное решение данных проблем, создана оптимизационная модель. С целью нахождения наилучшего (оптимального) с точки зрения определенного критерия выбора системы теплоснабжения малоэтажного строительства. Дано описание созданной оптимизационной модели по выбору эффективной системы теплоснабжения для малоэтажных зданий и строений на основе ВТН с учетом климатических особенностей ЦФО РФ.

Задача выбора может быть решена с помощью модели линейного программирования. Причем ввиду того, что речь идет о выборе варианта системы теплоснабжения, то целесообразно рассматривать задачу целочисленного программирования с булевыми переменными.

Примем обозначения:

пусть  $j$  – индекс, соответствующий варианту системы теплоснабжения, принимает значение  $j \in \{1, 2 \dots n\}$ ;

$x_j$  – переменная, соответствующая  $j$ -й системе, принимающая значение либо 1, либо 0.  $x_j \in \{0, 1\}$

$T_j$  – период эксплуатации  $j$ -й системы теплоснабжения, лет.

$C_j$  – эксплуатационные затраты  $j$ -й системы теплоснабжения, руб.

$E_j$  – получаемая экономия  $j$ -й системы теплоснабжения, рассчитанная на основании сравнения с электрическим котлом, руб.

$F(x_j)$  – показатель эффективности системы теплоснабжения, руб.

Критерием оптимизации является следующая функция:

$$F(x_j) = \sum_{j=1}^n (E_j x_j - C_j x_j) \times T_j \rightarrow \max \quad (29)$$

Для данной оптимизационной задачи система ограничений примет следующий вид:

$$\begin{cases} 30 > T x_j > 0 \\ \sum x_j = 1 \\ \sum_{j=1}^n E_j x_j > C_j x_j \\ \sum_{j=1}^n N_j x_j < 40 \end{cases} \quad (30)$$

где:  $30 > T(x_j) > 0$  – ограничение периода эксплуатации системы теплоснабжения;

$\sum x_j = 1$  – ограничение варианта рассматриваемой системы теплоснабжения;

$E_j(x_j) > C_j(x_j)$  – ограничение экономической эффективности системы теплоснабжения;

$N_j \times x_j < 40$  – ограничение на максимальную нагрузку системы теплоснабжения малоэтажных строений.

Для формирования условий модели необходимы следующие исходные данные. Нагрузка теплоснабжения ( $N_j$ ) и срок эксплуатации системы теплоснабжения ( $T_j$ ) задаются пользователем. На основании климатических особенностей выбранного региона для каждой системы теплоснабжения производит расчет эксплуатационных и капитальных затрат ( $E_j$ ). Затем каждая рассматриваемая система теплоснабжения производит сравнение с аналогичной системой на основе теплогенерации электрическим котлом и рассчитывается значение экономии предлагаемого энергоэффективного теплогенератора ( $C_j$ ). Подробнее алгоритм выбора оптимальной системы теплоснабжения малоэтажного здания изображен на рисунке 9.

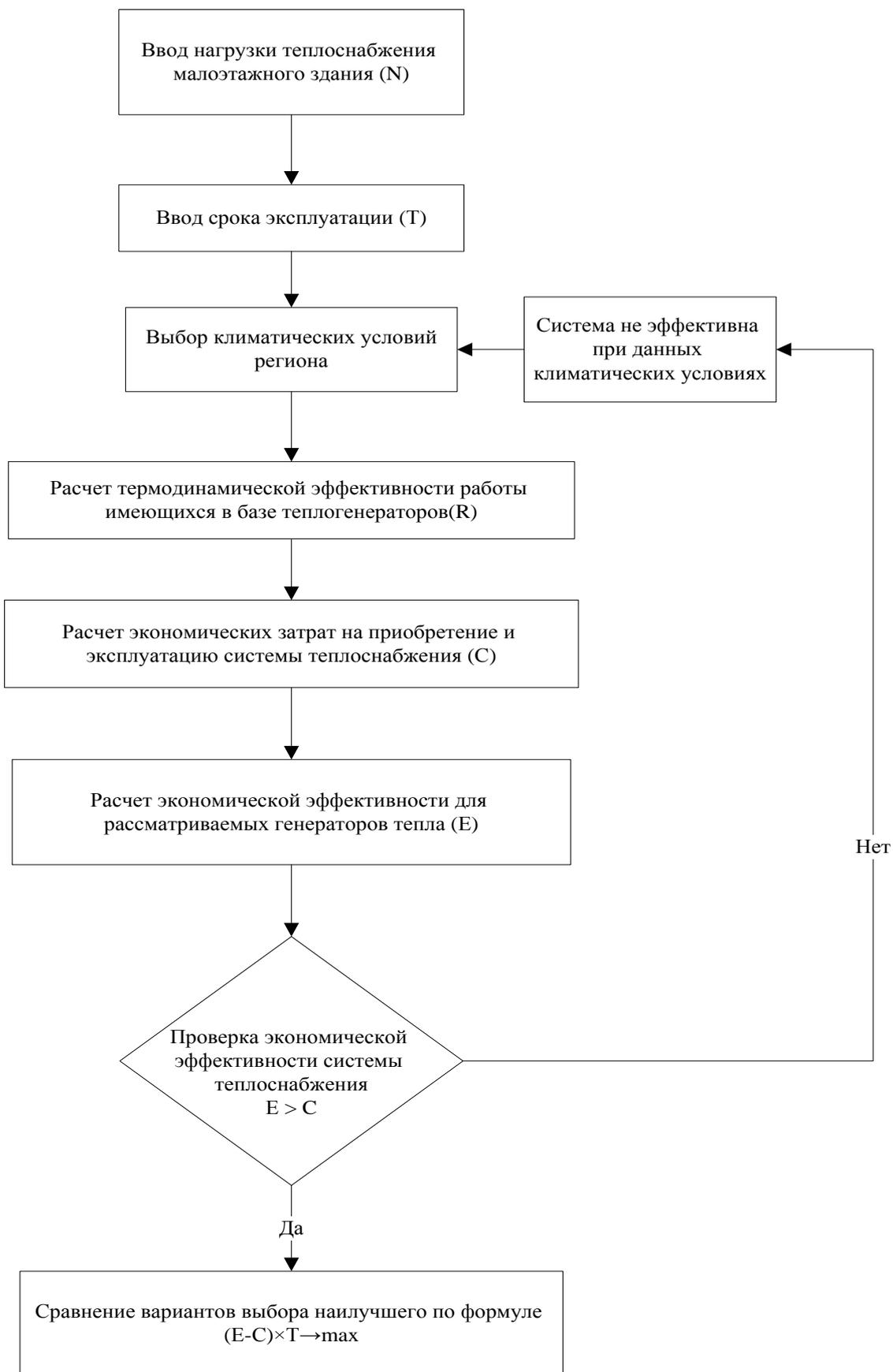


Рисунок 9 – Блок-схема выбора оптимальной системы теплоснабжения малоэтажного здания

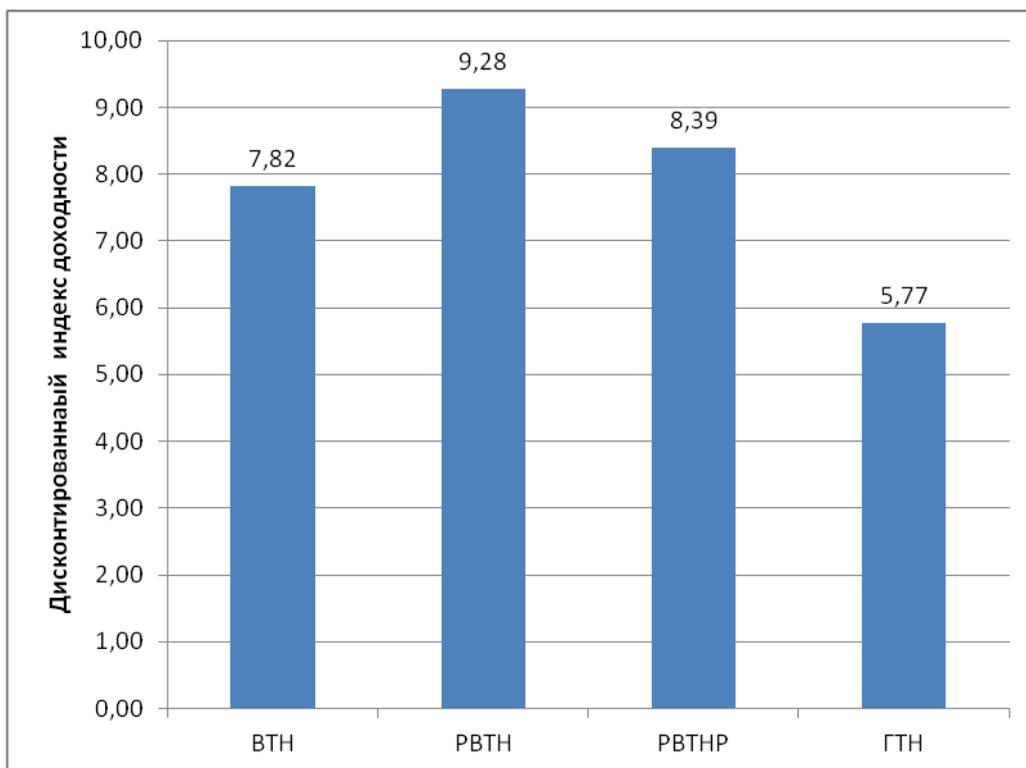


Рисунок 10 – Индекс доходности рассматриваемых систем теплоснабжения

Оптимизационная модель располагает 4 вариантами ресурсосберегающих отопительных систем: ВТН – системы теплоснабжения на базе воздушного теплового насоса, РВТН – усовершенствованная система теплоснабжения на базе воздушного насоса с камерой смешения воздуха, РВТНР – усовершенствованная система теплоснабжения на основе воздушного теплового насоса с камерой смешения воздуха и рекуператором, ГТН – система теплоснабжения на основе геотермального теплового насоса. Практическая значимость созданной оптимизационной модели состоит в том, что её использование позволяет усовершенствовать процесс выбора энергоэффективной системы теплоснабжения в зависимости от требований заказчика, тепловой нагрузки и географического расположения объекта, что позволит значительно ускорить процесс проектирования системы теплоснабжения малоэтажных строений, а также применение оптимизационной модели сокращает трудозатраты на стадии проектных работ и работ по организации строительства, при этом получая конкретный и обоснованный результат для организации энергоэффективного теплоснабжения малоэтажных строений. Кроме того, данная модель необходима для изучения молодым специалистам, студентам, аспирантам и магистрантам, обучающимся по профилю проектирования систем теплоснабжения, поскольку алгоритм модели и ее информационная база позволит им организовать свой процесс проектирования. Также применение данной модели совершенствует и упрощает процесс подбора оборудования организациям, ориентированным на продажу теплогенераторов, поскольку при минимальных исходных данных позволяет получить конкретный результат эффективности работы тепловых насосов

В качестве примера работы созданной оптимизационной модели для выбора эффективной системы теплоснабжения приводится расчет для малоэтажного жилого строения в климатических условиях Ивановской области: капитальные затраты (рис.11), эксплуатационные затраты (таблица 2), значение ЧДД (таблица 3).

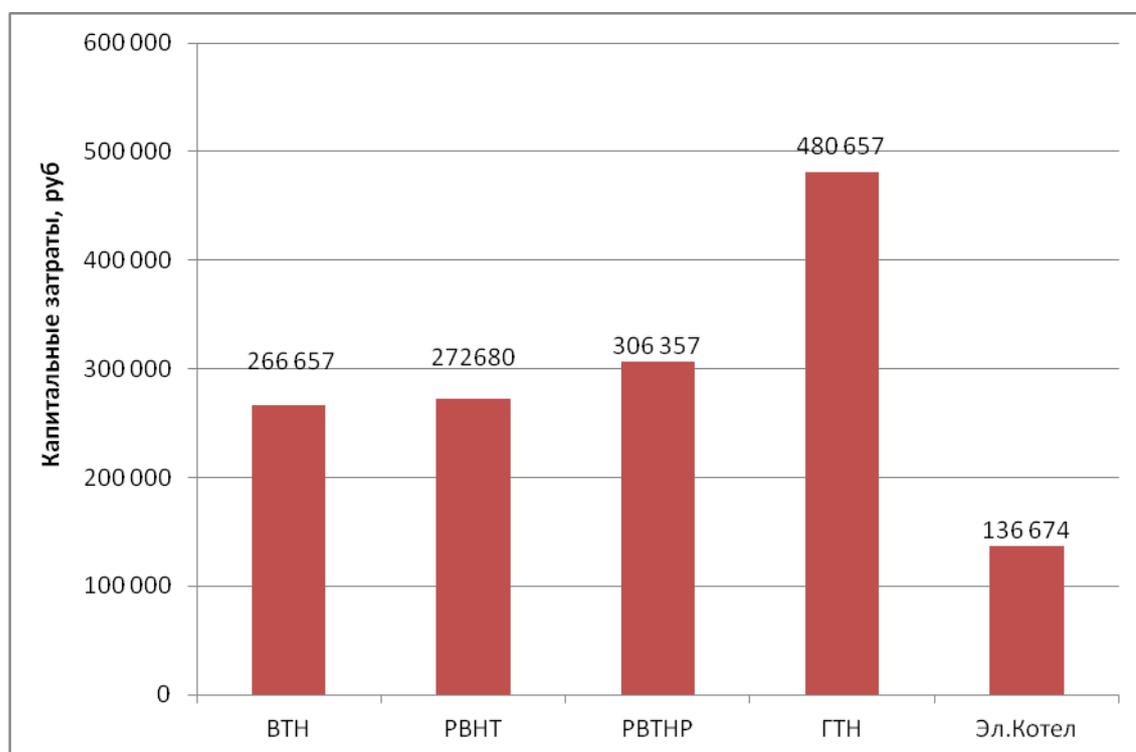


Рисунок 11 – Капитальные затраты на приобретение системы теплоснабжения

Таблица 2 – Эксплуатационные затраты систем теплоснабжения в расчете на цены 2018 года

Температура	Эксплуатационные затраты для систем теплоснабжения на основе, руб				
	ВТН	РВТН	РВТНР	Эл. котел	ГТН
1	2	3	4	5	6
-30	1070	432	405	1284	321
-25	1537	668	628	1998	499
-20	3778	1820	1717	5478	1369
-15	6924	3656	3462	11078	2770
-10	13086	7508	7134	22901	5725
-5	14676	10278	9799	31554	7888
0	6755	5465	5228	16888	4222
5	9018	8177	7849	25432	6358
10	4248	4248	4248	13805	3451

15	7256	7256	7256	26267	6567
Итого за год	68347	49509	47727	39171	156682

Таблица 3 - Определение значения для ЧД для теплового насоса

Год	ЧД ВТН, руб.	ЧД РВТН, руб.	ЧД РВТНР, руб.	ЧД ГТН, руб.	Е, %	ЧДД ВТН, руб.	ЧДД РВТН, руб.	ЧДД РВТНР, руб.	ЧДД ГТН, руб.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	88334	107173	108955	117512	18	104235	126464	128567	138664
2	88334	107173	108955	117512	18	104235	126464	128567	138664
3	88334	107173	108955	117512	18	104235	126464	128567	138664
4	88334	107173	108955	117512	18	104235	126464	128567	138664
5	88334	107173	108955	117512	18	104235	126464	128567	138664
6	88334	107173	108955	117512	18	104235	126464	128567	138664
7	88334	107173	108955	117512	18	104235	126464	128567	138664
8	88334	107173	108955	117512	18	104235	126464	128567	138664
9	88334	107173	108955	117512	18	104235	126464	128567	138664
10	88334	107173	108955	117512	18	104235	126464	128567	138664
11	88334	107173	108955	117512	18	104235	126464	128567	138664
12	88334	107173	108955	117512	18	104235	126464	128567	138664
13	88334	107173	108955	117512	18	104235	126464	128567	138664
14	88334	107173	108955	117512	18	104235	126464	128567	138664
15	88334	107173	108955	117512	18	104235	126464	128567	138664
16	88334	107173	108955	117512	18	104235	126464	128567	138664
17	88334	107173	108955	117512	18	104235	126464	128567	138664
18	88334	107173	108955	117512	18	104235	126464	128567	138664
19	88334	107173	108955	117512	18	104235	126464	128567	138664
20	88334	107173	108955	117512	18	104235	126464	128567	138664

Предлагаемая оптимизационная модель выбора системы теплоснабжения малоэтажных строений на стадии их проектирования может быть использована также при разработке дорожных карт и стратегий развития ТЭК, так как она позволит увидеть динамику энергопотребления строений в масштабах как отдельного здания, так и всей страны. Автор считает целесообразным внедрять построение предлагаемой модели при выборе проектных решений в разделе «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха», как для вновь проектируемых, так и для реконструируемых, существующих зданий и сооружений.

**В заключении** приведены итоги выполненного исследования:

1. В ходе исследования проектно-организационных основ по разработке систем теплоснабжения малоэтажных строений установлено, что существующая нормативно-техническая документация имеет несколько значительных недостатков: отсутствие методики подсчета конкретных параметров эффективной работы ВТН в условиях климата РФ, отсутствие характеристик работы ВТН при использовании различных отопительных приборов. Обосновано, что для повышения

энергоэффективности малоэтажных зданий требуется актуализировать и дополнить существующую нормативно-техническую проектную базу.

2. В результате изучения температуры и погодных условий в Ивановской области, сделан вывод о том, что существующие модели ВТН не способны эффективно функционировать и их необходимо модифицированы с учетом специфики климатических особенностей ЦФО РФ следующим образом: произвести монтаж камеры смешения воздуха, использующей для подогрева уличного воздуха тепло воздуха удаляемого из отапливаемого здания. Научная новизна предлагаемого автором устройства подтверждается патентом на полезную модель (Разработка средства для смешения газовых потоков – авторское свидетельство РФ №185689).

3. Автором рассмотрены характеристики современных фреонов с целью определения наиболее эффективного рабочего тела для внутренних циклов работы ВТН в результате чего предложена инфографическая модель термодинамической активности фреонов. Данная модель отражает достоинства и недостатки современных фреонов и позволяет выбрать наиболее эффективное рабочее тело для режима эксплуатации ВТН на стадии проектирования систем теплоснабжения, с учетом экологичности процесса выработки тепловой энергии.

4. В диссертационном исследовании приведены результаты прикладного исследования трансформаций фреонов в процессе выработки тепловой энергии ВТН при конкретных параметрах низкопотенциального теплоносителя. Сделан вывод, что существующую проектную документацию необходимо дополнить данными о специфике выработки тепловой энергии ВТН в зависимости от применяемого фреона.

5. Выявлены оптимальные параметры для низкопотенциального источника тепла для эффективной работы ВТН, учитывающие комфортные климатические условия для жизнедеятельности человека в отапливаемом здании. Указанные параметры следует учитывать на стадии организации производства проектных работ, что позволит повысить энергоэффективность теплоснабжения малоэтажных строительных объектов. Данные сведены в номограмму выбора эффективной температуры воздуха, подаваемого на испаритель ВТН.

6. Процессы совершенствования организации проектных работ энергоэффективных систем теплоснабжения малоэтажных строений на основании применения ВТН внедрены в проектировании, строительстве и эксплуатации малоэтажного жилого здания на территории Ивановской области. Мониторинг работы системы теплоснабжения на этом объекте продолжается с 2017 года и подтверждает теоретические выводы данного исследования.

7. Доказана экономическая целесообразность применения систем теплоснабжения на основе ВТН для малоэтажных строений в условиях климата центрального региона России. В расчете рассмотрены как существующие модели ВТН, так и модернизированные с целью их функционирования в конкретных климатических условиях (г. Иваново). Модернизация ВТН заключается в виде дополнительной конструкции – камеры смешения воздуха, выполненной в соответствии с патентом на полезную модель №185689 «Средство для смешения газовых потоков».

8. Исследована специфика работы системы теплоснабжения малоэтажного здания на базе ВТН в г. Иваново на основании которой разработана оптимизационная модель, целевой функцией которой является достижение экономического эффекта при использовании различных систем теплоснабжения. При разработке модели использовались климатические данные Ивановской области за период 2013-2018 гг. Для оценки эффективности системы теплоснабжения были выявлены и сформулированы критерии, которые были сгруппированы в два блока: термодинамические показатели и экономические. К модели разработан алгоритм, который наглядно демонстрирует логическую цепочку расчетного цикла разработанной оптимизационной модели, а также дает представление о факторах, влияющих на конечный результат оптимизационного расчета. На основе модельных расчётов получены данные позволяющие сделать вывод, что в климатических условиях Ивановской области наиболее эффективным решением системы теплоснабжения является рециркуляционный воздушный тепловой насос. Разработанная оптимизационная модель способствует решению задачи, сформулированной Федеральным Законом № 261-ФЗ от 29.11.2009 г. «Об энергосбережении и энергетической эффективности...» за счет оптимизации организационного процесса проектных работ энергоэффективных систем теплоснабжения. Модель способна выдать достаточно точный результат по эффективности работы теплогенераторов в заданном климатическом регионе на основании минимального количества исходных данных объекта малоэтажного строительства. Предлагаемая оптимизационная модель имеет важное научное, экономическое и экологическое значение.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

*публикации, включенные в перечень, определенный ВАК Минобрнауки РФ:*

1. Алоян Р.М., Федосеев В.Н., Петрухин А.Б., Зайцева И.А., **Воронов В.А.**, Емелин В.А. Анализ энергоэффективности воздушного теплового насоса и электродкотла в условиях текстильного и швейного производства// Известия вузов. Технология текстильной промышленности – 2016. - №4. – С.5-11.

2. Алоян Р.М., Федосеев В.Н., Виноградова Н.В., **Воронов В.А.** Автоматизация функционально-структурной схемы теплообеспечения текстильного малоэтажного строения// Известия вузов. Технология текстильной промышленности – 2017. - №2. – С.335-337.

3. Алоян Р.М., Федосеев В.Н., Виноградова Н.В., **Воронов В.А.** Сравнительная эффективность теплоотдачи современных видов отопления в малоэтажных текстильных строениях// Известия вузов. Технология текстильной промышленности – 2017. - №3. – С.237-240.

4. Алоян Р.М., Федосеев В.Н., Виноградова Н.В., **Воронов В.А.**, Емелин В.А. Теплотери и теплоприток при совместной работе смесительной камеры и воздушно-теплового насоса в малоэтажных строениях// Известия вузов. Технология текстильной промышленности – 2017. - №4. – С.209-213.

5. Алоян Р.М., Федосеев В.Н., Зайцева И.А., Виноградова Н.В., Емелин В.А., **Воронов В.А.** Сравнительный анализ комбинированных режимов работы ВТН для

малоэтажных строений в текстильной отрасли// Известия вузов. Технология текстильной промышленности - 2017- №5- С.324-328.

6. Федосов С.В., Федосеев В.Н., **Воронов В.А.** Использование низкопотенциальной теплоты окружающего воздуха в испарительно-конденсаторном блоке воздушного теплового насоса// Приволжский научный журнал -2019-№3-С.37-46.

*(1-5 публикации в издании, индексируемом в БД Scopus);  
в других изданиях*

7. **В.А. Воронов**, В.А. Емелин Энергосбережение в теплоснабжении на основе государственно-частного партнерства// Сборник материалов студенческих научных конференций Ивановского филиала Института управления (г. Архангельск) за 2013 год «Молодая наука 2013» - 2014- С.17-26.

8. **В.А. Воронов**, В.А. Емелин «Альтернативная энергетика как решение экономических проблем и эффективность» // Сборник статей XV Международной научно-практической конференции. –2014 – С.51-55.

9. Федосеев В.Н., Зайцева И.А., Острякова Ю.Е., Целовальникова Н.В., Емелин В.А., **Воронов В.А.** Эффективное управление системой теплогенерации в автономных производственных помещениях// Международный научно-исследовательский журнал- 2017- №4- С.109-112.

10. **В.А. Воронов** «Экологичный подход к системе теплоснабжения частных жилых строений.»/ межвузовская научно-техническая конференция с международным участием «Молодые ученые – развитию отечественной промышленности» («ПОИСК - 2015») – 2015 – С.71-72.

11. **В.А. Воронов**, В.А. Емелин, В.Н. Федосеев, И.А. Зайцева Климатические условия и факторы, влияющие на производительность воздушного теплового насоса// Теория и практика технических, организационно-технологических и экономических решений // Сб.научн. тр. – Иваново: ИВГПУ, 2015.- С.185-189.

12. **В.А. Воронов**, В.А. Емелин «Экологичная система теплоснабжения жилых зданий» // Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы безопасности жизнедеятельности и экологии» - 2015 - С.166-168.

13. **В.А. Воронов** «Экологически чистая система теплоснабжения жилых и общественных зданий»/ Химия и экология-2015: материалы Международной научно-практической конференции / деркол.: Евдокимова Н.Г. и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015 – 2015 –С.280-282.

14. **Воронов В.А.**, Емелин В.А. Экономическая целесообразность применения теплового насоса в качестве системы теплоснабжения частного жилья // Информационная среда вуза. 2015. № 1. С. 480-483.

15. В. Н. Федосеев, А. Б. Петрухин, В. А. Емелин, **В. А. Воронов**, И. А. Зайцева Энергоэффективность рабочего тела (хладона) воздушного теплового насоса в режиме обогрева автономного текстильного цеха (производства)// Теория и практика технических, организационно-технологических и экономических решений, сборник научных трудов Иваново 2016 - 2016 - С.186-194.

16. В. Н. Федосеев, И. А. Зайцева, В. А. Емелин, **В. А. Воронов** Энергоэффективный расчёт отопления автономного строения на основе воздушного

теплового насоса// Теория и практика технических, организационно-технологических и экономических решений, сборник научных трудов Иваново 2016 - 2016 - С.181-186.

17. В. Н. Федосеев, А. Б. Петрухин, И. А. Зайцева, В. А. Емелин, **В. А. Воронов** Устройство системы теплоснабжения с воздушным тепловым насосом// Теория и практика технических, организационно-технологических и экономических решений, сборник научных трудов Иваново 2016 – 2016 – С.194-199.

18. В. Н. Федосеев, В. А. Емелин, **В. А. Воронов**, И. А. Зайцева, Острякова Ю.Е. Технические возможности эффективной работы воздушного теплового насоса (ВТН)// Теория и практика технических, организационно-технологических и экономических решений, сборник научных трудов Иваново 2017 – 2017 – С.289-293.

19. **В.А. Воронов** Теплоснабжение малоэтажных коттеджных строений в центральных регионах Российской Федерации// Теория и практика технических, организационно-технологических и экономических решений // Сб.научн. тр. – Иваново: ИВГПУ, 2018.

20. **В.А. Воронов**, В. А. Емелин Выбор хладагента для повышения эффективности теплогенерации воздушным тепловым насосом// Теория и практика технических, организационно-технологических и экономических решений // Сб. научн. тр. – Иваново: ИВГПУ, 2018.

#### **Результаты интеллектуальной деятельности**

1. Полезная модель РФ № 174083, 29.09.2017. Тепловой насос // Патент России № 174083. 2017. Бюл. № 28. / Алоян Р.М., Федосеев В.Н., Емелин В.А., **Воронов В.А.**, Острякова Ю.Е., Свиридов И.А.

2. Полезная модель РФ № 165990, 10.11.2016. Магнитный замок для холодильника // Патент России № 165990. 2017. Бюл. № 31. / Емелин В.А., Федосеев В.Н., **Воронов В.А.**, Свиридов И.А.

3. Полезная модель РФ № 177875, 15.03.2018. Мембранный компрессор // Патент России № 177875. 2017. Бюл. № 8. / Алоян Р.М., Федосеев В.Н., Емелин В.А., **Воронов В.А.**, Свиридов И.А.

4. Полезная модель РФ № 166031, 03.02.2016. Теплообменник теплового насоса // Патент России № 166031. 2016. Бюл. № 31. / Федосеев В.Н., Емелин В.А., **Воронов В.А.**, Свиридов И.А.

5. Полезная модель РФ № 185689, 13.12.2018. Средство для смешения газовых потоков // Патент России № 185689. 2018. Бюл. № 31. / Федосеев В.Н., Петрухин А. Б., Емелин В.А., **Воронов В.А.**, Свиридов И.А.