

*На правах рукописи*

**КИБОРТ Иван Дмитриевич**

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ  
УДАЛЯЕМОГО ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ВОЗДУХА**

**Специальность: 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**Уляшева Вера Михайловна**

Официальные оппоненты: **Аверкова Ольга Александровна**  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», кафедра теплогазоснабжения и вентиляции, профессор;

**Малявина Елена Георгиевна**  
кандидат технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), кафедра теплогазоснабжения и вентиляции, профессор;

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (Университет ИТМО)

Защита диссертации состоится «27» декабря 2016 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.06** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: [rector@spbgasu.ru](mailto:rector@spbgasu.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте [www.spbgasu.ru](http://www.spbgasu.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук,  
доцент

 Виктор Алексеевич Пужал

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Современные системы кондиционирования воздуха (СКВ) являются сложными инженерными системами, обеспечивающими оптимальный микроклимат помещения и высокий уровень комфорта. Для ряда объектов (общественные здания, исследовательские лаборатории, помещения, оборудованные вычислительной техникой производственных зданий и т. д.) наличие СКВ является обязательным условием для функционирования.

СКВ являются потребителями значительного количества энергии, в частности тепловой энергии. Согласно современным требованиям технической политики Российской Федерации обязательным условием при проектировании инженерных систем становится использование энергосберегающих мероприятий. В связи с этим важной народнохозяйственной задачей является сокращение энергозатрат на эксплуатацию систем обеспечения микроклимата, которое может быть достигнуто за счет использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Исследование различных способов повышения энергоэффективности, а также совершенствование методических основ для проектирования и анализа систем кондиционирования воздуха является актуальным вопросом развития науки энергосбережения.

Актуальность данного исследования подтверждается грантами: грант Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «УМНИК», премия «ГАЗПРОМ-Новация» в области энергосберегающих технологий.

**Степень разработанности темы исследования.** Теоретическими основами работы являются исследования российских и зарубежных ученых, таких как: О.А. Аверкова, С.М. Анисимов, В.Н. Богословский, Г.П. Васильев, В.Я. Гершкович, И.М. Калнинь, Е.Е. Карпис, О.Я. Кокорин, О.А. Колюнов, А.Ю. Кузьмин, Е.Г. Малявина, М.Я. Поз, Г.М. Позин, А.А. Рымкевич, А.Г. Сотников, З.В. Удовиченко, С.П. Филиппов, А.В. Цыганков, Б.Н. Юрманов, М. Abrahamsson и др., труды которых посвящены фундаментальным вопросам и проблеме применения утилизации тепловой энергии как основы энергообеспечения объектов.

**Цель работы** заключается в разработке имитационных моделей аппаратов утилизации теплоты, развитии эффективных методов расчета и экспериментальных исследований систем утилизации тепловой энергии.

В соответствии с целью диссертационного исследования были сформулированы следующие задачи:

- провести анализ существующих методик расчета систем утилизации тепловой энергии удаляемого воздуха;
- разработать имитационные модели воздушного теплового насоса, пластинчатого утилизатора и утилизатора с промежуточным теплоносителем;
- провести моделирование работы системы утилизации на основе воздушного теплового насоса, пластинчатого утилизатора и утилизатора с промежуточным теплоносителем в составе приточно-вытяжной установки;

- на основании результатов моделирования обобщить массив полученных данных и выявить наиболее важные зависимости параметров;
- сформулировать структуру методики расчета параметров системы утилизации на основе воздушного теплового насоса;
- провести сравнительный анализ результатов моделирования параметров работы утилизаторов различного типа;
- разработать программный комплекс для расчета основных параметров работы системы утилизации тепловой энергии удаляемого вентиляционного воздуха;
- разработать схемы и создать лабораторные установки для проведения экспериментальных исследований с целью определения степени достоверности имитационных моделей воздушного теплового насоса и утилизаторов различного типа.

**Объект исследования** – система утилизации теплоты удаляемого вентиляционного воздуха.

**Предмет исследования** – зависимости параметров работы цикла обращенной холодильной машины от параметров работы теплообменных аппаратов в условиях применения в приточно-вытяжной установке.

**Научная новизна** исследования заключается в следующем:

1. Разработаны имитационные модели утилизаторов тепловой энергии удаляемого вентиляционного воздуха, позволяющие получить массивы аэродинамических, гидравлических, теплотехнических и энергетических характеристик теплообменных аппаратов в широком диапазоне исходных данных.

2. По результатам экспериментальных исследований на разработанных автором лабораторных установках на основании регрессионного анализа получены зависимости значений коэффициента преобразования энергии (КПЭ), размеров теплообменных поверхностей и общей эффективности утилизатора от затраченной энергии на преодоление аэродинамических и гидравлических сопротивлений, температур в узловых точках термодинамического цикла, количества утилизированной энергии, температур удаляемого и приточного воздуха.

3. Уточнен метод оценки эффективности системы утилизации теплоты на базе воздушного теплового насоса на основе предложенного автором общего коэффициента преобразования энергии (КПЭ<sub>о</sub>), определяющего отношение затрат энергии на работу системы утилизации, включая затраты на дополнительные аэродинамические и гидравлические сопротивления, к утилизированной тепловой энергии.

4. Разработаны графоаналитическая методика и соответствующий программный комплекс для расчета параметров системы утилизации теплоты на основе воздушного теплового насоса, позволяющие выявить наиболее энергоэффективный вариант компоновки системы.

5. На основе анализа и обобщения результатов математического моделирования и данных экспериментальных исследований получен коэффициент детерминации в пределах  $0,89 \div 0,95$ , что доказывает адекватность имитационных моделей.

б. Определены граничные условия рационального применения системы утилизации тепловой энергии удаляемого вентиляционного воздуха на основе воздушного теплового насоса с учетом климатических и экономических условий Российской Федерации.

**Методологической основой** диссертационного исследования служат основные теоретические положения процессов тепломассообмена и аэродинамики в аппаратах обработки воздуха; методы планирования экспериментальных исследований; теория математического моделирования.

В качестве источников информации использованы отечественные и зарубежные нормативные документы в исследуемой области, монографии и другие публикации научно-исследовательского характера, учебные и справочные пособия, специализированные программные комплексы.

**Область исследования** соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирования воздуха, газоснабжение и освещение: п. 3. «Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения, освещения, защиты от шума».

**Теоретическая значимость** диссертационного исследования заключается в разработке универсального расчетного алгоритма анализа и проектирования системы утилизации теплоты удаляемого воздуха, а также в формировании исчерпывающего массива параметров работы теплоутилизационного воздушного теплового насоса для широкого диапазона исходных данных.

**Практическая значимость** диссертационного исследования заключается в разработке программного комплекса для расчета и анализа системы утилизации теплоты удаляемого воздуха, а также графоаналитической методики, которая может применяться в рамках учебного процесса и при выполнении проектных работ. Основные результаты исследований внедрены в проектную деятельность ООО «СПБ-Гипрошахт».

**Апробация работы.** Результаты исследований были апробированы с соответствующим результатам на научно-практических конференциях: Международные научно-практические конференции «Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения», Санкт-Петербург – диплом I степени (2010 г.), диплом II степени (2011 г.); международные молодежные научные конференции «Севергеоэкотех», Ухта – диплом I степени (2012 г.), диплом I степени (2013 г.); Научно-технические конференции молодежи ОАО «Северные магистральные нефтепроводы», Ухта – диплом II степени (2012 г.), диплом II степени (2013 г.), диплом II степени (2014 г.); выставках и ЭКСПО: Республиканские молодежные инновационные конвенты, Ухта – диплом победителя в номинации «Интернет технологии в промышленной теплоэнергетике» (2012 г.), диплом I степени в номинации «Технические науки» (2015 г.); ВУЗПРОМЭКСПО – 2014, 2015. Премии и гранты: премия администрации МОГО «Ухта» в номинации «научно-техническое творчество, учебно-исследовательская деятель-

ность» городского конкурса на премирование талантливой молодёжи – 2013 г.; целевой грант «УМНИК» – 2014г.; премия «ГАЗПРОМ Новация» – 2014 г.;

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

– имитационные модели утилизаторов тепловой энергии удаляемого вентиляционного воздуха;

– зависимости площади теплообменной поверхности испарителя и конденсатора, коэффициента преобразования энергии (КПЭ) от температур воздуха и хладагента в узловых точках цикла для ряда характерных ситуаций, полученные по результатам экспериментальных исследований на разработанных и созданных автором лабораторных установках;

– зависимость для определения величины общего коэффициента преобразования энергии (КПЭ<sub>о</sub>), для оценки эффективности системы утилизации теплоты предложено использовать, характеризующего отношение затрат энергии на работу системы утилизации, включая затраты на дополнительные аэродинамические и гидравлические сопротивления, к утилизированной тепловой энергии

– графоаналитическая методика расчета параметров теплонасосной системы утилизации тепловой энергии удаляемого вентиляционного воздуха;

– результаты экспериментальных исследований и расчета виртуальной модели функционирования системы утилизации тепловой энергии удаляемого вентиляционного воздуха;

– условия рационального применения теплоутилизационного воздушного теплового насоса в климатических и экономических особенностях Российской Федерации;

**Достоверность результатов** исследования подтверждается использованием фундаментальных положений расчёта теплообменных аппаратов систем кондиционирования и вентиляции, а также парокompрессионных холодильных машин; применением современных методов проектирования виртуальных моделей и расчётно-аналитического программного обеспечения; удовлетворительной сходимостью данных экспериментальных исследований и результатов расчета с использованием виртуальной модели.

**Публикации.** По теме диссертации было опубликовано 13 статей научного характера общим объемом 4,2 п. л., в том числе 5 (объемом 2,3 п. л.) в рецензируемых изданиях согласно перечню, размещенному на официальном сайте ВАК.

#### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами по каждой из них, общих выводов. Диссертация содержит 187 страниц машинописного текста, 30 таблиц, 96 рисунков, 95 формул, 5 приложений и список использованной литературы из 134 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

Во введении обоснована актуальность проводимых исследований, сформулированы цели и задачи, теоретическая и практическая значимость работы, представлены данные об апробации работы и сведения о публикациях.

*В первой главе* систематизированы основные труды по направлениям энергосбережения в СКВ, теплонасосных технологий, а также методического обеспечения в области расчета цикла холодильной машины (ХМ).

*Во второй главе* приведены основные элементы математической модели воздушного теплового насоса (ВТН), рассмотрены зависимости величины площади воздухоохладителя и воздухонагревателя от изменения температур воздуха и хладагента; проанализированы различные ситуации изменения значения КПЭ; проведено сопоставление соотношения КПЭ и сопротивлений теплообменных аппаратов; рассмотрено влияние расхода воздуха на параметры системы (аэродинамическое и гидравлическое сопротивления теплообменных аппаратов, количество утилизированной энергии, КПЭ и т.д.); представлена методика расчета системы утилизации тепловой энергии на основе ВТН.

*В третьей главе* приведена структура и принципиальная схема алгоритма расчета параметров работы системы утилизации на основе воздушного теплового насоса, описаны особенности функционирования основного алгоритма в режиме имитационной модели; рассмотрены особенности функционирования имитационных моделей пластинчатого утилизатора и утилизатора с промежуточным теплоносителем.

*В четвертой главе* представлены схемы лабораторных установок, разработанных автором и результаты экспериментальных исследований, приведено сравнение результатов лабораторного эксперимента и результатов работы имитационных моделей.

*В пятой главе* выполнено сравнение энергетического баланса утилизаторов различного типа, рассмотрены экономические показатели работы утилизаторов для различных климатических условий, обоснованы граничные условия рационального применения СУ на основе воздушного теплового насоса.

## **II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ**

**1. Разработаны имитационные модели утилизаторов тепловой энергии удаляемого вентиляционного воздуха, позволяющие получить массивы аэродинамических, гидравлических, теплотехнических и энергетических характеристик теплообменных аппаратов в широком диапазоне исходных данных**

Основу аналитической составляющей данного диссертационного исследования составляет имитационная модель системы утилизации тепловой энергии удаляемого вентиляционного воздуха, позволяющая провести расчет параметров работы в широком диапазоне исходных данных. Базовыми зависимостями математической модели ХМ являются уравнения теплового баланса холодильной машины (1) и коэффициента преобразования энергии (2).

$$q_0 + AL = q \quad (1)$$

$$\mu = \frac{q}{AL}, \quad (2)$$

где  $q$  – отведенная тепловая энергия, кДж;  $q_0$  – подведенная тепловая энергия, кДж;  $AL$  – работа цикла, кДж.

Уравнение теплового баланса представлены в виде соотношения 3. Для однофазных сред в виде соотношения 4. Для конденсатора и испарителя соответственно в виде соотношений 5 и 6.

$$Q = G_T(i_{T1} - i_{T2}) = G_x(i_{x2} - i_{x1}); \quad (3)$$

$$Q = G_T c_{PT}(i_{T1} - i_{T2}) = G_x c_{PX}(i_{x2} - i_{x1}); \quad (4)$$

$$Q = G_T(i_{T1} - i_{T2}) = G_x c_{PX}(i_{x2} - i_{x1}); \quad (5)$$

$$Q = G_T c_{PT}(i_{T1} - i_{T2}) = G_x(i_{x2} - i_{x1}), \quad (6)$$

где  $Q$  – тепловая производительность аппарата, Вт;  $i$  – удельная энтальпия, Дж/кг;  $G$  – массовый расход рабочей среды, кг/с;  $c_p$  – массовая теплоемкость среды, Дж/(кг·К); индекс  $T$  – указание на принадлежность величины к греющей среде; индекс  $X$  – указание на принадлежность величины к нагреваемой среде: 1 – хладагент, 2 – воздух.

Особенностью виртуальной модели является возможность проведения как частного расчета определенного параметра, так и получение целого массива данных в результате пошагового изменения исходных параметров в соответствии с заданной функцией. Для проведения сравнительного анализа показателей эффективности утилизаторов различного типа были разработаны численные модели пластинчатого утилизатора и утилизатора тепловой энергии с промежуточным теплоносителем.

В число основных функций виртуальной модели входят:

- проведение моделирования работы системы утилизации на основе ВТН, пластинчатого утилизатора и утилизатора с промежуточным теплоносителем при различных условиях;
- сравнительное моделирование параметров работы различных типов утилизаторов;
- определение конкретных параметров работы утилизаторов различного типа.

В общем виде ядро алгоритма схематически представлено на рисунке 1. В зависимости от поставленной задачи, маршрут данных может иметь несколько конфигураций:

- расчет параметров работы при известных температурах воздуха;
- расчет параметров работы при неизвестных температурах на входе и выходе в испаритель или конденсатор;
- проведение моделирования параметров работы. В данном случае речь идет об имитационной модели, в основе которой алгоритм расчета, выполняющий роль вычислительного ядра.

В имитационной модели заложена возможность задания исходных данных несколькими способами:

Вариант № 1. За основу работы имитационной модели принято изменение исходных данных согласно заданной функции. В качестве примера применяется следующая функция:

$$f(L) = (ai + s)r, \quad (7)$$

где  $a$  – шаг изменения значения расхода воздуха;  $i$  – коэффициент коррекции начального значения расхода воздуха  $L$ ;  $s$  – начальное значение расхода  $L$ , м<sup>3</sup>/ч;  $r$  – коэффициент случайного изменения значения, необходимый для имитации работы системы автоматики с частотно-регулируемым приводом.

Шаг изменения значения расхода воздуха позволяет регулировать уровень дискретности работы имитационной модели. Коэффициент  $i$  позволяет задать количественное значение изменения расхода. Если необходимость в имитации работы системы автоматики с частотно-регулируемым приводом отсутствует, то выполняется условие  $r = 1$ .



Рисунок 1 – Структура ядра программы расчета и моделирования параметров работы системы утилизации на основе ВТН

Вариант № 2. В основе работы имитационной модели использованы переменные, принятые согласно структуре базы данных (БД).

Рассмотренные имитационные модели опираются на общепринятые математические зависимости, сочетая высокий уровень точности и быстродействия, а также гибкие настройки. В число основных результатов, полученных при помощи данных моделей, входят:

- проанализированы основные зависимости работы ВТН в режиме утилизатора.
- получены технико-экономические показатели эффективности работы утилизаторов классической конструкции;
- проведено сравнительное моделирование параметров работы классических утилизаторов и системы утилизации на основе теплового насоса. Результаты моделирования представлены в главе 4.
- получены данные для компоновки и составления графоаналитической методики расчета;

– разработано программное обеспечение с пользователь-ориентированным графическим интерфейсом.

Данный режим применен при сравнительном моделировании эффективности работы утилизаторов различной конструкции. Сфера его применения ограничивается моделированием с применением исходных данных справочного типа, значения которых невозможно задать функцией.

**2. По результатам экспериментальных исследований на разработанных автором лабораторных установках на основании регрессионного анализа получены зависимости значений коэффициента преобразования энергии (КПЭ), размеров теплообменных поверхностей и общей эффективности утилизатора от затраченной энергии на преодоление аэродинамических и гидравлических сопротивлений, температур в узловых точках термодинамического цикла, количества утилизированной энергии, температур удаляемого и приточного воздуха**

Расчет параметров работы утилизатора сопряжен с необходимостью опытным путем определять наиболее рациональные соотношения параметров работы цикла холодильных машин (ХМ) и теплообменных аппаратов. Основная трудность заключается в нелинейном соотношении значения КПЭ и площади теплообменной поверхности. С целью выявления тенденций и наиболее рациональных соотношений для соответствующих исходных данных было проведено имитационное моделирование широкого спектра режимов работы системы утилизации. В соответствии с результатами проведен анализ зависимости площади теплообменной поверхности испарителя и конденсатора от перепадов энтальпий воздуха и хладагента, а также зависимости КПЭ от перепадов энтальпий в ключевых точках холодильного цикла. Рассмотрим частный случай при расходе воздуха  $L = \text{const} = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ , скорости течения хладагента  $w = \text{const} = 1 \text{ м/с}$ . В качестве хладагента принят R134a. В таблице 1 приведены измеряемые параметры и их сокращения.

Таблица 1 – Обозначения измеряемых параметров

Параметр	Единицы измерения	Обозначение
Площадь поверхности теплообмена	$\text{м}^2$	$F$
Начальная энтальпия воздуха	кДж/кг	$i_1$
Конечная энтальпия воздуха	кДж/кг	$i_2$
Начальная энтальпия хладагента	кДж/кг	$i_3$
Конечная энтальпия хладагента	кДж/кг	$i_4$
Энтальпия хладагента до испарителя	кДж/кг	$i_{x1}$
Энтальпия хладагента после испарителя	кДж/кг	$i_{x2}$
Энтальпия хладагента до конденсатора	кДж/кг	$i_{x3}$
Энтальпия хладагента после конденсатора	кДж/кг	$i_{x4}$

Результаты имитационного моделирования представлены в виде опорных соотношений 8–11, выведенных методом наименьших квадратов.

$$F = AX + B; \quad (8)$$

$$F = Ae^{BX}; \quad (9)$$

$$F = Ax^2 + Bx + C; \quad (10)$$

$$F = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D. \quad (11)$$

Сводные результаты моделирования представлены в таблице 2. Соответствующие аппроксимирующие функции и значения коэффициентов приведены в таблице 3.

Таблица 2 – Сводные результаты имитационного моделирования для частного случая

Ситуация		Характеристика параметров				
		$i_1$	$i_2$	$i_3$	$i_4$	$F$
Испаритель	1.1	возрастает	const	const	const	возрастает
	1.2	const	const	убывает	const	убывает
	1.3	возрастает	const	убывает	const	убывает
	1.4	const	const	const	возрастает	убывает
Конденсатор	2.1	const	const	возрастает	const	убывает
	2.2	const	const	возрастает	возрастает	убывает
	2.3	const	const	const	возрастает	убывает
	2.4	const	убывает	const	const	возрастает
	2.5	возрастает	возрастает	const	const	возрастает
	2.6	убывает	const	const	const	возрастает
		$i_{x1}$	$i_{x2}$	$i_{x3}$	$i_{x4}$	КПЭ
Цикл ХМ	3.1	const	const	возрастает	const	убывает
	3.2	const	убывает	const	const	убывает
	3.3	const	const	const	возрастает	возрастает
	3.4	const	const	возрастает	возрастает	убывает

Таблица 3 – Сводные данные по функциям аппроксимации

Ситуация		Характеристика параметров				Исходное уравнение
		$A$	$B$	$C$	$D$	
Испаритель	1.1	0,0132	0,19	-	-	9
	1.2	0,0002	0,01	0,12	0,57	11
	1.4	-0,0004	0,015	0,19	0,7	11
Конденсатор	2.1	2,4	-0,009	-	-	9
	2.2	2,69	-0,017	-	-	9
	2.4	0,001	0,098	0,78	-	10
	2.5	0,0018	0,026	2,31	-	10
	2.6	-0,0013	0,15	0,71	-	10
Цикл ХМ	3.1	14,53	-0,016	-	-	9
	3.2	14,77	-0,03	-	-	9
	3.4	0,076	14,42	-	-	8

В качестве примера на рисунке 2 представлена кривая изменения площади теплообменной поверхности испарителя, характерная для следующих условий: значения  $i_3, i_4 = \text{const}$ , значение  $i_1$  возрастает, тем самым увеличивая величину теплового потока.

Аналогичным образом представлен анализ зависимости ключевых параметров работы системы утилизации от расхода воздуха. Полученные функции имеют вид соотношения 12. Соответствующие значения коэффициентов  $A$  и  $B$  представлены в таблице 4.

$$F = Ax^B. \quad (12)$$

В качестве примера на рисунке 3 представлена аппроксимирующая кривая изменения затрат энергии на преодоление аэродинамического сопротивления (АС) испарителя.

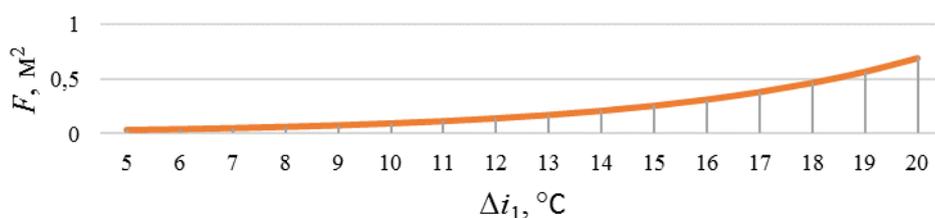


Рисунок 2 – Функция изменения значения площади теплообменной поверхности испарителя

Таблица 4 – Сводная таблица результатов моделирования изменения параметров системы в зависимости от расхода воздуха

Функция	Переменный коэффициент	
	A	B
КПЭ	20,63	0,194
Общее количество утилизированной энергии, кВт	0,007	0,1
Полное энергопотребление, кВт	0,0002	1,26
Площадь теплообменной поверхности испарителя, м²	0,92	0,63
Площадь теплообменной поверхности конденсатора, м²	0,0477	0,63
Затраты энергии на преодоление аэродинамического сопротивления испарителя, кВт	$6 \cdot 10^{-12}$	3,15
Затраты энергии на преодоление гидравлического сопротивления испарителя, кВт	0,0007	1,09
Затраты энергии на преодоление аэродинамического сопротивления конденсатора, кВт	$2 \cdot 10^{-13}$	3,48
Затраты энергии на преодоление гидравлического сопротивления конденсатора, кВт	0,0002	1,11
Массовый расход хладагента, кг/ч	$4 \cdot 10^{-5}$	1,01

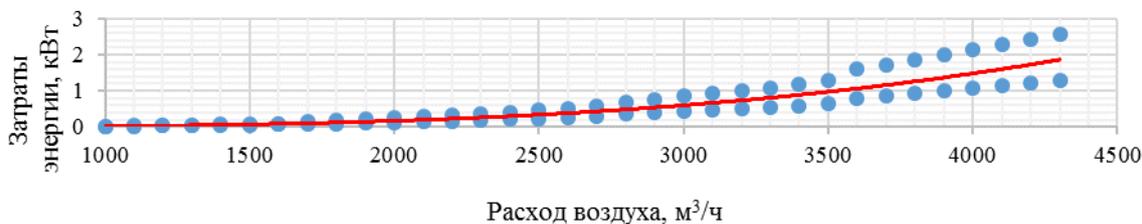


Рисунок 3 – Затраты энергии на преодоление АС испарителя при различных расходах воздуха и температурах в узловых точках цикла

**3. Уточнен метод оценки эффективности системы утилизации теплоты на базе воздушного теплового насоса на основе предложенного автором общего коэффициента преобразования энергии (КПЭ<sub>0</sub>), определяющего отношение затрат энергии на работу системы утилизации, включая затраты на дополнительные аэродинамические и гидравлические сопротивления, к утилизированной тепловой энергии**

Для проведения оценки энергоэффективности системы утилизации была выведена величина общего коэффициента преобразования энергии (КПЭ<sub>0</sub>), учитывающая затраты энергии на преодоление аэродинамических и гидравлических сопротивлений теплообменных аппаратов утилизатора. Значение КПЭ<sub>0</sub> определяется из соотношения 13.

$$КПЭ_0 = \frac{Q}{E_u + E_z + E_a}, \quad (13)$$

где  $Q$  – полная теплопроизводительность, кВт;  $E_y$  – количество электрической энергии, необходимой на обеспечение работы цикла, кВт;  $E_z$  – количество электрической энергии, необходимой на преодоление гидравлических сопротивлений теплообменных аппаратов (ГС), определяемое по формуле 14, кВт;  $E_a$  – количество электрической энергии, необходимой на преодоление аэродинамических сопротивлений теплообменных аппаратов (АС), определяемое по формуле 15, кВт;

$$E_z = \frac{20,482VF_h\nu_g^{1,69}}{N_i}, \quad (14)$$

где  $VF_h$  – объемный расход хладагента, определяемый по опытно установленному соотношению, м<sup>3</sup>/ч;  $\nu_g$  – скорость движения хладагента, м/с;  $N_i$  – индикаторный КПД компрессора теплового насоса;

Численный коэффициент 20,482 – математически полученное соотношение среднего КПД привода компрессора, электродвигателя и коэффициента определения значения гидравлического сопротивления теплообменного аппарата. Значение 20,482 характерно для испарителей, значение 4,168 характерно для конденсаторов. Соотношение 15 получено путем оптимизации расчетного алгоритма, а также применения математических преобразований.

$$E_a = 0,0017GP, \quad \text{кВт}, \quad (15)$$

где  $G$  – расход приточного воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $P$  – аэродинамическое сопротивление теплообменного аппарата, Па.

Сравнение зависимости КПЭ и КПЭ<sub>о</sub> от изменения температур, характерного для ситуации № 2.2 таблицы 2, приведено на рисунке 4.

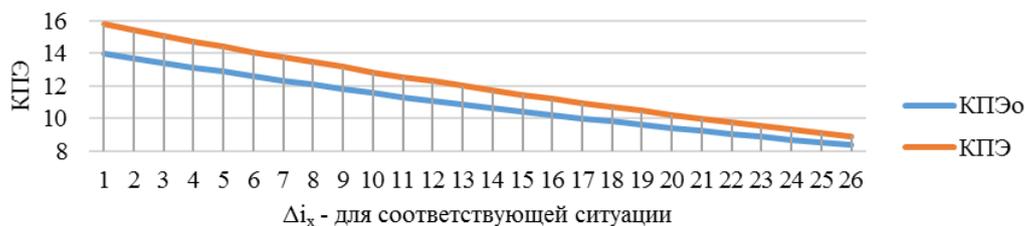


Рисунок 4 – Кривые значений КПЭ и КПЭ<sub>о</sub>, характерные для ситуации №2.2

#### 4. Разработаны графоаналитическая методика и соответствующий программный комплекс для расчета параметров системы утилизации теплоты на основе воздушного теплового насоса, позволяющие получить подробные данные для выбора энергоэффективного варианта системы

Анализ полученных результатов моделирования показал, что ряд переменных можно принять за константы, численное значение которых будет удовлетворять условию достижения максимального КПЭ независимо от изменений остальных исходных данных. В число таких констант входят:

- энтальпия воздуха после испарителя,  $i_2 = 5$  кДж/кг;
- энтальпия хладагента перед испарителем,  $i_1 = 4$  кДж/кг;
- энтальпия хладагента после компрессора,  $i_3 = 30$  кДж/кг.

В процессе выбора вида графоаналитической методики наиболее перспективным оказался табличный формат. Таблицы разбиты на группы, каждая из которых характерна для определенного диапазона расхода воздуха в соответствии с типоразмерным сечением. В таблице 5 представлено соотношение диапазонов расхода воздуха и соответствующего типового сечения.

Таблица 5 – Соотношение диапазонов расхода воздуха и типового сечения

Диапазон расходов воздуха, м <sup>3</sup> /ч	Типовое сечение, м <sup>2</sup>
1000 ÷ 4300	0,28
4300 ÷ 6200	0,475
6200 ÷ 8200	0,67
8200 ÷ 10200	0,865
10200 ÷ 14200	0,927

Группы таблиц составляются отдельно для каждого типа хладагента, рекомендованного к применению в холодильных машинах среднего температурного диапазона. На рисунке 5 представлен фрагмент таблицы параметров системы утилизации на основе воздушного теплового насоса. В случае решения прямой задачи расчет производится в соответствии со следующими этапами: 1 – выбор перепада энтальпий удаляемого воздуха, кДж/кг, в соответствии с проектным или фактическим значением (1); 2 – выбор перепада энтальпий приточного воздуха, кДж/кг, в соответствии с проектным или фактическим значением (2); 3 – выбор ячейки, содержащей наибольшее значение КПЭ в строке (3). Цветовая индикация ячейки позволяет упростить процесс поиска; ячейка также содержит значение площади поверхности конденсатора и количество энергии, необходимой на преодоление сопротивлений конденсатора и работу цикла; 4 – в соответствии с выбранной ячейкой определяются значения количества утилизированной тепловой энергии, кВт, площади теплообменной поверхности испарителя, м<sup>2</sup> и количество энергии, затрачиваемой на преодоление сопротивлений испарителя, кВт (4); 5 – далее по столбцу выбранной ячейки определяется перепад энтальпий хладагента в испарителе, кДж/кг (5), и начальная энтальпия хладагента в испарителе, кДж/кг (6).

В случае решения обратной задачи, работу с таблицей следует начать с третьего этапа. Итогом прохождения всех этапов является определение минимально необходимого набора расчетных параметров, соответствующих базовому расходу воздуха. Для определения параметров, соответствующих проектному расходу, проектировщик может воспользоваться таблицей переводных коэффициентов. Таким образом, искомое значение параметра с учетом применения переводного коэффициента можно определить по формуле 16.

$$y = ax_r, \quad (16)$$

где  $y$  – искомое значение параметра при проектном расходе воздуха;  $x_r$  – значение параметра, соответствующее базовому расходу воздуха;  $a$  – соответствующий переводный коэффициент.

1000 – 4300 м³/ч		15,37 + 35,87 кВт					
		-5					
4	-30 ÷ -15	Q15,37 F208,87 E1,15	5,08	5,18	5,27	5,36	5,44
			F34	F36	F38	F40	F42
E1,87	E1,82		E1,76	E1,72	E1,67		
2	-25 ÷ -10		5,08	5,18	5,27	5,36	5,42
			F38	F40	F42	F46	F50
E1,87	E1,82		E1,76	E1,72	E1,68		
2	-20 ÷ -5		5,08	5,18	5,24	5,33	5,42
			F42	F46	F50	F54	F58
E1,87	E1,82		E1,78	E1,73	E1,68		
1	-15 ÷ 0		5,06	5,15	5,24	4,82	4,87
		F50	F54	F58	F63	F72	
E1,88	E1,83	E1,78	E2,03	E2			
1	-10 ÷ 5	5,06	4,65	4,71	4,79	4,87	
		F58	F63	F72	F81	F90	
E1,88	E2,15	E2,11	E2,05	E2			
1	-5 ÷ 10	4,53	4,62	4,71	4,35	4,06	
		F72	F81	F90	F108	F130	
E2,24	E2,17	E2,11	E2,38	E2,63			

Рисунок 5 – Фрагмент таблицы параметров системы утилизации на основе воздушного теплового насоса

Для построения диаграммы методики и настройки диапазона исходных данных автором разработан программный комплекс расчета параметров системы утилизации на базе воздушного теплового насоса. Программный комплекс позволяет как проводить непосредственный расчет, так и генерировать, с последующим выводом на печать таблицы параметров системы утилизации в зависимости от выбранного диапазона расхода воздуха в СКВ и выбранного типа хладагента.

##### 5. На основе анализа и обобщения результатов математического моделирования и данных экспериментальных исследований доказана адекватность имитационных моделей

Для подтверждения адекватности расчётных модулей виртуальной модели были проведены экспериментальные исследования с целью сравнения данных, получаемых в результате работы стенда и виртуальной модели. В число проверяемых модулей вошли: модули расчета параметров работы воздухонагревателя, расчета параметров работы воздухоохладителя и пластинчатого утилизатора. Основу измерительного оборудования составили: датчик расхода воздуха на основе ЭА-70, датчик температуры DS18B20, термоанемометры Testo 425 и Testo 405-V1. На рисунке 6 представлена схема экспериментального стенда «пластинчатый утилизатор». Стенд выполнен в рамках формирования новой экспериментальной лаборатории теплотехники и энергосбережения. Ухтинского государственного технического университета (УГТУ). Основу стенда составляет пластинчатый утилизатор VKS типоразмера 3.15. Особенностью стенда является возможность регулирования расхода воздуха для каждого контура, а также возможность регулирования температуры наружного воздуха.

В таблице 6 представлены результаты экспериментальных исследований на базе стенда «Пластинчатый утилизатор». На рисунке 7 представлено характерное визуальное соотношение кривых, полученных экспериментально и при помощи виртуальной модели.

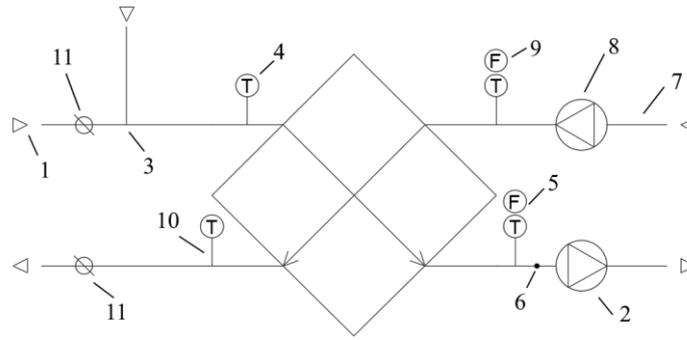


Рисунок 6 – Схема экспериментального стенда «Пластинчатый утилизатор»:

1 – приточный контур; 2 – приточный вентилятор; 3 – узел рециркуляции; 4, 5, 9, 10 – измерительное оборудование; 6 – лючок для поверочных приборов; 7 – вытяжной контур; 8 – вытяжной вентилятор; 11 – регулирующий дроссель;

Таблица 6 – Результаты исследований на базе стенда «Пластинчатый утилизатор»

Номер эксперимента	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч	Минимальная температура приточного воздуха, °С	Максимальная температура приточного воздуха, °С	Максимальная относительная ошибка, %	Средняя относительная ошибка, %	Коэффициент детерминации для экспериментальной и виртуальной функций
1.1	900	3,75	13	22	4	0,99
1.2	900	0,75	9	56	22	0,99
1.3	900	2,5	11	38	19	0,99
1.4	900	1,75	10	32	19	0,98
1.5	500	5,75	9	12	9	0,97
1.6	500	5	9,5	13	3	0,98

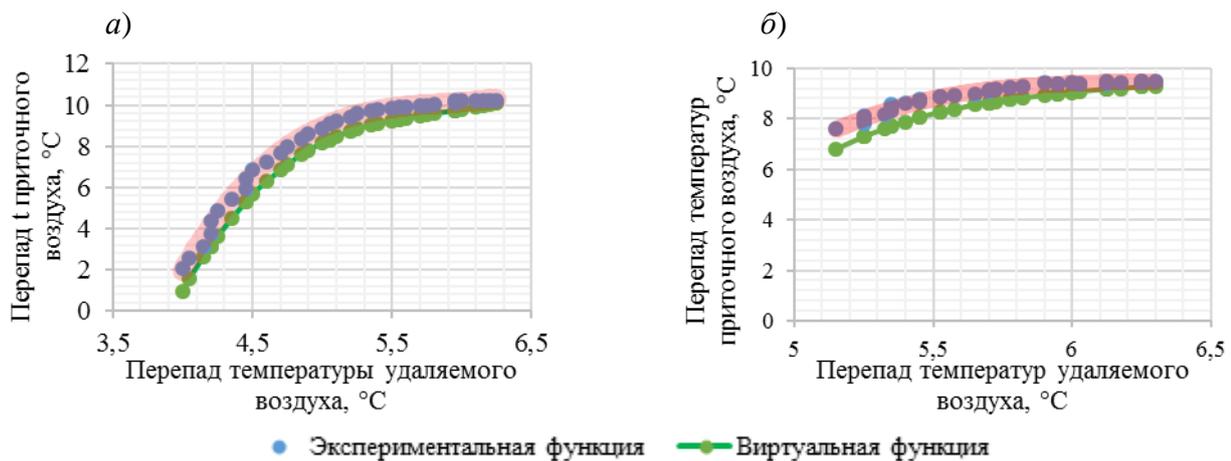


Рисунок 7 – Сравнение экспериментальной и виртуальной зависимостей, характерных для эксперимента № 1.1 (а), № 1.2 (б)

На рисунке 8 представлена схема воздушного контура экспериментального стенда «Теплообменные аппараты систем обработки воздуха», разработанного автором. Основу стенда составляют теплообменные аппараты канального типа ВВW – 200. Стенд позволяет проводить измерения перепада температур

греющей/охлаждающей среды и нагреваемого/охлаждающего воздуха. Особенностью стенда является возможность регулирования температуры воды, расхода воздуха и площади теплообменной поверхности.

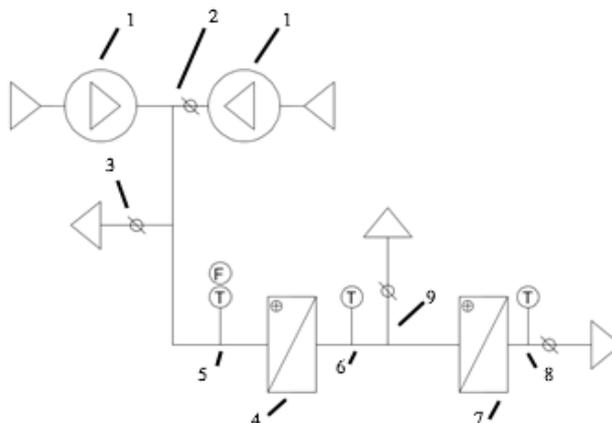


Рисунок 8 – Схема воздушного контура экспериментального стенда «Теплообменные аппараты систем обработки воздуха»:

1 – нагнетающий вентилятор; 2 – узел смешения; 3 – узел точного регулирования; 4, 6, 8 – измерительное оборудование; 4, 7 – теплообменные аппараты; 9 – узел байпасирования

Стенд «Теплообменные аппараты систем обработки воздуха» позволяет задать различные схемы течения рабочего тела. На рисунке 9 представлены примеры организации течения воды, применявшиеся в рамках экспериментов № 2.1–2.8. На рисунке 10 представлено характерное визуальное соотношение кривых, полученных экспериментально и при помощи виртуальной модели.

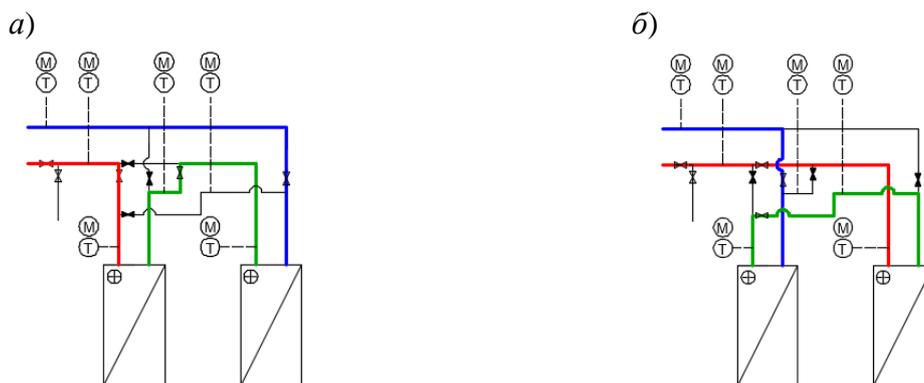


Рисунок 9 – Схемы организации движения теплоносителя экспериментального стенда «Теплообменные аппараты систем обработки воздуха»:

*a* – последовательный режим с попутным течением сред без увлажнения; *б* – последовательный режим с противоточным течением сред без увлажнения;

В таблице 7 представлены результаты экспериментальных исследований на базе стенда «Пластинчатый утилизатор».

Таблица 7 – Основные сведения по экспериментам на базе стенда «Теплообменные аппараты систем обработки воздуха»

№	Минимальная температура приточного воздуха, °С	Максимальная температура приточного воздуха, °С	Аргумент	Процесс	Коэффициент детерминации для экспериментальной и виртуальной функций
2.1	-14	3,75	Вода	Нагрев	0,95
2.2			Воздух	Охлаждение	0,91
2.3			Вода	Охлаждение	0,92
2.4			Воздух	Нагрев	0,91
2.5	-14	4,5	Вода	Нагрев	0,93
2.6			Воздух	Охлаждение	0,90
2.7			Вода	Охлаждение	0,91
2.8			Воздух	Нагрев	0,89

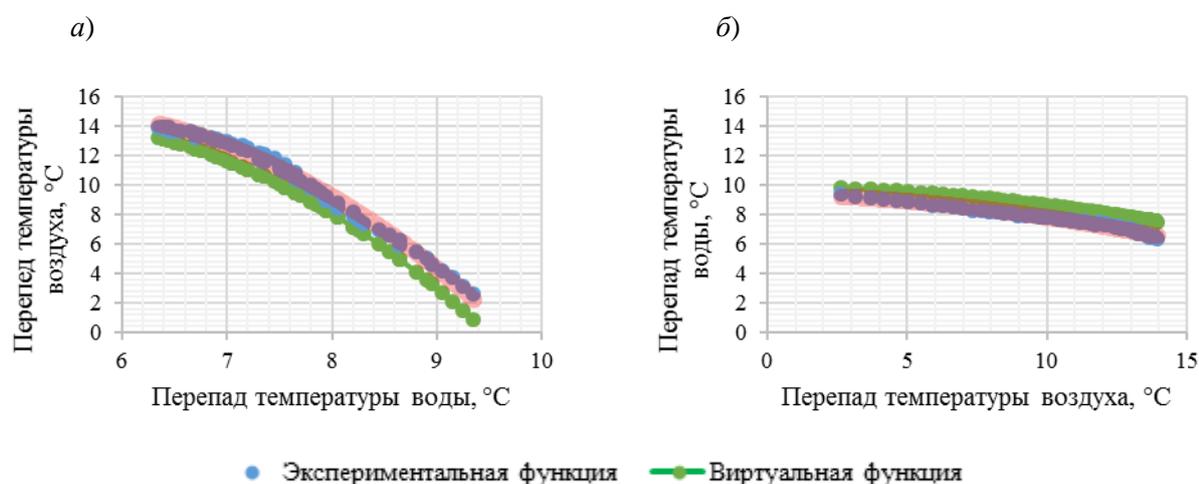


Рисунок 10 – Сравнение экспериментальной и виртуальной зависимостей, характерных для эксперимента № 2.1 (а), № 2.2 (б)

На рисунке 11 представлен стенд «Тепловой насос» и соответствующая схема. Работу цикла обеспечивает компрессор 1, осуществляющий сжатие и нагнетание насыщенного пара в конденсатор 3. Далее хладагент поступает в фильтр 9. Контроль осуществляется при помощи смотрового окошка 10. Дросселирование осуществляется при помощи капиллярной трубки 11. Испарение и нагрев хладагента осуществляется в испарителе 2. Измерение давления и температуры хладагента в испарителе производится на термоманометрах 7 и 8. Измерение давления и температуры хладагента в конденсаторе осуществляется на термоманометрах 5 и 6.

Давление и температура хладагента после компрессора измеряется термоманометром 4. В таблице 8 представлены показатели стенда «Тепловой насос» и соответствующей имитационной модели для установившегося рабочего режима и при изолированном испарителе.

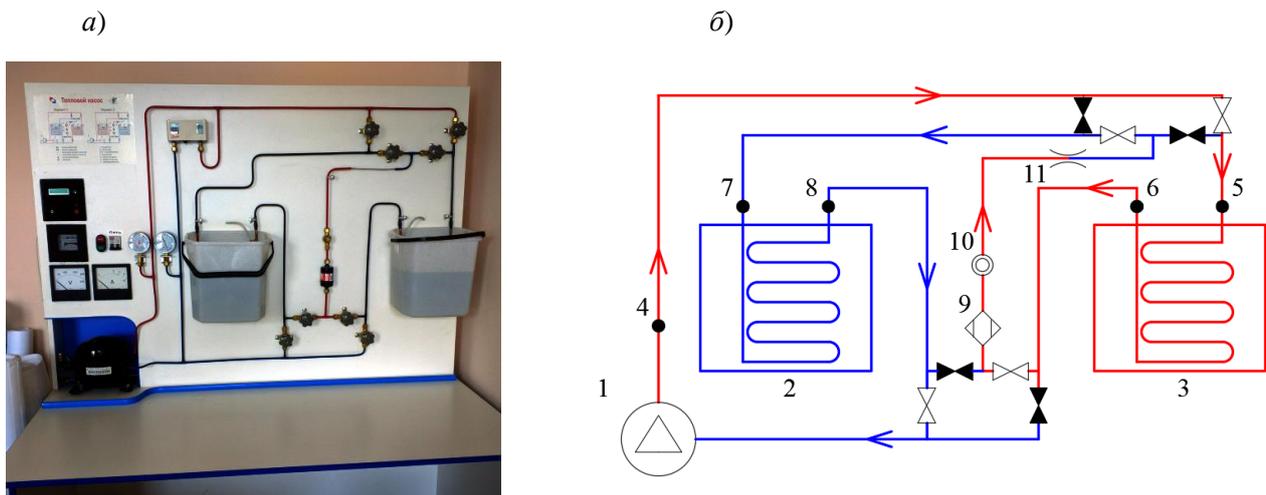


Рисунок 11 – Экспериментальный стенд «Тепловой насос» (а), соответствующая схема (б)

Таблица 8 – Сопоставление показателей стенда и имитационной модели

Номер точки	Показатели стенда		Показатели имитационной модели	
	Температура, °С	Давление, МПа	Температура, °С	Давление, МПа
При установленном рабочем режиме				
4	12,25	0,3	12,25	0,3
5	65	1,25	65	1,25
6	48	1,2	50	1,25
7	36	1,1	36	1,25
8	6	0,35	0	0,3
При изолированном испарителе				
4	8	0,3	8	0,3
5	55	1,25	55	1,25
6	48	1,2	50	1,25
7	36	1,1	36	1,25
8	6	0,35	0	0,3

### 6. Определены граничные условия рационального применения системы утилизации на основе воздушного теплового насоса с учетом климатических и экономических условий Российской Федерации

Для формирования рекомендаций об условиях внедрения СУ на основе ВТН в приточно-вытяжную установку были проведено сравнительное имитационное моделирование работы утилизаторов различного типа для ряда климатических условий согласно требованиям нормативных документов. Для сравнения были выбраны следующие типы утилизаторов:

- утилизатор с промежуточным теплоносителем (РПТ), выполненный по циркуляционной схеме с расширительным баком. Эксплуатационные затраты включают стоимость энергии на преодоление дополнительного аэродинамического сопротивления и на работу циркуляционного насоса;
- утилизатор пластинчатый (РП), блочного исполнения с одной ступенью теплообмена. В число эксплуатационных затрат входят стоимость энергии на преодоление дополнительного аэродинамического сопротивления.

В таблице 9 приведены исходные данные для проведения сравнительного моделирования. В результате анализа данных моделирования было установлено, что ВТН показывает наибольшее количество сэкономленных средств. Установлено, что с понижением среднегодовой температуры наружного воздуха, а также с увеличением периода работы системы утилизации, происходит рост экономической эффективности данного типа утилизатора. На рисунке 12 изображена сравнительная диаграмма сроков окупаемости внедрения утилизаторов различного типа в приточно-вытяжную установку производительностью 5000 кг/ч, оборудованную электрокалорифером. Рисунок 12 наглядно демонстрирует основной недостаток теплонасосных технологий – высокую удельную стоимость утилизатора. На начало 2015 года данная стоимость составляла 17000 руб./кВт. В таком случае целесообразно применять систему утилизации на основе ВТН в северных широтах, где продолжительность работы системы позволяет снизить срок окупаемости.

Таблица 9 – Исходные данные сравнительного моделирования

Параметр	Значение
температура наружного воздуха $t_n$ , °C	-30
температура приточного воздуха $t_p$ , °C	20
температура удаляемого воздуха $t_y$ , °C	25
диапазон расхода воздуха $L$ , м <sup>3</sup> /ч	1000÷10000
теплоноситель воздушного теплового насоса	R134a
теплоноситель РПТ	50% раствор DIXIS-65

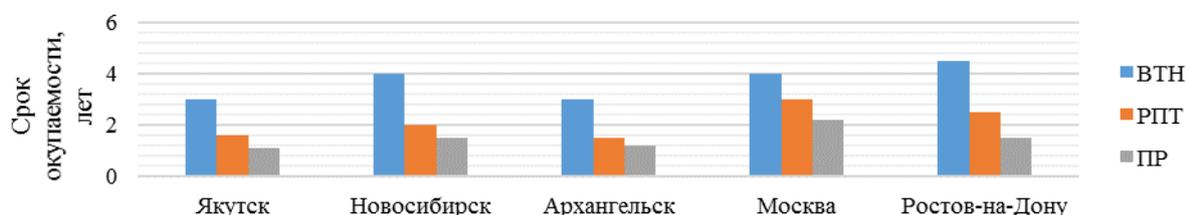


Рисунок 12 – Срок окупаемости внедрения утилизаторов различного типа в приточно-вытяжную установку, оборудованную электрокалорифером

### Заключение

В диссертационной работе проведено исследование по выявлению зависимостей параметров теплообменных аппаратов систем утилизации, способствующих повышению энергоэффективности систем обеспечения микроклимата помещений.

### Основные выводы

1. Проведен анализ существующих методик расчета систем утилизации тепловой энергии удаляемого вентиляционного воздуха. Разработаны имитационные модели воздушного теплового насоса, пластинчатого утилизатора и утилизатора с промежуточным теплоносителем, позволяющие провести моделирование параметров работы с различным типом задания исходных данных.

2. Получены зависимости параметров системы утилизации теплоты на базе воздушного теплового насоса от широкого спектра исходных данных, характеризующие наиболее важные взаимосвязи в зависимости от условий эксплуатации.

3. Предложена величина общего коэффициента преобразования энергии (КПЭ<sub>о</sub>), определяющего отношение затрат энергии на работу системы утилизации, включая затраты на дополнительные аэродинамические и гидравлические сопротивления, к утилизированной теплоте. Предложенная величина позволяет оценить энергоэффективность системы в соответствии с условиями реальной эксплуатации.

4. На основе имитационной модели разработан графо-аналитическая методика и программный комплекс для расчета системы утилизации на базе воздушного теплового насоса.

5. Проведены экспериментальные исследования на разработанных автором установках с целью оценки адекватности имитационных моделей воздушного теплового насоса и утилизаторов различного типа. Коэффициент детерминации составляет  $0,89 \div 0,95$ .

6. Определены условия рационального внедрения системы утилизации на основе воздушного теплового насоса. Спрогнозированы сроки окупаемости СКВ, оборудованной СУ на основе ВТН для городов: Якутск – 7 мес.; Новосибирск – 10 мес.; Архангельск – 9 мес.; Москва – 14 мес.; Ростов-на-Дону – 16 мес.; в сравнении с использованием электрокалориферов для удаленных объектов магистральных нефтепроводов. При сравнении с СКВ с водяными воздухонагревателями сроки окупаемости увеличиваются в 4 раза, что соответствует диапазону инвестиционно привлекательного срока окупаемости 1–5 лет.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в развитии методов математического моделирования для прогнозирования характеристик тепло-массообменных аппаратов систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

### **III. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

*в рецензируемых журналах и изданиях согласно Перечню ВАК*

1. **Киборт, И.Д.** К вопросу применения моделей турбулентности при численном моделировании вентиляционных процессов / Г.И. Позин, В.М. Уляшева, И.Д. Киборт // Известия вузов. Строительство: научно-технический журнал. – 2013. – №10 (658). – С. 48–56.

2. **Киборт, И.Д.** Применение графоаналитического метода при выборе оптимальных режимов работы воздушного теплового насоса / В.М. Уляшева, И.Д. Киборт // Вестник гражданских инженеров: научно-технический журнал. – 2013. – №5 (40). – С. 150–154.

3. **Киборт, И.Д.** Анализ результатов моделирования одно- и двухконтурного воздушного теплового насоса / В.К. Аверьянов, В.М. Уляшева, И.Д. Ки-

борт // Вестник гражданских инженеров: научно-технический журнал. – 2014. – №3 (44). – С. 164–167.

4. **Киборт, И.Д.** Сравнительный анализ результатов моделирования теплоутилизационного теплового насоса и классических утилизаторов тепловой энергии удаляемого воздуха / И.Д. Киборт // Вестник гражданских инженеров: научно-технический журнал. – 2015. – №6 (53). – С. 153–162.

5. **Киборт, И.Д.** Анализ результатов моделирования соотношения основных показателей работы теплонасосной системы утилизации тепловой энергии удаляемого воздуха / И.Д. Киборт // Фундаментальные исследования. – 2016. – №9. – С. 213–221.

*в других изданиях:*

6. **Киборт И.Д.** Об использовании тепловых насосов в условиях России. Сборник научных трудов: материалы 10-й Международной научно-практической конференции (11–13 апреля 2012 г.) – Воркута – Сыктывкар – Ухта: филиал СПбГГИ (ТУ) «ВГИ», 2012. – С. 370–375.

7. **Киборт И.Д.** Энергосберегающие мероприятия с применением теплового насоса. Сборник научных трудов: материалы международной конференции «International Conference on European Science and Technology» (30–31 октября 2012 г.): в 3 ч.; ч. 1. – Мюнхен, Германия: SSI, 2012. – С. 174–176.

8. **Киборт И.Д.** Вопросы повышения эффективности котельной при помощи теплового насоса. Сборник научных трудов: материалы XIII научно – технической конференции молодежи ОАО «СЕВЕРНЫЕ МН» (12–14 декабря 2012 г.). – Ухта: ОАО «СМН», 2012 – С. 32–33.

9. **Киборт И.Д.** Пример внедрения системы утилизации теплоты сточных вод. Сборник научных трудов: материалы XIII международной молодежной научной конференции «Севергеоэкотех-2013» (20–22 марта 2013 г.): в 5 ч.; ч. 5. – Ухта: 2012. – С. 123–124.

10. **Киборт И.Д.** Сравнение энергосберегающих систем методом ассоциативных диаграмм. «SCIENCE AND WORLD»: международный научный журнал. – 2013. – № 2. – С. 54–56.

11. **Киборт И.Д.** Энергосберегающие мероприятия на компрессорных станциях. «СОК»: Ежемесячный специализированный журнал. – 2013. – № 2. – С. 64–69.

12. **Киборт И.Д.** Разработка программного аналитического комплекса для расчета и моделирования эффективной системы вентиляции. Сборник научных трудов: материалы XIV научно – технической конференции молодежи ОАО «СЕВЕРНЫЕ МН» (27–29 ноября 2013 г.). – Ухта: ОАО «СМН», 2012. – С. 56–57.

13. **Киборт И.Д., Кошкарев А. Ю.** Энергоэффективная система воздушного отопления подсобных помещений котельной. Сборник научных трудов: материалы XIV научно-технической конференции молодежи ОАО «СЕВЕРНЫЕ МН» (27–29 ноября 2013 г.). – Ухта: ОАО «СМН», 2012. – С. 57–58.