

На правах рукописи



Аверьянова Олеся Валерьевна

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ  
С ЕДИНЫМ КОНТУРОМ ТЕПЛОНАСОСНЫХ  
УСТАНОВОК**

Специальность:

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель доктор технических наук, старший научный сотрудник  
**Куколев Максим Игоревич**

Официальные оппоненты: **Хоменок Леонид Арсеньевич**  
доктор технических наук, профессор, ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»), г. Санкт-Петербург, заведующий аналитическим отделом №277

**Агапов Дмитрий Станиславович**

кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО «СПБГАУ»), г. Санкт-Петербург, доцент кафедры «Автомобили, тракторы и технический сервис»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского» Министерства обороны Российской Федерации (ФГБВОУ ВПО «ВКА им. Можайского» МО РФ), г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «29» января 2019 г. в 16.00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, ГК-2, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ» и на сайте <http://www.spbstu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

И.о. учёного секретаря  
диссертационного совета  
Д 212.229.04  
д.т.н.

Митяков А.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В отечественной практике проектирования сетей энерго- и теплоснабжения крупных объектов промышленного и гражданского назначения ведется совершенствование методик расчета тепловых сетей и установок с целью улучшения их технико-экономических характеристик, экономии энергетических ресурсов, а также создание оптимальных тепловых систем для защиты окружающей среды.

Применение теплонасосных установок на крупных объектах промышленного и гражданского назначения позволяет существенно снизить удельные затраты на производство энергетических ресурсов и повысить эффективность их использования за счет применения энергосберегающих технологий.

Существующая практика проектирования инженерных сетей с использованием теплонасосных установок не учитывает региональных климатических условий, удельных тепловых нагрузок на сети тепло и холодоснабжения, тарифы на энергоносители и т.д. Это негативно сказывается на общей эффективности работы и на размерах вложений инвестиций в подобные сети.

Таким образом, использование энергоресурсосберегающих технологий обуславливает необходимость совершенствования методов расчета теплоэнергетических установок и внутренних инженерных сетей с целью улучшения их технико-экономических характеристик, экономии энергетических ресурсов.

**Актуальность темы исследования.** Крупные объекты промышленного и гражданского назначения характеризуются наличием вторичных источников тепловыделений, энергию которых можно использовать. Для этого применяются различные устройства, в частности – теплонасосные установки. В настоящее время практически отсутствуют научно-обоснованные методики проведения расчета энергопотребления с одновременным учетом теплоты и электроэнергии внутренними сетями объектов, позволяющие выбрать наилучшее решение внутренних инженерных систем.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Применение теплонасосных установок ранее чаще всего ассоциировалось с геотермальными энергостанциями. В последнее время теплонасосные установки активно применяются в инженерных сетях. К примеру, на сегодняшний день в Швеции до 70% всего теплоснабжения обеспечивают тепловые насосы, в Швейцарии эксплуатируется свыше 60 000 тепловых насосов, в Германии в эксплуатации находятся сотни тысяч тепловых насосов, в Японии ежегодно производится около 3 млн. тепловых насосов.

По одному из вариантов применения в составе сетей теплоснабжения теплонасосные установки включаются в единый контур.

Внутренние инженерные сети, в основе которых лежит использование тепловых насосов вода/воздух и источником теплоты для которых служит вода в едином контуре сети теплоснабжения, массово начали применяться с 1960 гг. Применение таких сетей в настоящее время свидетельствует о приемлемом уровне проработанности вопросов при-

менения решений с теплонасосными установками и наличия методик проектирования инженерных сетей с единым контуром теплонасосных установок. Однако исследования энергопотребления подобных инженерных сетей, отличающиеся совместным учетом теплоты и электроэнергии, проведены в недостаточном объеме.

Модели расчета энергопотребления сетей подобного типа в литературных источниках практически отсутствуют, что обуславливает целесообразность проведения дальнейших работ в этом направлении.

**Объектом исследования** является инженерная сеть с единым контуром теплонасосных установок.

**Предметом исследования** является энергопотребление (теплоты и электроэнергии) сети с единым контуром теплонасосных установок.

**Цель работы:** Разработать методику расчета энергопотребления внутренних инженерных сетей, отличающуюся совместным учетом теплоты и электроэнергии, позволяющую проводить обоснованный выбор сети с единым контуром теплонаносных установок.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Проанализировать опыт проектирования и применения внутренних инженерных сетей с единым контуром теплонасосных установок.
2. Разработать имитационную модель расчета энергопотребления внутренних инженерных сетей с учетом теплоты и электроэнергии, позволяющую провести выбор сети с единым контуром теплонаносных установок.
3. Рассчитать значения удельного показателя относительной эффективности применения сетей с единым контуром теплонасосных установок для Российской Федерации и составить карту районирования по потенциалу их применения.
4. Оценить применимость для инженерной практики разработанной модели расчета сетей, использующих теплоту с целью улучшения их технико-экономических характеристик, экономии энергетических ресурсов.

**Научная новизна** работы заключается в:

1. Методике расчета энергопотребления внутренних инженерных сетей с учетом теплоты и электроэнергии, позволяющей провести выбор схемного решения.
2. Районировании территории Российской Федерации по потенциалу применения сетей с единым контуром теплонасосных установок.

**Методы исследования.** Проведенные исследования базировались на сочетании расчетных методов, основанных на фундаментальных термодинамических, физико-химических и технических представлениях о тепловых процессах в энергетических установках промышленной теплоэнергетики. А также численного моделирования энергопотребления внутренних инженерных сетей и анализа результатов натуральных наблюдений за реальным объектом.

### **На защиту выносятся:**

1. Имитационная модель для сравнения энергопотребления внутренних инженерных сетей крупного объекта с единым контуром теплонасосных установок (в качестве температурных доводчиков) и с приборами отопления и вентиляторными температурными доводчиками.
2. Методика расчета энергопотребления внутренних инженерных сетей с учетом теплоты и электроэнергии для выбора проектного решения;
3. Карта районирования Российской Федерации по потенциалу применения сетей с единым контуром теплонасосных установок;
4. Результаты экспериментальных исследований внутренней инженерной сети крупного объекта гражданского назначения в Санкт-Петербурге с единым контуром теплонасосных установок (в качестве температурных доводчиков отдельных помещений).

### **Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в:

1. Создании методики расчета энергопотребления внутренних инженерных сетей с единым контуром теплонасосных установок с учетом теплоты и электроэнергии для объектов гражданского и промышленного назначения.
2. Возможности применения предлагаемой методики при расчете энергопотребления традиционных инженерных сетей (с приборами отопления и вентиляторными температурными доводчиками).
3. Районировании территории Российской Федерации по потенциалу применения внутренних инженерных сетей с единым контуром теплонасосных установок.
4. Возможности использования результатов сравнения значений годового энергопотребления для внутренних инженерных сетей крупного объекта при разработке программ энергосбережения предприятий, совместно потребляющих теплоту и холод.

**Достоверность и обоснованность** результатов работы подтверждается применением обоснованных допущений при моделировании внутренних инженерных сетей крупного объекта, применением фундаментальных уравнений теории тепло- и массообмена, удовлетворительным совпадением результатов расчетов и данных экспериментов.

### **Апробация работы.**

Материалы исследований опубликованы в 12-ти печатных работах в Российской Федерации. Из них: 5 статей в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий ВАК РФ, 3 - без соавторов.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференции «Энергосбережение в инженерных сетях промышленных зданий» в рамках деловой программы XII Международного промышленного форума «Российский промышленник», 2008 г.; на ежегодных Неделях науки ГОУ СПбГПУ: Всероссийских межвузовских научно-технических конференциях студентов и аспирантов, 2008 - 2010 гг.; на 68-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов

ГОУ ГАСУ 2010-2011 гг.; на семинаре в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского в 2012 г.; на заседании кафедры кондиционирования воздуха Института холода и биотехнологий в 2012 г.; на семинаре кафедры «Промышленная теплоэнергетика» в 2013 г.; на семинарах кафедр «Гидравлика» и «Гидравлика и прочность» в 2016-2017 гг.; на объединенном научном семинаре трех кафедр ИСИ (каф. «ГиП», каф. «СУЗиС», каф. «СК») в 2018 г.; на расширенном (совместном) заседании кафедр «Гидравлика и прочность» Инженерно-строительного института и «Атомная и тепловая энергетика» Института энергетики и транспортных сетей ФГАОУ ВО «СПбПУ» в 2018 г.

### **Реализация работы:**

Рекомендации по проектированию внутренних инженерных сетей крупных объектов с единым контуром теплонасосных установок используются в Некоммерческом партнерстве «Объединение проектных организаций «СтройПроект» (г. Санкт-Петербург).

Результаты работы используются в Санкт-Петербургских ПНИПКУ «Венчур», ООО СК «РИТМ», ООО «Проектно-строительная компания «ПитерЛиК» при проектировании сетей жизнеобеспечения зданий.

Результаты работы внедрены в учебный процесс в ФГАОУ ВО «СПбПУ» при подготовке инженеров и магистров по направлению «Строительство».

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, списка литературы (120 наименований), приложения, включающего акты внедрения результатов диссертационной работы. Она изложена на 115 страницах машинописного текста, включающих 33 рисунка и 4 таблицы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи. Представлены основные научные положения, выносимые на защиты.

**Первая глава** посвящена аналитическому обзору состояния вопроса в области совершенствования методов расчета тепловых сетей и установок с целью улучшения их технико-экономических характеристик, экономии энергетических ресурсов, проектирования сетей с теплонасосными установками, выбору и обоснованию направления исследований.

Отдельными аспектами совершенствования методов расчета тепловых сетей и установок с целью улучшения их технико-экономических характеристик, экономии энергетических ресурсов занимались в: Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого (Сергеев В.В., Митяков В.Ю., Митяков А.В., Сапожников С.З., Ланин А.А.); Санкт-Петербургском государственном университете промышленных технологий и дизайна (Суслов В.А.); Научно-производственном объединении по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова (Хоменок Л.А.) и др.

Вопросами применения теплонасосных установок в системах теплоснабжения и отопления занимались в: Политехническом университете Петра Великого (Боровков В.М., Зысин В.А., Сергеев В.В., Молодкина М.А., Аникина И.Д.); Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете (Дацюк Т.А., Полушкин В.И., Ва-

ильев В.Ф.); Кубанском государственном технологическом университете (Буртасенков Д.Г., Шерстобитов И.В., Кондратьева Н.Ю.); Московском государственном университете инженерной экологии (Калнинь И.М.); Военном инженерно-космическом университете им. А.Ф. Можайского (Кириллов Н.Г.; Авсюкевич Д.А.; Сударь Ю.М.; Осовский В.А.) Санкт-Петербургском государственном аграрном университете (Агапов Д.С.) и др.

Работы по улучшению конструкции сетей с единым контуром теплонасосных установок проводил Joseph A. Pietsch в 1980-1990 гг. Также среди зарубежных исследователей стоит отметить работы R.H. Howell, J.H. Zaidi, E.A. Kush, W.S. Cooper, H.I. Henderson, S.W. Carlson, M.K. Khattar. Большой объем работ проведен на территории КНР и Южной Кореи. Наиболее значимые результаты принадлежат Zhiwei Lian, S.W. Lang, W. Xu, T.S. Feng, F. Wang, Z.L. Ma, Y. Cao, Y.Q. Lu. M. Zaheer-Uddin и J.C.Y. Wang разрабатывали функциональные схемы автоматического регулирования сетей с единым контуром теплонасосных установок.

Вышеперечисленные исследователи вели работы по сетям, использующим в качестве источника низкопотенциальную теплоту наружного воздуха, грунтовых вод, сточных вод. Однако вопрос применения внутреннего воздуха помещений крупных объектов исследован в недостаточной степени. В литературных источниках практически отсутствуют модели и методики расчета внутренних инженерных сетей с единым контуром теплонасосных установок. Кроме того, затруднено определение общего энергопотребления, позволяющее проводить выбор сети с единым контуром теплонасосных установок.

Таким образом, разработка методики расчета энергопотребления инженерных сетей, позволяющей провести выбор схемного решения с единым контуром теплонасосных установок для объектов гражданского и промышленного назначения, остается актуальной.

**Вторая глава** посвящена разработке имитационной модели и методике расчета годового энергопотребления внутренних инженерных сетей крупного объекта с одновременным учетом теплоты и электроэнергии.

Сначала были определены возможные схемные решения инженерных сетей крупных объектов, имеющих максимально совпадающие параметры для сравнения между собой по энергопотреблению.

В качестве традиционной инженерной сети для обогрева объекта рассматривалась сеть с приборами отопления, включенными в первый гидравлический контур и потребляющая только теплоту. Для удаления теплоизбытков на объекте применены вентиляторные доводчики (ВД), включенные во второй гидравлический контур. Элементы инженерных сетей, такие как приборы отопления и ВД, отнесены к «индивидуальным температурным доводчикам» (ИД). Электрическая энергия обеспечивала привод компрессоров холодильного оборудования. Схема с ВД выбрана как наиболее универсальное решение. Расстояние между размещаемыми ВД и источником холода (в отличие от мультizonальных и сплит-систем) практически не ограничено. Принципиальная схема такой сети представлена на рис.1. К ее недостаткам относят отсутствие возможности перераспределять теплопоступления, в том числе, от солнечной радиации. Для улучшения технико-экономических

характеристик предложено применить децентрализованную инженерную сеть, дающую возможность осуществлять перенос теплоты из помещений, которые нужно охлаждать, в помещения с недостатком энергии. Для периодического получения холода или теплоты в каждом помещении целесообразно использовать тепловой насос.

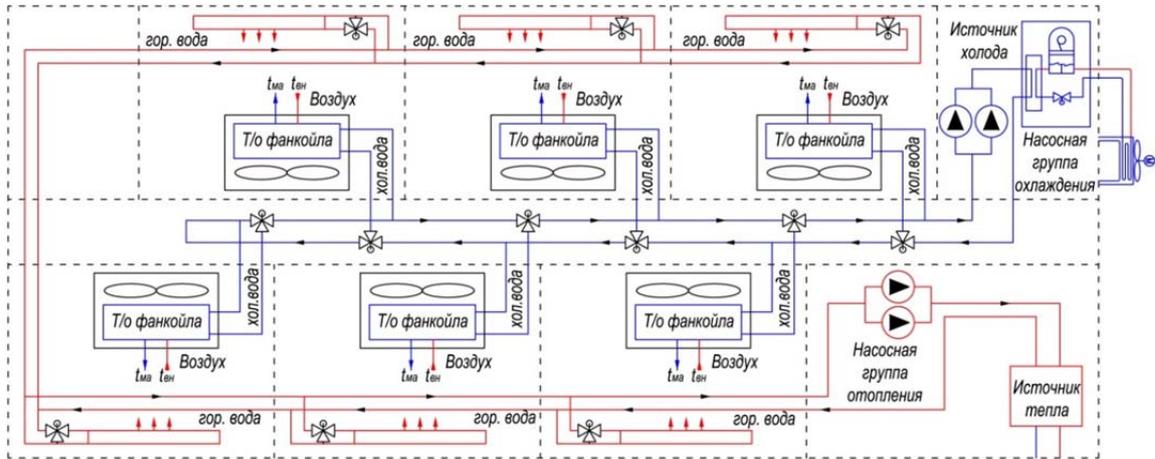


Рисунок 1. Традиционная инженерная сеть с вентиляторными доводчиками

Таким образом, для перераспределения теплоты на объекте предложена сеть с теплонасосными установками, включенными в единый гидравлический контур. Электрическая энергия расходуется на приводы компрессорного оборудования теплонасосной установки и холодильного оборудования. Такая децентрализованная сеть для круглогодичного отопления и охлаждения (Рис.2) состоит из двухтрубного замкнутого водяного контура с постоянной циркуляцией неохлажденной воды по всему объему здания. Поддержание температуры воды в течение года в интервале от 18 до 35 °С достигается с помощью дополнительных центрального источника теплоты (включающегося при минимальной температуре рабочего интервала) и устройств, отводящих теплоту при максимальной температуре (градирни или холодильных машин).

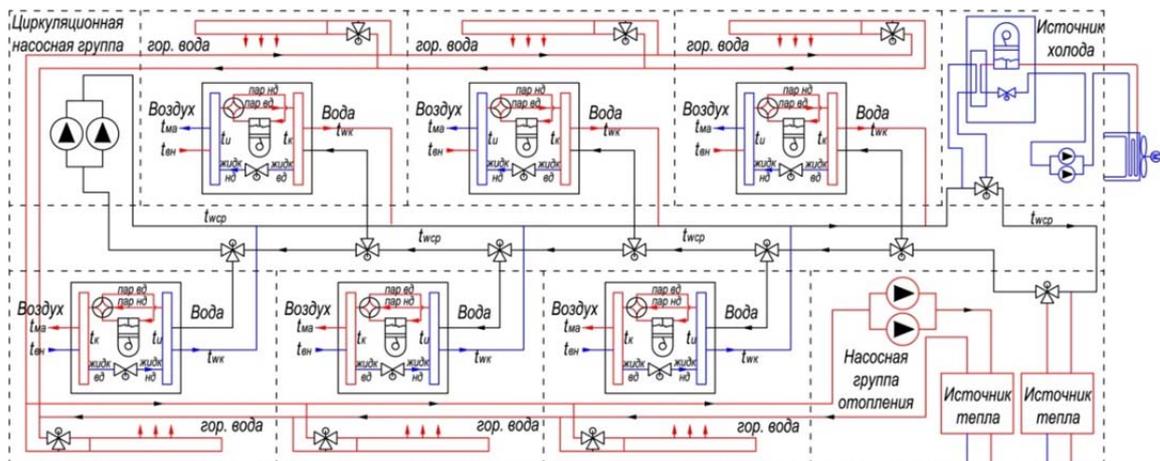


Рисунок 2. Сеть с единым контуром теплонасосных установок

Таким образом, для перераспределения теплоты на объекте предложена сеть с теплонасосными установками, включенными в единый гидравлический контур. Электриче-

ская энергия расходуется на приводы компрессорного оборудования теплонасосной установки и холодильного оборудования. Такая децентрализованная сеть для круглогодичного отопления и охлаждения (Рис.2) состоит из двухтрубного замкнутого водяного контура с постоянной циркуляцией неохлажденной воды по всему объему здания. Поддержание температуры воды в течение года в интервале от 18 до 35 °С достигается с помощью дополнительных центрального источника теплоты (включающегося при минимальной температуре рабочего интервала) и устройств, отводящих теплоту при максимальной температуре (градирни или холодильных машин).

3. Предложено производить расчет годового энергопотребления по значению общего количества поступившего в рассматриваемую сеть количества энергии, которое складывается из количеств теплоты и электроэнергии (условно выраженной в единицах теплоты). Для этого вводится коэффициент пересчета электрической энергии в теплоту по степени затрат в монетарном выражении  $n$ . Этот коэффициент является переменным и отражает текущее состояние цен на энергоносители в конкретном регионе.

4. Исходными данными для расчета поступившего в сеть количества энергии, будут следующие заданные характеристики объекта:  $t_{вн}$  - температура внутреннего воздуха, °С;  $G_{рец}$  - расход рециркуляционного внутреннего воздуха через вентиляторный доводчик или теплонасосную установку, кг/ч;  $t_{wkS}$ ,  $t_{wkN}$  - температуры теплоносителя верхней и нижней границы температурного интервала работы единого контура с теплонасосными установками, °С;  $t_w$  - средняя температура теплоносителя в едином гидравлическом контуре с теплонасосными установками, °С. При этой температуре система находится в равновесном состоянии, потребление или отвод дополнительной теплоты не происходит.

Значение полного перепада температуры  $\Delta\Theta$  (температуры среды на входе в теплообменник теплонасосной установки и температуры кипения хладагента в ней) при расчете температуры кипения в теплонасосной установке является постоянным.

5. Удельные характеристики цикла теплоносительной установки определены по lgP-i диаграмме используемого хладагента (R407C) в качестве рабочего тела в ней, их значения сведены в таблицы.

В основу метода положено условие баланса тепловой мощности  $Q_i^{уд}$ :

$$Q_i^{уд} = \sum Q_X - \sum Q_T. \quad (1)$$

где  $Q_i^{уд}$  - требуемая производительность индивидуального температурного доводчика в расчетный час, кВт·ч;  $\sum Q_T$  - суммарные тепlopоступления в расчетный час, кВт·ч;  $\sum Q_X$  - суммарные тепlopотери в расчетный час, кВт·ч.

Для традиционной сети (с вентиляторными доводчиками и централизованной системой отопления) общее вводимое количество энергии  $Q_{tradition}$  складывается из теплоты  $(Q_T)_{год}$  и электроэнергии, выраженной в тепловых единицах:

$$Q_{tradition} = (Q_T)_{год} + (N_{э})_{год} \cdot n, \quad (2)$$

где  $(Q_T)_{200}$  – тепловая энергия, поступающая в систему отопления, кВт·ч за год;  $(N_э)_{200}$  – электроэнергия, потребляемая компрессором холодильной машины, кВт·ч за год;  $n$  – коэффициент пересчета, принимается в соответствии с допущением 3.

**Для предлагаемой сети** (с единым контуром теплонасосных установок и приборами отопления) общее вводимое количество энергии  $Q_{promising}$  :

$$Q_{promising} = Q_{CO} + Q_{don} + ((N_э)_{200} + (N_{TH})_{200}) \cdot n, \quad (3)$$

где  $Q_{CO}$  – теплота, поступающая в традиционную систему отопления, кВт·ч за год;  $Q_{don}$  – дополнительная теплота, поступающая в единый гидравлический контур с ТН, кВт·ч за год;  $(N_э)_{200}$  – электроэнергия, потребляемая компрессором холодильной машины при отводе избыточного тепла из единого контура с теплонасосными установками, кВт·ч за год;  $(N_{TH})_{200}$  – электроэнергия, потребляемая компрессорами теплонасосных установок, кВт·ч за год;  $n$  – принимается в соответствии с допущением 3.

Последовательность расчета осуществляется в соответствии с блок-схемой, которая представлена на рис. 3.

**ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:** значение  $n$  и  $t_{гн}$ , объемно-планировочные решения объекта расчета и место его строительства.

**АЛГОРИТМ:**

1. В соответствии с местом строительства объекта расчета из базы климатических данных выбираются значения энергопоступления на горизонтальную  $Q_i^{hor}$  и вертикальную  $Q_i^{ver}$  поверхности ограждения за счет солнечной радиации; температура наружного воздуха в расчетный час  $t_i^{нар}$ ; средняя месячная температура воздуха в  $i$ -м месяце  $t_{сред}^i$ ; абсолютный максимум температуры воздуха в  $i$ -м месяце  $t_{max}^i$ ; максимальное и среднесуточное значение поверхностной плотности теплового потока суммарной солнечной радиации (прямой и рассеянной) для горизонтальной поверхности, поступающей в  $i$ -м месяце  $J_{макс}^i$  и  $J_{cp}^i$ ; модуль среднего вектора скорости в  $i$ -м месяце  $U^i$ ; время максимума суммарной (прямой и рассеянной) солнечной радиации  $z^i$ .

2. В соответствии с объемно-планировочными решениями объекта расчета вводятся значения площадей окон  $F_{ок}$  и массивных ограждающих конструкций  $F_m$ .

3. В соответствии с технологическими решениями объекта расчета принимается значение полных тепlopоступлений в помещении  $Q_{total}$ , которые не зависят от климатических параметров и являются только его внутренней характеристикой.

4. В соответствии с техническими условиями источника холода на объекте расчета и с типом применяемого хладагента для него, по соответствующей lgP-i диаграмме применяемого хладагента вводятся значения теплоты сжатия в компрессоре  $l$ , удельной холодопроизводительности  $q_x$  и удельной теплопроизводительности  $q_k$  для расчетного диапазона температур, а также значения механического коэффициента полезного действия  $\eta_{мех}$ ,

индикаторного коэффициента полезного действия  $\eta_i$  и коэффициента полезного действия электродвигателя  $\eta_{эл}$ .

#### БЛОК ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО РАСЧЕТА:

5. По климатическим данным и заданным характеристикам объекта расчета определяется значение приведенного сопротивления теплопередаче массивной ограждающей конструкции  $R_i$ .

6. По значениям из п.5 определяется значение теплового потока через массивную ограждающую конструкцию  $Q_i^m$ .

7. На основе результата из п.6 и заданным характеристикам объекта расчета определяются суммарные тепlopоступления за расчетный час  $\sum Q_T$ .

8. По климатическим данным и заданным характеристикам объекта расчета определяются суммарные тепlopотери в расчетный час  $\sum Q_x$ .

9. На основе результата п.7 и п.8 определяется расход тепловой энергии, отводимой или подводимой в помещение посредством индивидуального температурного доводчика (вентиляторным доводчиком или прибором отопления) в расчетный час  $Q_{уд}$ .

#### БЛОК РАСЧЕТА ТРАДИЦИОННОЙ СЕТИ:

10. Если  $Q_{уд}$ , получ. в п.9 имеет положительное значение, то рассчит.  $(Q_T)_{zod}$ .

11. Если  $Q_{уд}$ , получ. в п.9 имеет отрицательное значение, то рассчитывается  $(N_3)_{zod}$ .

12. По рассчитанным значениям  $(N_3)_{zod}$  и  $(Q_T)_{zod}$  получают общее вводимое количество энергии  $Q_{tradition}$ .

#### БЛОК РАСЧЕТА ПРЕДЛАГАЕМОЙ СЕТИ:

13. Если  $Q_{уд}$ , полученное в п.9 имеет положительное значение, то рассчитывается  $(Q_T)_{zod}$ , на основе которого оценивается значение температуры воздуха на выходе из теплонасосной установки  $t_{вых}$ .

14. Если значение  $t_{вых}$  больше  $t_{wkS}$ , то вычисляется максимальная доля тепловой энергии  $Q_{TH}$ , которую сможет компенсировать теплонасосная установка при ее работе в качестве отопительного прибора.

15. На основе вычисленных в п. 13 - 14 значений  $(Q_T)_{zod}$  и  $Q_{TH}$  определяется  $Q_{CO}$ .

16. По полученному в п.13 значению  $t_{вых}$  вычисляется  $t_k$ .

17. Если  $Q_{уд}$ , полученное в п.9 имеет отрицательное значение, то рассчитывается требуемая холодопроизводительность теплонасосной установки, которая соответствует значению  $(-Q_{TH})$  при ее работе в режиме отвода теплоизбытков, на основе которого получают  $t_u$ .

18. В соответствие с получаемыми значениями  $t_k$  и  $t_u$  рассчитываются значения индикаторной мощности компрессора теплонасосной установки при его работе на обогрев  $N_i^K$  и его работе в режиме отвода теплоизбытков  $N_i^X$ .

19. По полученным значениям  $Q_{TH}$ ,  $N_i^K$ ,  $N_i^X$  определяются значения расхода теплоносителя по каждой из теплонасосной установки, работающей в расчетный час на обогрев  $G_S$  и работающей в расчетный час на охлаждение  $G_N$ .

20. По полученным в п.19 значениям  $G_S$  и  $G_N$  определяется значение температуры теплоносителя в едином гидравлическом контуре  $t_{wk}$ .

21. Если  $t_{wk}$  меньше  $t_w$  (по допущению 4), то определяется значение  $Q_{don}$ .

22. Если  $t_{wk}$  больше  $t_w$  (по допущению 4), то определяется значение теплоты, которую необходимо отвести от единого контура посредством холодильной машины  $Q_{chiller}$ , на основе которого получают  $(N_э)_{zod}$ .

23. По значениям  $N_i^K$  и  $N_i^X$ , полученным в п. 19, определяют  $(N_{TH})_{zod}$ .

24. По рассчитанным значениям  $Q_{CO}$ ,  $Q_{don}$ ,  $(N_э)_{zod}$  и  $(N_{TH})_{zod}$  получают общее вводимое количество энергии для объекта расчета  $Q_{promising}$ .

#### СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

25. Если полученное значение  $Q_{promising}$  меньше  $Q_{tradition}$ , полученного в п.12, то применение внутренних инженерных сетей с единым контуром теплонасосных установок **целесообразно** на объекте расчета.

30. Если полученное значение  $Q_{promising}$  больше  $Q_{tradition}$ , полученного в п.12, то применение внутренних инженерных сетей с единым контуром теплонасосных установок **нецелесообразно** на объекте расчета.

Последовательность расчета осуществляется в соответствии с блок-схемой расчета энергопотребления внутренних инженерных сетей с одновременным учетом теплоты и электроэнергии для сетей с теплонасосными установками, включенными в единый гидравлический контур, и для традиционных сетей с приборами отопления и вентиляторными температурными доводчиками (рис. 3).

В **третьей главе** приводятся материалы по созданию базы климатических данных и районирование территории Российской Федерации по показателю относительной эффективности  $N$ . Данный показатель определяет целесообразность применения сети с единым контуром теплонасосных установок.

Районирование территории было проведено в соответствии с базой климатических данных по районам. Оно включало необходимые в дальнейших расчетах значения теплоты, поступающей на поверхность ограждения за счет солнечной радиации в сочетании с температурами наружного воздуха в течение календарного года. Перечисленные параметры получены путем анализа данных «Научно-прикладного справочника по климату СССР», причем наибольший интерес для решения поставленной задачи представляли его части 1, 2 и 4. Для этого также применялась методика расчета энергопотребления (Гл.2), дающая значение показателя относительной эффективности  $N$  для предварительной оценки целесообразности применения тепловых сетей с единым контуром теплонасосных установок по сравнению с традиционными схемными решениями:

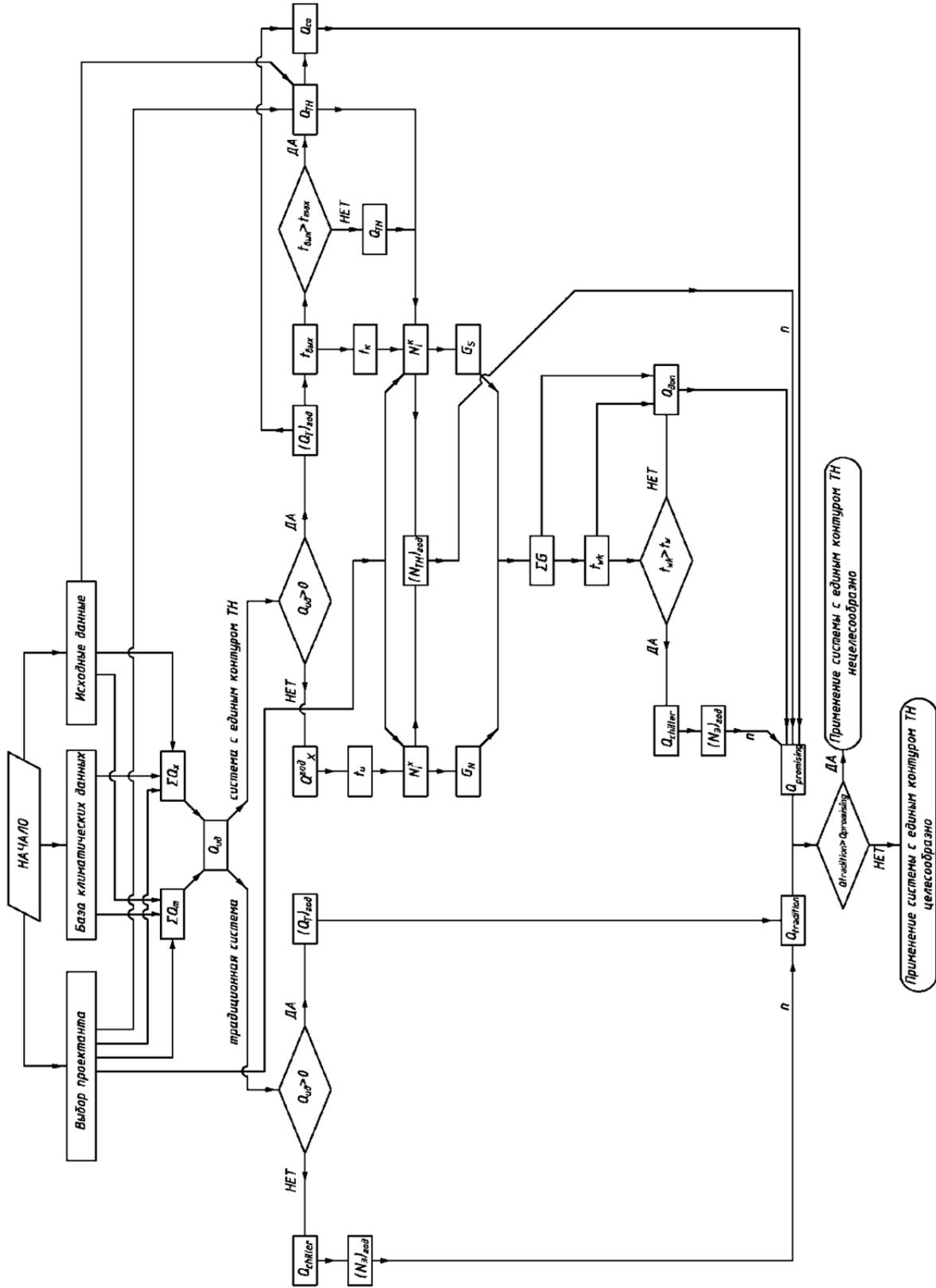


Рисунок 3. Блок-схема расчета энергопотребления сетями

$$N = 1 - \frac{Q_{\text{promising}}}{Q_{\text{tradition}}}, \quad (4)$$

где  $Q_{\text{promising}}$  - по п.24,  $Q_{\text{tradition}}$  - по п.12, при условии расчета  $Q_i^{ud}$  по ф.1, где суммарные теплопоступления и суммарные теплотери рассчитаны для 1 м<sup>2</sup> ограждающей конструкции, светопрозрачная часть которой составляла 85%. Значения  $Q_{\text{total}}$  не учитывались в соответствии с п.3.

Полученные значения  $N$  располагались в пределах от 1,15% до 46,21%. На карте выделены и показаны районы, имеющие значение  $N$ , входящие в один из четырех диапазонов: до 10%, от 10% до 15%, от 15% до 20% и более 20% (рис.4). Основываясь на данных карты, инвестор, заказчик или проектант могут принять предварительные решения по применению внутренних инженерных сетей с единым контуром теплонасосных установок в конкретной точке страны. Например, при размещении объекта в районе со значением  $N$  менее 10% экономия удельного годового энергопотребления на единицу площади ограждающих конструкций составит до 10% без учета других факторов. В этом случае, при наличии на объекте дополнительных внутренних теплопоступлений, целесообразно проводить дальнейшие детальные расчеты годового энергопотребления.

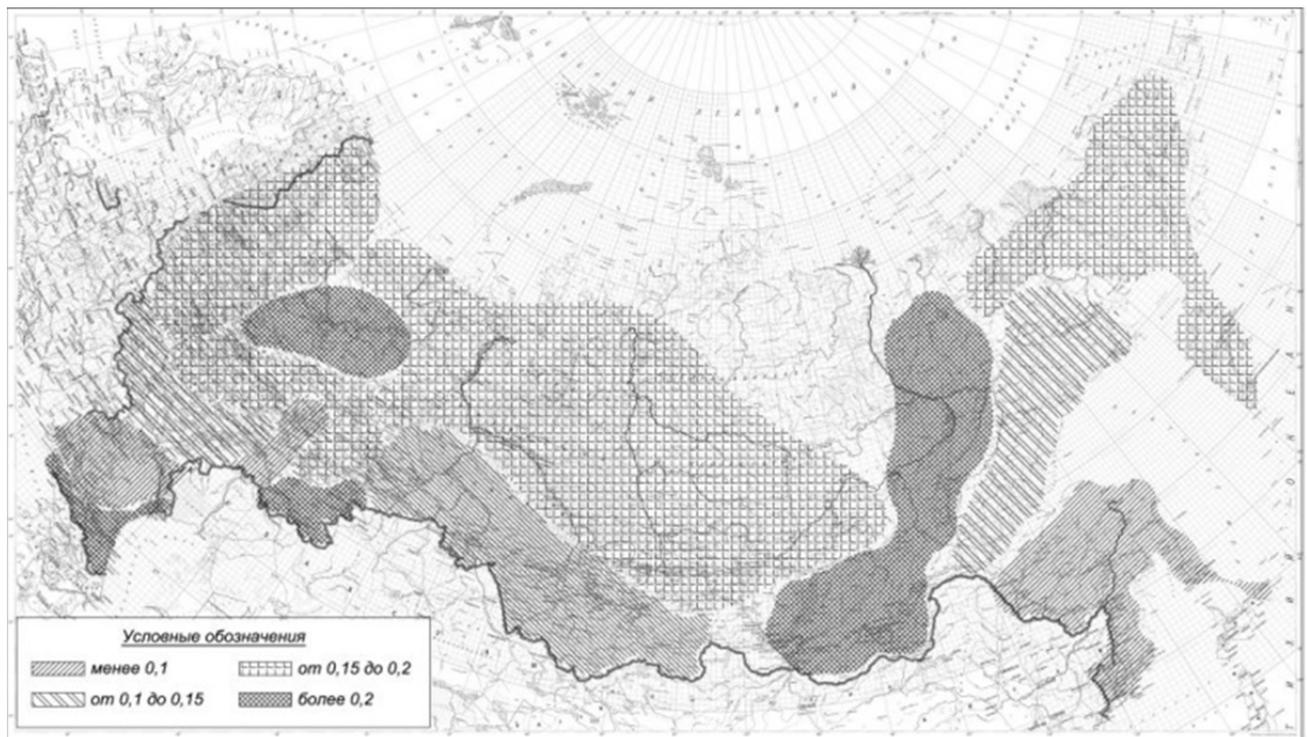


Рисунок 4. Карта районирования Российской Федерации по показателю относительной эффективности схемного решения с единым контуром теплонасосных установок

С целью иллюстрации предложенных подходов была выбрана одна из зон крупного действующего объекта и проведено натурное исследование энергопотребления ее инженерной сети с единым контуром теплонасосных установок. Согласно карте районирования (рис.4) ожидаемая экономия составит до 20% только за счет расположения объекта.

Рассматриваемый объект является одним из крупнейших торгово-развлекательных центров Санкт-Петербурга площадью 80 000 м<sup>2</sup> с реализованной инженерной сетью с единым контуром теплонасосных установок малой и средней мощности. В зависимости от потребности эта сеть либо забирает теплоту из помещений и перекачивает ее в единый контур, либо из единого контура перекачивает теплоту в помещения.

Выбранная зона на рассмотренном объекте характеризуется:

1. Наличием массивных наружных ограждающих конструкций.
2. Наличием остекления, пропускающего солнечную радиацию, в массивных ограждающих конструкциях.

3. Наличием технической возможности выделения части единого контура теплонасосных установок для проведения эксперимента.

4. Наличием технической возможности установки приборов, позволяющих задокументировать измеряемые параметры теплоносителя (объем, температура и давление), циркулирующего в этом ответвлении от единого контура теплонасосных установок.

Для проведения эксперимента согласно схеме (Рис. 4) на подающем и обратном трубопроводе ответвления от единого контура теплонасосных установок был установлен узел учета, состоящий из следующего оборудования: тепловычислитель СПТ943; два расходомера на подающем и обратном трубопроводах - ПРЭМ Кл.В1; погрешность измерения  $\pm 2.0\%$ ; комплект термопреобразователей сопротивления модификации КТПТР-05, диапазон измерения температуры 0-200°C, НСХ100П, L=70 мм; класс 1; два преобразователя давления модификации «Метран-55»; верхний предел измерения давления 1,6(1,0) МПа; класс точности 0,5.

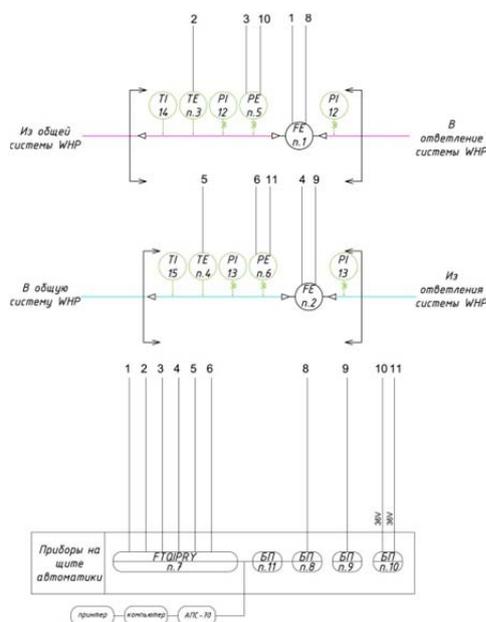


Рисунок 4. Схема узла учета для фиксирования параметров теплоносителя сети с единым контуром теплонасосных установок

Тепловычислитель обеспечивал измерение объема, температуры и давления теплоносителя. Также вычислялись количества теплоты, массы и средние значения температур и давления в сети по встроенным алгоритмам, которые архивировались. Архивы размеща-

лись в энергонезависимой памяти и сохранялись в течение всего срока эксперимента. На основании проведенных замеров в течение одного года полученные суммарные значения затрачиваемого выбранной зоной объекта количества теплоты, поступившей в сеть с единым контуром теплонасосных установок, составили 8200 кВт·ч за год.

Применив предложенный метод для выбранного объекта, установлено, что количество теплоты, потребляемой выбранной зоной объекта от городских тепловых сетей в течение года составила 8358 кВт·ч за год. Количество полного годового энергопотребления, выраженное в единицах теплоты - 248 007 кВт·ч за год, что на 113 356 кВт·ч меньше, чем при применении традиционного решения, включающего систему отопления, контур охлаждения с вентиляторными температурными доводчиками и холодильную машину. Значение величины удельного показателя относительной эффективности  $N$  (ф.4) составило 31%. Результат расчета в соответствии с предлагаемым в работе методом представлен на рис. 5.

Оценка достоверности показала, что количества теплоты, потребляемой выбранной зоной объекта, полученные расчетным путем в соответствии с предлагаемым методом и экспериментально, качественно совпали (погрешность около 2%). Расчетная экономия на 11% выше ожидаемой в соответствие с картой районирования Российской Федерации.

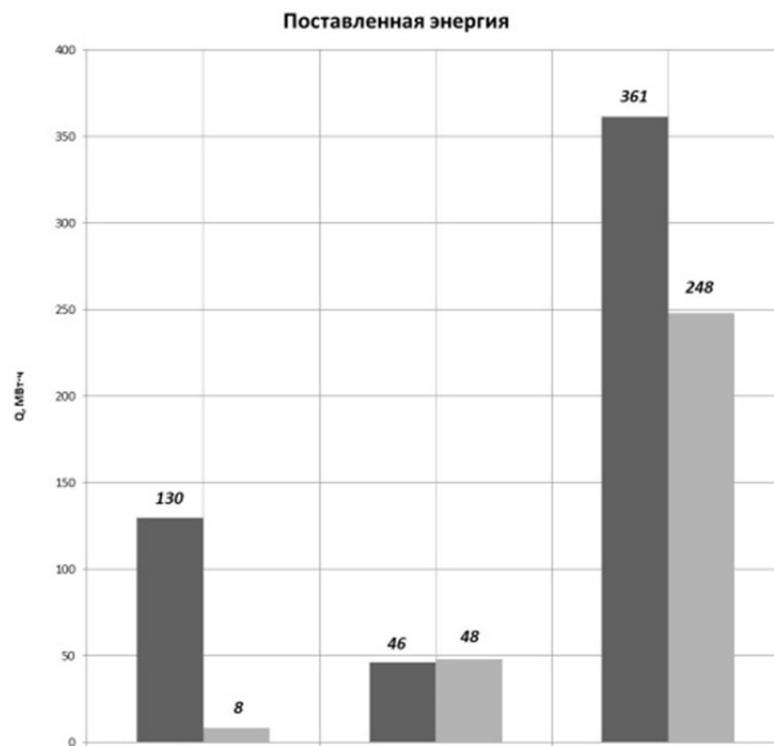


Рисунок 5. Теоретические значения годового энергопотребления для рассматриваемой зоны объекта: ■ - традиционное решение; ■ - единый контур теплонасосных установок

**В Заключение** приводятся основные результаты исследования. Решена актуальная задача разработки методики расчета внутренних инженерных сетей, отличающейся одновременным учетом теплоты и электроэнергии, позволяющей проводить обоснованный выбор сети с единым контуром теплонаносных установок.

Итог работы:

1. В результате анализа опыта проектирования и применения внутренних инженерных сетей с единым контуром теплонасосных установок показано, что обоснованный выбор этих сетей затруднен из-за отсутствия методик расчета.

2. Впервые разработаны имитационная модель расчета энергопотребления внутренних инженерных сетей с одновременным учетом теплоты и электроэнергии, позволяющей провести выбор сети с единым контуром теплонасосных установок.

3. Рассчитаны значения удельного показателя относительной энергоэффективности применения сетей с единым контуром теплонасосных установок для Российской Федерации, достигающие 50%. Выполнено районирование территории страны по показателю относительной энергоэффективности применения сетей с единым контуром теплонасосных установок и составлена карта страны по потенциалу применения сетей с единым контуром теплонасосных установок.

4. Установлена адекватность и применимость имитационной модели путем сопоставления натуральных и расчетных показателей потребления теплоты в течение года в крупном многофункциональном здании в г. Санкт-Петербург сетью с единым контуром теплонасосных установок (в качестве температурных доводчиков отдельных помещений). Выявлено, что количество теплоты, потребляемой этим объектом от городских тепловых сетей в течении года составляет около 8 МВт·ч. А общее вводимое количество энергии, выраженное в тепловых единицах - 248 МВт·ч, что на 30% меньше, чем при применении традиционной сети.

5. Разработанная методика позволяет провести расчет потребления общей вводимой энергии и для традиционного схемного решения.

6. В дальнейших исследованиях целесообразно провести расчеты для других хладагентов и при других значениях полного перепада температуры; учесть электроэнергию для привода насосного оборудования, поддерживающего постоянный напор в гидравлических контурах.

**По теме исследования опубликованы работы:**

**издания из Перечня периодических научных изданий, рекомендованных ВАК  
Министерства образования и науки РФ:**

1. Аверьянова О.В., Куколев М.И. Расчет годового энергопотребления крупного объекта с тепловыми насосами, включенными в единый контур. // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2018. №6(198). С. 70-74.
2. Аверьянова О.В. Экономическая эффективность энергосберегающих мероприятий. // Инженерно-строительный журнал. 2011. №5(23). С. 53-59.
3. Аверьянова О.В. Климатические системы с тепловыми насосами и водяным контуром. // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – №2(4). – С. 19-22.
4. Аверьянова О.В. Энергосберегающие технические решения для местно-центральных сетей обеспечения микроклимата при использовании тепловых насосов в качестве местных агрегатов, объединенных в единый водяной контур. // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – №1(19). – С. 37-45.

5. Шуравина Д.М., Фокина Н.Б., Аверьянова О.В. Парокомпрессионные тепловые насосы как энергоэффективные устройства преобразования теплоты. // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. № 10 (15). С. 62-76.

**публикации в других изданиях:**

1. Аверьянова О.В. Возможности использования внутренних тепlopоступлений в системах кондиционирования. // Инженерные системы. АВОК-Северо-Запад. – 2009. – №1(38). С. 26-28.
2. Аверьянова О.В. Энергоэффективные системы кондиционирования. // Еврострой. - 2009. – №3. С.10-13.
3. Аверьянова О.В. Системы кондиционирования для центра обработки данных. // Еврострой - 2010. -№3. С. 36-40.
4. Аверьянова О.В. О комплексном подходе к проектированию сетей жизнеобеспечения с целью повышения ресурсо- и энергосбережения. // Инженерные системы. АВОК-Северо-Запад. – 2011. -№2. С. 50-55.
5. Аверьянова О.В., Горшков В.А., Дьячек М.В. Достоинства и недостатки системы кондиционирования с использованием тепловых насосных установок по сравнению с системой чиллер-фанкойл. // XXXVII Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научной конференции студентов и аспирантов. Ч.1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. С.192-194.
6. Горшков В.А., Дьячек М.В., Аверьянова О.В. Решение задачи выбора энергоэффективной системы кондиционирования и ее оптимизации. // Сборник тезисов научно-исследовательских работ студентов и аспирантов СПбГПУ. – СПб, 2008г.
7. Дьячек М.В., Аверьянова О.В. Применение тепловых насосов для повышения энергоэффективности сетей кондиционирования в общественных зданиях. // Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона: Материалы конференций политехнического симпозиума. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.