

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт: Энергетический
Направление подготовки: 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника
Кафедра: Атомных и тепловых электростанций

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

УДК 697.34:621.577

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4Б	Насырова Малика Тимуровна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры АТЭС	В.И. Беспалов	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры менеджмента	А.А. Фигурко	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры экологии и БЖД	М.В. Василевский	к.т.н., доцент		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ст. преподаватель кафедры АТЭС	М.А. Вагнер	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
атомных и тепловых электростанций	А.С. Матвеев	к.т.н., доцент		

Томск – 2016 г.

Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы магистра по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	Универсальные компетенции	
P1	Использовать представления о методологических основах научного познания и творчества, анализировать, синтезировать и критически оценивать знания	Требования ФГОС (ОК- 8, 9; ПК-4), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P2	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-3; ПК-8, 24), Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P3	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы, состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации, осуществлять педагогическую деятельность в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС (ОК-4, 5; ПК-3, 16, 17, 25, 27, 28, 32), Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P4	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной инженерной деятельности, компетентность в вопросах устойчивого развития.	Требования ФГОС (ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп.2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P5	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1, 2, 6), Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
	Профессиональные компетенции	
P6	Использовать глубокие естественнонаучные, математические и инженерные знания для создания и применения инновационных технологий в теплоэнергетике	Требования ФГОС (ПК-1, 5), Критерии 5 АИОР (п.1.1), согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

P7	Применять глубокие знания в области современных технологий теплоэнергетического производства для постановки и решения задач инженерного анализа, связанных с созданием и эксплуатацией теплотехнического и теплотехнологического оборудования и установок, с использованием системного анализа и моделирования объектов и процессов теплоэнергетики	Требования ФГОС (ПК-2, 7, 11, 18 – 20, 29, 31), Критерий 5 АИОР (пп.1.1, 1.2, 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P8	Разрабатывать и планировать к разработке технологические процессы, проектировать и использовать новое теплотехнологическое оборудование и теплотехнические установки, в том числе с применением компьютерных и информационных технологий	Требования ФГОС (ПК-9, 10, 12 – 15, 30), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Использовать современные достижения науки и передовой технологии в теоретических и экспериментальных научных исследованиях, интерпретировать и представлять их результаты, давать практические рекомендации по внедрению в производство	Требования ФГОС (ПК-6, 22 – 24), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P10	Применять методы и средства автоматизированных систем управления производства, обеспечивать его высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на теплоэнергетическом производстве, выполнять требования по защите окружающей среды.	Требования ФГОС (ПК-21, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Готовность к педагогической деятельности в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС (ПК-32), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический
Направление подготовки **13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника**
Кафедра «Атомных и тепловых электростанций»

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой АТЭС ЭНИИ
А.С. Матвеев

(Подпись)

(Дата)

**ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации

(бакалаврской работы, /работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ4Б	Насыровой Малике Тимуровне

Тема работы:

Использование теплонасосных установок в системах теплоснабжения	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	20.04.2016 3057/С

Срок сдачи студентом выполненной работы:

20мая 2016 года

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	
<i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду; энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</i>	Значительные резервы низкопотенциального тепла предполагают возможность его использования для целей теплоснабжения. Использование теплонасосных установок в системах теплоснабжения позволяет существенно сократить затраты высокопотенциального тепла. Это обеспечивает положительный не только энергетический, но и экологический эффект.

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Изучение существующих систем отпуска теплоты; 2. Анализ режимов потребления тепла различными потребителями; 3. Изучение и анализ особенностей работы теплонасосных установок различного типа; 4. Обоснование типа теплонасосных установок для использования в системах теплоснабжения.
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент	Фигурко А. А., доцент кафедры менеджмента
Социальная ответственность	Василевский М.В., доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках: Введение. Тепловые насосы в системах теплоснабжения. Парокомпрессионные теплонасосные установки. Источники низкопотенциального тепла для тепловых насосов. Заключение

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	28 декабря 2015 года
-------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АТЭС	Беспалов В.И	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4Б	Насырова М.Т.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ4Б	Насыровой Малике Тимуровне

Институт	Энергетический	Кафедра	Атомные и тепловые электростанции
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Теплоэнергетика и теплотехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

<i>5. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Месячный оклад для научного руководителя ВКР, имеющего должность доцента составляет 27 500 рублей, доплата к заработной плате 1900 рублей. Месячный оклад инженера 9-го разряда составляет 14500 рублей.</i>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Планирование этапов и работ по выполнению ВКР</i>	<i>Составление перечня этапов и работ по выполнению ВКР, провести распределение исполнителей по видам работ.</i>
<i>2. Смета затрат на выполнение ВКР</i>	<i>Расчет материальных затрат; амортизационных отчислений; заработных плат научного руководителя и инженера 9-го разряда, определить фонд заработной платы; затрат на социальные отчисления, прочие расходы и накладные расходы. Определение затрат на выполнение ВКР производится путем составления калькуляции по отдельным статьям затрат всех видов необходимых ресурсов.</i>
<i>3. Определение ресурсной и экономической эффективности</i>	<i>Определение годовой экономии условного топлива при использовании ТНУ для утилизации бросового тепла</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

<ol style="list-style-type: none"> 1. Диаграмма Исикавы 2. График проведения исследования 3. Бюджет НИИ 4. Оценка ресурсной и экономической эффективности НИИ 	
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фигурко А. А.	К.Э.Н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4Б	Насырова Малика Тимуровна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 5БМ4Б	ФИО Насыровой Малике Тимуровне
-----------------	-----------------------------------

Институт	ЭНИН	Кафедра	АТЭС
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Теплоэнергетика и теплотехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

Характеристика объекта исследования и области его применения	<p>Тепловыми насосами называют установки, предназначенные для повышения потенциала теплоты с низкого температурного уровня на более высокий на основе обратного термодинамического цикла за счёт расхода электрической или другой высокопотенциальной энергии.</p> <p>Воздействие на окружающую среду тепловых насосов необходимо рассматривать с учетом всех факторов, связанных с извлечением тепла, использованием тепловых насосов и другого вспомогательного оборудования совместно с энергией.</p> <p>Большая часть работы выполняется за компьютером, поэтому рабочим местом является аудитория с компьютерами - 101-я аудитория четвертого учебного корпуса ТПУ.</p>
--------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность	<ul style="list-style-type: none"> - Анализ вредных и опасных факторов при разработке проектируемого решения; - разработка мероприятий по снижению выявленных воздействий
2. Экологическая безопасность	<ul style="list-style-type: none"> - Анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); - разработать решения по обеспечению экологической безопасности.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	<ul style="list-style-type: none"> - Перечень возможных ЧС при эксплуатации проектируемого решения; - выбор наиболее типичной ЧС и разработка мер по ее предупреждению; - разработка действий в результате возникшей ЧС.
4. Организационные вопросы обеспечения безопасности	<ul style="list-style-type: none"> - Рассмотреть 3 уровня социальной ответственности предприятия.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
------------------------------------------------------	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ	Василевский Михаил Викторович	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4Б	Насырова Малика Тимуровна		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 88 страниц, 12 рисунков, 11 таблиц, 35 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: система теплоснабжение; теплонасосная установка, холодильный термодинамический цикл; низкопотенциальное тепло; коэффициент преобразования теплоты;

Объектом исследования являются теплонасосные установки для теплоснабжения жилых и общественных зданий.

Цель данной магистерской диссертации заключается в теоретическом анализе возможности использования теплонасосных установок в системах теплоснабжения.

В процессе исследования проводились исследования существующих систем теплоснабжения, использования теплонасосных насосов в централизованном и децентрализованном теплоснабжении, эффективности парокомпрессионной теплонасосной установки.

В результате исследования установлено, что использование теплонасосные установки наиболее эффективно для индивидуального теплоснабжения; разработана математическая модель парокомпрессионного теплового насоса, на основе которой проводились вариативные расчеты принципиальной схемы теплового насоса. Установлено, что с увеличением температуры источника низкопотенциального источника значение коэффициента преобразования теплоты увеличивается.

Область применения: системы теплоснабжения в целях отопления и кондиционирования помещений, горячего водоснабжения.

Abstract

Master's dissertation consists of 88 pages, 12 figures, 11 tables, 35 sources, 1 application.

Key words: heat supply system, heat pump unit, refrigeration thermodynamic cycle, coefficient of performance (COP), low potential heat.

The object of the research is heat pumps for the heating of residential and public buildings.

The purpose of this master's dissertation is a theoretical analysis of the possibility of using heat pump unit in district heat supply system.

The study carried out studies of existing heat supply system, the use of heat pumps in the centralized and decentralized heat supply, the efficiency of the vapor compression heat pump unit.

The study found that the use of heat pumps is most effective for the individual heating; developed mathematical model of vapor compression heat pump, which is carried out on the basis of divergent calculations of the concept of the heat pump. It was found that an increase in low-potential power source temperature heat conversion efficiency increases.

Heat pumps units used in heating systems for heating and air-conditioning buildings, hot water.

Список обозначений и сокращений

ГВС – горячее водоснабжение

ЗК – зона конденсации

К – компрессор

КПД – коэффициент полезного действия

НПТ – низкопотенциальное тепло

ПТНУ – парокompрессионная теплонасосная установка

Система ОВК – система отопления, вентиляции и кондиционирования

ТН – тепловой насос

ТНУ – теплонасосная установка

φ_T – теоретический коэффициент преобразования теплоты

φ_δ – действительный коэффициент преобразования теплоты

h – энтальпия, кДж/кг

l – внешняя работа, Вт

$l_{сж}$ – работа сжатия, Вт

l_p – работа расширения, Вт

p – давление, МПа

T – температура, °С

s – энтропия, кДж/(кг·К)

q – тепловой поток, Вт

Δt – температурный напор

Содержание

Введение	12
Литературный обзор	15
1 Современное состояние теплоснабжения в России	19
1.1 Централизованные и децентрализованные системы теплоснабжения	21
1.2 Режимы потребления тепла различными потребителями	23
2 Тепловые насосы в системах теплоснабжения	29
2.1 Классификация теплонасосных установок	31
2.1.1 Парокомпрессионные теплонасосные установки	31
2.1.2 Воздушно-компрессионные теплонасосные установки	35
2.1.3 Абсорбционные теплонасосные установки	37
2.2 Источники низкопотенциального тепла для тепловых насосов	39
2.3 Исследование эффективности работы ПТНУ	44
2.3.1 Методика расчета термодинамического цикла парокомпрессионной теплонасосной установки с переохладителем для отопления и ГВС	45
2.3.2 Результаты расчета парокомпрессионной теплонасосной установки с переохладителем и их анализ	51
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	56
3.1 Диаграмма Исикавы	56
3.2 Планирование этапов и работ по выполнению ВКР	57
3.3 Смета на выполнение магистерской диссертации	59
3.3.1 Материальные затраты	59
3.3.2 Амортизация основных фондов и нематериальных активов	61
3.3.3 Затраты на оплату труда	61
3.3.4 Затраты на социальные отчисления	63
3.3.5 Затраты на прочие расходы	63
3.3.6 Накладные затраты	64
3.3.7 Составление сметы затрат на выполнение ВКР	64
3.4 Техничко-экономическая оценка парокомпрессионного теплового насоса	65
3.5 Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	66
4 Социальная ответственность	67
4.1 Производственная безопасность	70
4.1.1. Анализ вредных производственных факторов, которые могут возникнуть при эксплуатации объекта исследования	69
4.1.2. Анализ опасных производственных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследования	73
4.2 Экологическая безопасность	79
4.2.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду	79
4.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	80
4.4 Законодательное регулирование проектных решений	81
4.5 Выводы по разделу «Социальная ответственность»	82
Заключение	84
Список используемых источников	86
Приложение 1	90

Введение

Актуальность темы магистерской диссертации определена политикой России в области энергетики, основные положения которой изложены в документе стратегического планирования «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года». Основной целью государственной политики в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности является снижение потребления традиционных источников энергии. Таким образом, «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» ставит следующие задачи:

1. максимальное использование возможностей нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в потреблении первичных топливно-энергетических ресурсов;
2. формирование малой и децентрализованной энергетики;
3. снижение негативного воздействия энергетики на окружающую среду с помощью усовершенствованных технологий;
4. модернизацию и развитие систем децентрализованного теплоснабжения с применением высокоэффективных установок, в том числе теплонасосных.

Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов является основой стратегического развития теплоснабжения в Российской Федерации. Безусловно, Россия располагает крупнейшими в мире запасами органических топлив, большими запасами ядерного топлива, а также огромным гидроэнергетическим потенциалом. Оценка энергетического потенциала России в первичных энергоресурсах такова [1]:

Уголь	2000 млрд. т у.т (85,6%)
Нефть	20 млрд. т у.т (0,85%)
Газ	60 млрд. т у.т (2,5%)
Ядерное топливо	200 млрд. т у.т (8,6%)
Торф	50 млрд. (2,14%)

Гидроэнергия	0,8 млрд. т у.т (57%)
Энергия ветра	0,25 млрд. т у.т (17,8%)
Солнечная энергия	0,1 млрд. т у.т (7,3%)
Другое	0,25 млрд. т у.т (17,9%)

На период с 2015 года по 2035 год прогнозируется рост потребления первичной энергии на 17%, а увеличение спроса на тепловую и электрическую энергию – на 36-40%, отпуск тепловой энергии централизованными системами теплоснабжения увеличится на 2-6 % (до 1325-1380 млн Гкал).

Исходя из приведенных выше данных, можно сделать вывод, что срок возможного запаса первичных энергоресурсов составляет около 800 лет. Что касается, легкодоступных энергоресурсов (газ, нефть) их запасы рассчитаны на 60-70 лет.

Увеличение численности населения, постоянно растущие города, развитие инфраструктуры и промышленности приводит к увеличению энергопотребления, и как следствие, к истощению традиционных энергоресурсов; экспортная составляющая производимых энергоресурсов – более 400 млн т у. т./год, т. е. более 30 % от всего объема производства. А всего 70 % экспорта в России составляют природные ресурсы. Кроме того, экологические последствия использования первичных энергоресурсов, приводят к значительному интересу к энергосберегающим технологиям, использующих нетрадиционные и возобновляемые источники энергии практически во всех развитых странах мира.

Обеспечения тепловых нужд населения и промышленности осуществляется в основном централизованными системами. Согласно сведениям, приведенным в источнике [2], система теплоснабжения организована из 50 тыс. локальных систем теплоснабжения. Основными источниками теплоснабжения являются теплоэнергоцентраль и котельные, использующие в качестве первичного источника энергии традиционное топливо. Однако, энергетическая стратегия России возлагает большие

перспективы на использование нетрадиционных и возобновляемых источников энергии для нужд тепло- и электроснабжения.

Основные преимущества систем теплоснабжения с нетрадиционными источниками энергии связаны с сокращением затрат энергии в системах жизнеобеспечения зданий и сооружений, автономность систем жизнеобеспечения и их экологичность.

Безусловно, этим и объясняется интерес теплоснабжающих предприятий к теплонасосным установкам. Использование теплонасосных установок является одним из наиболее перспективных направлений энергосберегающих и экологически чистых технологий.

Согласно сведениям министерства энергетики Российской Федерации, применение теплового насоса намного эффективнее по сравнению с котельной установки, работающей на природном газе. Использование теплонасосных установок целесообразно в системах автономного жизнеобеспечения жилых и производственных зданий и сооружений, для теплоснабжения индивидуального жилья, а также в сочетании с системой централизованного теплоснабжения.

Цель данной магистерской диссертации заключается в теоретическом анализе возможности использования теплонасосных установок в системах теплоснабжения.

Задачи исследования следующие:

1. Изучить существующие системы отпуска теплоты;
2. Проанализировать режимы потребления тепловой энергии различными потребителями;
3. Изучить и проанализировать особенности работы теплонасосных установок различного типа;
4. Провести оценку источников низкопотенциального тепла для теплонасосных установок
5. Оценить целесообразность применения теплонасосных установок в системах теплоснабжения.

Литературный обзор

Первую крупную парокомпрессионную теплонасосную установку создали в Швейцарии. В 1938 г. в Цюрихе для отопления использовали ТНУ мощностью 175 кВт, нагревающую воду до температуры 60 °С. Для покрытия пиковой нагрузки была предусмотрена система аккумулирования теплоты с электроподогревом. Установка была реверсивной, и в летний период ее использовали для охлаждения приточного воздуха.

Широкое практическое применение ТНУ началось после энергетического кризиса 1973 г. В странах Европы и Америки резко вырос выпуск тепловых насосов, которые нашли применение в системах ОВК общественных, промышленных и жилых зданий. Сейчас в мире эксплуатируется около 20 миллионов тепловых насосов, мощность которых находится в пределах 2 кВт-300 МВт.

В промышленных цехах, производственных помещениях, бытовых сооружениях, общественных и жилых зданиях системы ОВК обеспечивают поддержание условий микроклимата, в том числе путем удаления теплого увлажненного воздуха и подачи чистого нагретого. Удаляемый воздух является носителем НПТ для испарителя, а приточный нагревается в конденсаторе ТНУ [3].

Примером кондиционера, в котором нагрев и охлаждение воздуха осуществляются с использованием ТНУ, служит блочная установка. Блок нагрева-охлаждения имеет два независимых ТН, предназначенных для обработки наружного воздуха, поступающего в помещение.

В качестве источников НПТ служит удаляемый воздух. Кондиционер пригоден для круглогодичной работы. В отопительный период ТНУ используются для нагрева приточного воздуха, а в теплое время они работают на охлаждение приточного воздуха. Коэффициент преобразования ТНУ $\varphi = 3,5 - 4,0$ [4].

Воздушно-воздушные ТН, используемые в данном кондиционере, имеют ряд недостатков. Первый заключается в необходимости иметь в испарителе и конденсаторе большие поверхности теплообмена со стороны воздуха. Второй связан с уменьшением характеристик ТН, особенно коэффициента преобразования, по мере увеличения разности температур испарителя и конденсатора. При снижении температуры наружного воздуха уменьшается тепловая мощность насоса и возникает необходимость поддерживать ее хотя бы постоянной, что достаточно сложно [5].

Существуют схемы ТНУ с увлажнением удаляемого воздуха. Влажный воздух из технологической установки или помещения поступает в оросительную камеру, где происходит адиабатическое увлажнение, и одновременное очищение от пыли и частично от вредных газов. Затем в испарителе при отборе теплоты происходит одновременное охлаждение и осушение воздуха, после чего он поступает в конденсатор, где и нагревается. Коэффициент преобразования ТН в кондиционере равен 2,5-3,5.

На Ново-Курьяновской теплонасосной станции для горячего водоснабжения разработана многоступенчатая схема теплового насоса с параллельным и последовательным включением ступеней. В качестве источников НПТ служит сточная вода, сбрасываемая в Москву-реку [6].

Открытая система теплоснабжения более рациональна, так как позволяет использовать теплоту от охлаждения фреона после конденсатора ТН на нагрев воды в теплообменнике. Вследствие этого, коэффициент преобразования в открытых системах больше, чем в закрытых.

Обзор литературных источников, посвященных тематике исследования, показал, что широкое распространение тепловые насосы получили в развитых странах Европы, США, Японии. Серьезное отставание России по использованию ТНУ в системах теплоснабжения связано с суровыми природно-климатическими условиями. Поэтому многие публикации посвящены исследованиям параметров и характеристик оптимального режима

использования теплового насоса в Сибири и районах, приравненных к условиям Крайнего Севера [7-9].

Большое внимание уделяется вопросу внедрения тепловых насосов в существующие централизованные системы теплоснабжения [9-12]. В этом случае имеется два пути использования низкопотенциального тепла от ТЭЦ, ресурс которого значителен и увеличивается в неотапительный период. Во-первых, возможно использование технической воды в качестве низкопотенциального источника теплоты. Во-вторых, если тепловой насос установлен непосредственно вблизи потребителя, в качестве низкопотенциального источника теплоты возможно использование обратной сетевой воды. При этом температурный уровень технической и сетевой воды достаточно высок, что является предпосылкой для эффективной работы ТНУ.

Существуют попытки внедрения тепловых насосов в состав парогазовых установок с котлом-утилизатором [12-15]. При этом предполагается использовать ТНУ вместо градирни, что позволит утилизировать бросовое низкопотенциальное тепло.

Большое количество работ отечественных авторов публикаций посвящены вопросу термодинамической эффективности и технико-экономического обоснования использования теплонасосных установок в системах теплоснабжения.

Авторы публикаций прогнозируют, что в развитых странах в 75% всех систем теплоснабжения к 2020 году будут использоваться теплонасосные установки [1,15-21]. Тепловая мощность действующих теплонасосных установок в Европе и США оценивается в 250 ГВт с выработкой 1 млрд. Гкал тепла. В России же установленная тепловая мощность действующих ТНУ не превышает 65 МВт. В условиях политики энергосбережения и энергоэффективности в нашей стране имеется возможность устранить пробел в использовании тепловых насос для промышленного и гражданского теплоснабжения.

В России для работы теплонасосных установок можно использовать практически неограниченные природные ресурсы – низкопотенциальное тепло водных источников с температурой до 5°C. Однако в нашей стране реализованы только попытки доказать возможность использования ТНУ в теплоснабжении. Данные попытки использования отдельных схем ТНУ не позволяют сформировать ряд решений по качественной эксплуатации установок с целью получения высокой эффективности в условиях сурового климата районов России.

1 Современное состояние теплоснабжения в России

Надежное и своевременное обеспечение потребителей тепловой энергией является основной энергетической задачей. При этом общественно-экономическая важность теплоснабжения оценивается господствующим потреблением тепловой энергии на отопление и горячее водоснабжение зданий и сооружений для социально-бытовых нужд населения в различных природно-климатических условиях регионов России.

Большая протяженность России характеризуется разнообразием климатических условий, в связи с этим, требуется повсеместное отопление зданий и сооружений жилого, административного и производственного комплексов. При этом ключевым моментом в системах теплоснабжения России является многообразие температурных режимов в отличие от систем теплоснабжения зарубежных стран.

Диапазон изменения средней температуры самой холодной пятидневки года, которая является определяющим фактором мощности теплоснабжающего оборудования, находится в пределах от -14°C (Республика Дагестан) до -54°C (Якутия). Продолжительность отопительного периода, влияющая на параметры работы теплоснабжающих систем, находится в диапазоне от 5 месяцев (Республика Дагестан) до 10 месяцев в году (Республика Коми). Изменение средней температуры отопительного периода варьируется от $+2,7^{\circ}\text{C}$ (Дагестан) до $-20,6^{\circ}\text{C}$ (Якутия). Таким образом, данные природно-климатические условия определяют необходимость таких систем теплоснабжения, которые надежно обеспечат тепловой энергией население России в каждом конкретном случае.

Россия занимает лидирующие позиции по развитию теплофикационной структуры, протяженности тепловых трасс, объему производства тепла, расходу топлива на производство тепла. В таблице 1.1 представлены показатели масштабов теплового хозяйства России в количественных параметрах.

Таблица 1.1 – Тепловое хозяйство России

Централизованное теплоснабжение	
Предприятия теплоснабжения, тыс. ед.	19,5
Системы теплоснабжения, тыс. ед.	около 50
Абоненты предприятий теплоснабжения, млн. ед.	около 44
Источники теплоснабжения в системах ЦТ	
Электростанции, ед.	585
Котельные свыше 20 Гкал/час, ед.	3433
Протяженность тепловых сетей ЦТ, тыс. км	171
Ветхие и требующие замены, тыс. км	84,2 (49,1 %)
Источники теплоснабжения в системах ЦТ	
Источники теплоснабжения в системах ЦТ	
Котельные до 20 Гкал/час, тыс. ед.	69,7
Индивидуальные источники тепла, млн. ед.	свыше 18

Источник [1]

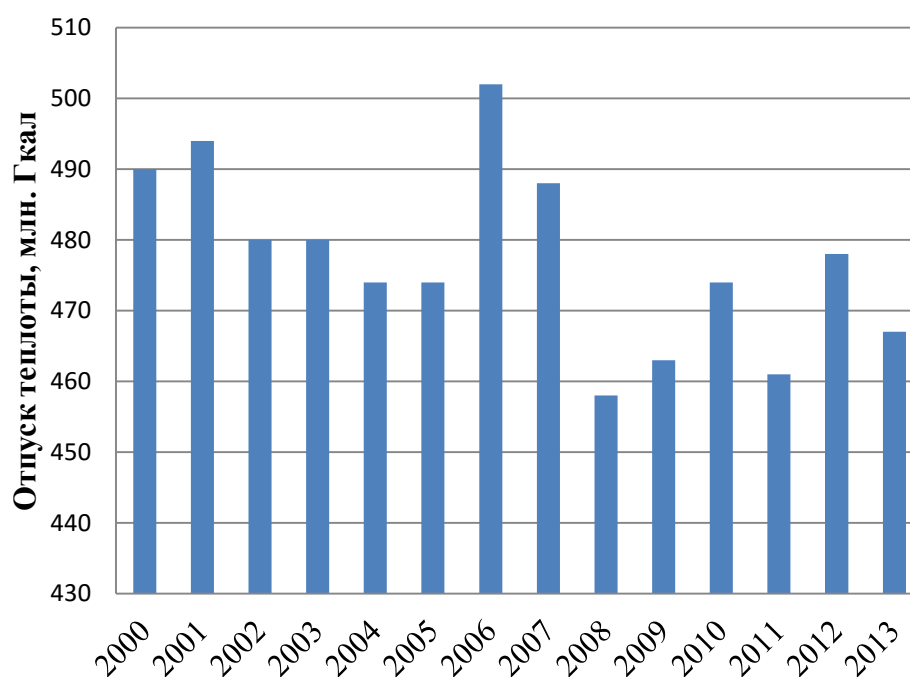


Рисунок 1.1 –Динамика отпуска тепловой энергии от ТЭЦ общего пользования, млн. Гкал (данные из доклада Минэнерго России)

Однако, в подавляющем большинстве случаев, существующие системы теплоснабжения спроектированы и построены ещё в советский период по стандартам и правилам, действовавшим в те времена. На сегодняшний день, в условиях сложившейся экономики, роста стоимости топлива и недостаточного

инвестирования системы теплоснабжения и сложившиеся не соответствуют современным требованиям эффективности, и требуют серьезной модернизации.

1.1 Централизованные и децентрализованные системы теплоснабжения

Система теплоснабжения – комплекс технического оборудования, систем и подсистем, которые обеспечивают подготовку, транспортировку и распределение теплоносителя по отдельным потребителям. Различают централизованные и децентрализованные системы теплоснабжения в зависимости от размещения источника производства тепловой энергии по отношению к потребителям.

В централизованном теплоснабжении ТЭЦ является основным поставщиком тепловой энергии, на ТЭЦ осуществляется одновременная выработка тепловой и электрической энергии, а также городские, районные, групповые и промышленные котельные.

В турбинах тепловых станций можно регулировать количество отбираемого пара. Пар из отбора передаёт свою энергию сетевой воде при конденсации в сетевых подогревателях, после этого сетевая вода поступает в тепловые пункты и пиковые водогрейные котельные. Затем по тепловым сетям тепловая энергия в виде горячей воды поступает в наши дома для отопления и горячего водоснабжения. Поэтому основной целью систем теплоснабжения является обеспечение потребителей необходимым количеством теплоносителя определенными параметрами (требуемой температуры, давления, расхода).

Передача теплоты от источников до теплоприемника может осуществляться практически без тепловой сети, так как децентрализованных системах источник они либо объединены в одном агрегате, либо размещены достаточно близко.

Децентрализованная система теплоснабжения может быть автономной и местной.

Автономные системы теплоснабжения характеризуются малой протяжённостью или даже полным отсутствием тепловых сетей от источника до потребителя.

Автономное теплоснабжение производится от маломощных источников теплоснабжения, индивидуальных квартирных теплоисточников.

Выделяют две группы автономного теплоснабжения:

- система в которой внутренние тепловые сети (отопление, вентиляция, система горячего водоснабжения) соединены с источником теплоснабжения, который соединён с приёмниками (нагревательный прибор, калорифер, водоразборная арматура);
- системы, в которых в одном агрегате объединены источник и нагревательные элементы (например, отопительная печь, теплогенератор);

Система, в которой теплоснабжение каждого здания производится от собственного источника, называется местной системой.

Основными источниками тепловой энергии являются теплоэнергоцентраль, городские районные электростанции, котельные, атомные станции. Система централизованного теплоснабжения включает в себя три основных звена: источник теплоснабжения, тепловые трассы и тепловые потребители.

Выделяют 4 группы централизованного теплоснабжения:

- «- групповое – теплоснабжение от одного источника группы зданий;
 - районное – теплоснабжение от одного источника групп зданий (района);
 - городское – теплоснабжение от одного источника нескольких районов;
 - межгородское – теплоснабжение от одного источника нескольких городов»
- [22] .

В системах централизованного теплоснабжения источников теплоснабжения располагаются в отдельно стоящих зданиях, а транспорт теплоты от них осуществляется по трубопроводам тепловых сетей. В большинстве централизованных систем теплоснабжения максимальная температура горячей воды принимается равной 150 °С.

Для упомянутых выше систем теплоснабжения характерны различные показатели качества, надежности работы и экономичности. Целесообразную систему теплоснабжения при строительстве новых городов выбирают на основании технико-экономических расчетов, главным критерием при этом является величина и концентрация тепловой нагрузки.

Величина и пространственная структура населённого пункта, плотность тепловых нагрузок и размещение абонентов, вид поставляемого топлива, а так же уровень социальных и санитарно-гигиенических требований влияет на решение по выбору типа системы теплоснабжения.

Системы теплоснабжения можно разделить по виду энергоносителя на паровые и водяные. Как правило, с целью обеспечения тепловой энергией жилищно-коммунальных объектов для отопления, горячего водоснабжения, кондиционирования и вентиляции помещений), а так же для того, чтобы снабдить промышленные предприятия горячей водой на технологические нужды используются водяные системы.

На промышленных предприятиях, в качестве энергоносителя в технологических процессах которых используется пар, а также для санитарно-технических нужд систем в пределах этих предприятий, используются паровые системы теплоснабжения.

1.2 Режимы потребления тепла различными потребителями

Под тепловым потребителем понимают использование теплоты для различных производственных и коммунально-бытовых целей. Промышленные предприятия в РФ, несмотря на спад промышленного производства, остаются крупнейшим потребителем топливно-энергетических ресурсов. Для обеспечения технологических потребностей на промышленных предприятиях используется, как правило, пар среднего и низкого давления и горячая вода.

Абонент централизованной системы теплоснабжения - это потребитель, получающий тепло от этой системы, а тепло, которое расходует абонент, это тепловая нагрузка источника тепла.

Три характерные группы абонентов можно различить в зависимости от соотношений и отдельного вида теплоснабжения: жилые здания, общественные здания, промышленные здания и сооружения. В группу промышленных зданий и сооружений можно также отнести здания сельскохозяйственного назначения.

Круглогодичный расход тепла на ГВС характерен для жилых зданий, а сезонными расходами тепла является отопление и вентиляция. Свежий воздух в жилые здания поступает через форточки окон и неплотности, так как в них не устраивают приточную вентиляцию.

В случае проникновения свежего воздуха через форточки или неплотности нагрев воздуха производится системой отопления.

Сезонный расход тепла на отопительную нагрузку, на вентиляционную нагрузку и кондиционирование имеет основное значение для большого количества общественных зданий и сооружений.

Вид основного производства определяет количественное соотношение между видами теплоснабжения для промышленных и сельскохозяйственных абонентов.

Не постоянной является потребность абонентов в тепловой энергии. В зависимости температуры окружающей среды, меняются расходы теплоты на отопительную нагрузку, вентиляционную нагрузку и нагрузку кондиционирования, а от потребления ГВС населением зависит нагрузка на горячее водоснабжение. В технологических установках нагрузка на горячее водоснабжение зависит от режимов работы оборудования использующего тепло. Поэтому можно выделить две основные группы теплоснабжения (тепловой нагрузки) – это сезонная и круглогодичная нагрузки.

Температура наружного воздуха, направление и скорость ветра, влажность воздуха и т.д. главным образом влияет на изменение сезонных нагрузок.

Температура наружного воздуха играет одну из важнейших ролей. Отопление, вентиляция и кондиционирование относятся к сезонным тепловым

нагрузкам. Данные виды нагрузки не имеют круглогодичного характера. К зимним тепловым нагрузкам относятся нагрузки на отопление и вентиляцию. Применение кондиционирования воздуха летом требует создания искусственного холода, если он вырабатывается методами абсорбции или эжекции, то на ТЭЦ присутствует дополнительная летняя тепловая нагрузка, данная нагрузка повышает эффективность теплофикации.

Горячее водоснабжение и технологические нагрузки относятся к круглогодичным нагрузкам. Переработка сельскохозяйственного сырья относится к некоторым отраслям промышленности, которые являются исключением. Потребление теплоты в целях горячего водоснабжения в течение года незначительно изменяется, но при этом имеет большую неравномерность по часам суток (рисунок 1.2). В летний период по сравнению с зимним происходит уменьшение на 30-35% расхода теплоты в системы горячего водоснабжения. Объясняется это тем, что в зимний период температура воды в холодном водопроводе примерно на 10-12 °С ниже, чем летом. В выходные дни снижается расход горячей воды, так как многие выезжают в загородные зоны.

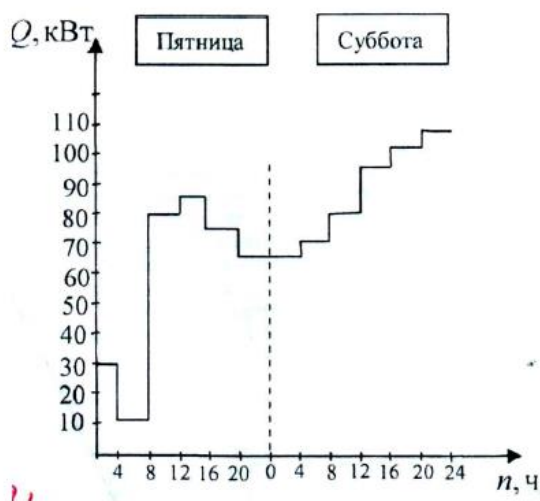


Рисунок 1.2 – Суточный график расхода теплоты на ГВС для жилого района [22]

Для рационального использования оборудования, для определения расходов топлива, проведения технико-экономических расчётов крайне важно исследование в течении года изменения тепловых нагрузок.

Годовой график (рисунок 1.3) строится на основе часовых графиков расхода тепла на отопление, вентиляцию и ГВС.

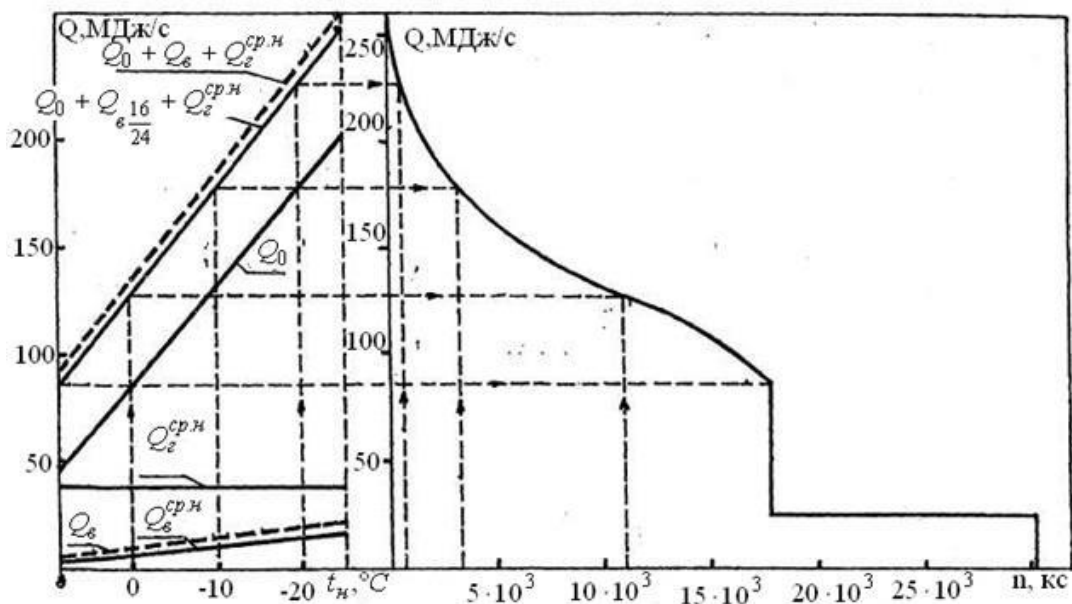


Рисунок 1.3 – Часовой и годовой графики тепловой нагрузки [22]

Производятся наблюдения в течение недели за разными режимами расходования теплоты. Системы отопления и ГВС жилых помещений расходуют тепло в течение всей недели. В течение недели может наблюдаться равномерный или неравномерный расход тепла. На предприятиях можно считать, что расход равномерный, если в течение всех дней недели оно работало без остановок и при относительно постоянной температуре наружного воздуха.

Как описывалось выше принято считать, что расход тепла для систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, зависит от температуры наружного воздуха, вследствие этого является неравномерным. Под неравномерностью расходования теплоты на ГВС понимают разнообразие привычек и потребностей абонентов горячего водоснабжения. Разная нагрузка смен, разное количество рабочих смен в сутки, неритмичная работа,

цикличность производства, с этими причинами связана неравномерность расхода тепла на технологию. Существуют потребители, которые расходуют теплоту только в рабочие дни недели, это характерно для промышленных предприятий, расходующих теплоту на технологические процессы, вентиляцию, кондиционирование воздуха и горячее водоснабжение. В остальные два нерабочих дня предприятие потребляет небольшое количество тепла, которое расходуется на поддержание различных систем в рабочем состоянии.

Для защиты паро- и конденсатопроводов от замерзания в зимние нерабочие дни выполняют сброс небольшого количества технологического пара в отопительную систему. В системах вентиляции и кондиционирования так же в нерабочие дни предохраняют от замерзания калориферы, происходит это путём легкого обогрева калорифера подводом тепла по байпасу небольшого диаметра. Метод предотвращения от замерзания калорифера обусловлен тем, что отсутствует специальная система защиты. Промышленные предприятия, технологии которых мало зависят от температуры наружного воздуха, характеризуются относительно равномерным расходом тепловой энергии в течение суток. К таким предприятиям можно отнести: фабрики по производству бумаги, сахара, нефте- и деревоперерабатывающие заводы, предприятия производящие синтетический каучук, производство деревянных домов из клееного бруса.

К потребителям с неравномерным расходом теплоты в течение суток можно отнести ГВС промышленных предприятий и жилых домов.

Неравномерное потребление горячей воды в жилых домах вызвано режимами работы и отдыхом абонентов тепла в течение суток. Изменением суточного режима расхода горячей воды потребителями, может послужить: увеличение или уменьшение длительности рабочего дня, переход во вторую и третью смену работы, перевод на другое время начала и завершения работы,

В подавляющем большинстве случаев двухтрубные водяные тепловые сети в городах предназначены подавать теплоноситель одновременно как для

систем отопления и вентиляции, так и для систем горячего водоснабжения. Чтобы удовлетворить нагрузку горячего водоснабжения необходимо поддерживать температуру в подающей магистрали не ниже 80°C в закрытых системах теплоснабжения и 70°C в открытых системах. Для этого отопительный график спрямляется на уровне указанных температур и становится отопительно-бытовым (рисунок 1.4).

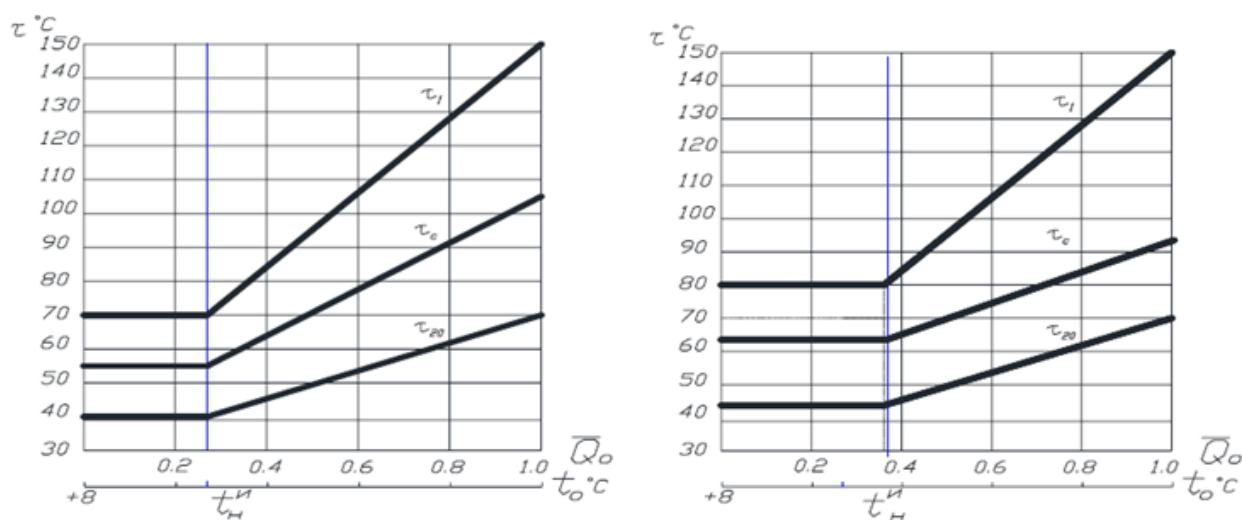


Рисунок 1.4 – Температурные графики тепловых сетей [22]

Расчеты системы отопления ведутся для любого температурного графика, например, для общепринятых графиков крупных теплопередающих организаций ($150/70$, $130/70$, $115/70$) и местных (домовых) тепловых пунктов ($105/70$, $95/70$). Такие температуры подающей и обратной магистралей приняты ещё в советское время по климатическим условиям, расходам теплоносителя в тепловых сетях и соответствующими диаметрами трубопроводов. Конечно, нет возможности перевести существующие системы отопления на более низкий температурный график. Однако, современные энергосберегающие технологии и оборудование делают, такие температурные графики не актуальными. Современные энергосберегающее оборудование и материалы, позволяют строить новые районы городов, теплоснабжение которых может осуществляться при более низких температурных графиках. При этом имеется возможность установить локальный источник теплоснабжения с тепловым насосом.

2 Тепловые насосы в системах теплоснабжения

Тепловыми насосами называют установки, предназначенные для повышения потенциала теплоты с низкого температурного уровня на более высокий на основе обратного термодинамического цикла за счёт расхода электрической или другой высокопотенциальной энергии. Тепловой насос и вспомогательное оборудование, такое как гидравлические машины, трубопроводы для подвода и отвода теплоносителей, системы энергопитания, контроля и регулирования, составляют теплонасосную установку.

С помощью теплового насоса можно отбирать теплоту окружающей среды, низкопотенциальных источников вторичных энергоресурсов, например от бросовой воды с температурой $5...15\text{ }^{\circ}\text{C}$, и передавать ее среде с более высокой температурой, например теплоносителю системы отопления.

Идеальным циклом теплового насоса, как и холодильной установки, является обратный цикл Карно, который изображен на рисунке 2.1. Обратимый изотермический процесс передачи теплоты q_1 от внешнего источника происходит на части цикла 4-1 при температуре T_1 , а изотермический отвод теплоты q_2 - при температуре T_2 . Сжатие осуществляется адиабатически при постоянной энтропии $s_1=const$, а расширение - при $s_4 = const$. Работа в процессе 1-2 подводится от внешнего источника.

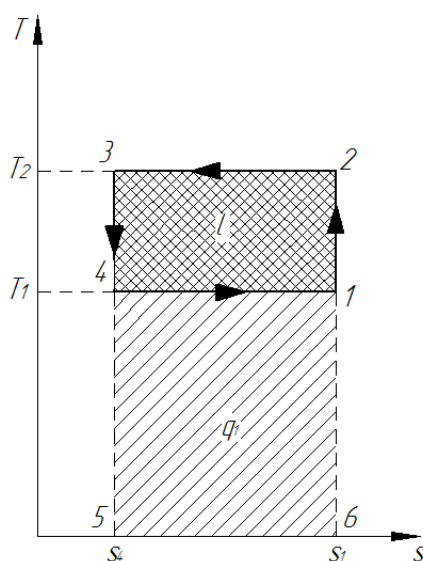


Рисунок 2.1 – Идеальный цикл теплового насоса

Подводимый в процессе 4-1 удельный тепловой поток

$$q_1 = T_1 \cdot (s_1 - s_4) \quad (2.1)$$

Графически он изображается в T - s -координатах площадкой 1456 под линией 4-1 процесса. Удельный тепловой поток, отводит от рабочего тела,

$$q_2 = T_2 \cdot (s_1 - s_4) \quad (2.2)$$

Графически он изображается площадкой 2356 под линией 2-3 процесса. Затраченная в цикле удельная работа (l), определяемая как разность работ сжатия ($l_{сж}$) и расширения (l_p), в тепловых единицах равна

$$l = l_{сж} - l_p = (T_2 - T_1) \cdot \Delta s = q_2 - q_1 \quad (2.3)$$

Графически она изображается площадкой 1234.

Используя выражение (2.3), отводимый удельный тепловой поток можно определить так:

$$q_2 = q_1 + l \quad (2.4)$$

Эта величина показывает количество полезной отводимой цикла, которая равна сумме теплоты, эквивалентной работе в процессе 1-2, и теплоты q_1 .

Энергетическая эффективность идеального теплового работающего по обратному циклу Карно, оценивается коэффициентом преобразования, или, как его иногда называют, отопительным коэффициентом:

$$\begin{aligned} \varphi_T &= q_2 / l \\ \varphi_T &= \frac{q_1 + l}{l} = \frac{q_1}{l} + 1 = 1 - \frac{T_1}{T_2 - T_1} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Из формулы (2.5) следует, что коэффициент преобразования всегда больше единицы. Например если осуществляется идеальный цикл теплового насоса температура T_1 среды, отдающей количество теплоты q_1 , равна 278К а температура помещения нагреваемого за счет этой теплоты равна $T_2=298K$, то

$$\varphi_T = \frac{298}{298 - 278} = 14,9$$

В отапливаемое помещение «должно быть» подано количество теплоты, в 14,9 раза превышающее работу, затраченную в цикле. Это же хорошо видно

из сопоставления в T - s -координатах площадок, графически определяющих величины q_2 и l (рисунок 2.1).

Идеальный теплонасосный цикл имеет самый высокий коэффициент преобразования, и все практические циклы реализуют стремление максимально приблизиться к его значению. Коэффициент преобразования зависит от разности температур $\Delta T = T_2 - T_1$. Чем она меньше, тем выше φ_T .

Классификация тепловых насосов осуществляется по нескольким основным признакам.

По циклам работы тепловые насосы подразделяются на парокompрессионные, воздушно-компрессионные, абсорбционные и термоэлектрические.

По принципу взаимодействия рабочих тел тепловые насосы можно подразделить на две группы. К первой относятся установки открытого цикла, в которых рабочее тело забирается и возвращается после использования во внешнюю среду, ко второй – установки, в которых рабочее тело циркулирует по замкнутому контуру.

По виду потребляемой внешней работы тепловые насосы подразделяются на работающие с приводом от электродвигателя, двигателя внутреннего сгорания, газовой турбины и работающие на вторичных энергоресурсах.

2.1 Классификация теплонасосных установок

2.1.1 Парокompрессионные теплонасосные установки

Работа парокompрессионных тепловых насосов основана на принципе последовательного осуществления процессов механического сжатия и расширения рабочего тела. С целью организации подвода и отвода теплоты при условиях, близких к изотермическим, в тепловых насосах используются рабочие тела, изменяющие агрегатное состояние. В этих случаях в ТН осуществляется цикл, имеющий сходство с обратным циклом Ренкина. Такие

насосы, работающие с изменением агрегатного состояния рабочего тела, называют парокompрессионными.

На рисунке 2.2 представлена принципиальная схема установки, работающей по парокompрессионному циклу. В качестве внешнего источника энергии, приводящего в действие компрессор, в большинстве случаев используется электрическая энергия. Замкнутая герметичная система теплового насоса заполнена рабочим телом, в качестве которого в диапазоне температур $0...80\text{ }^{\circ}\text{C}$ наиболее применимы хладоны R12, R142, RC318, R114 и аммиак.

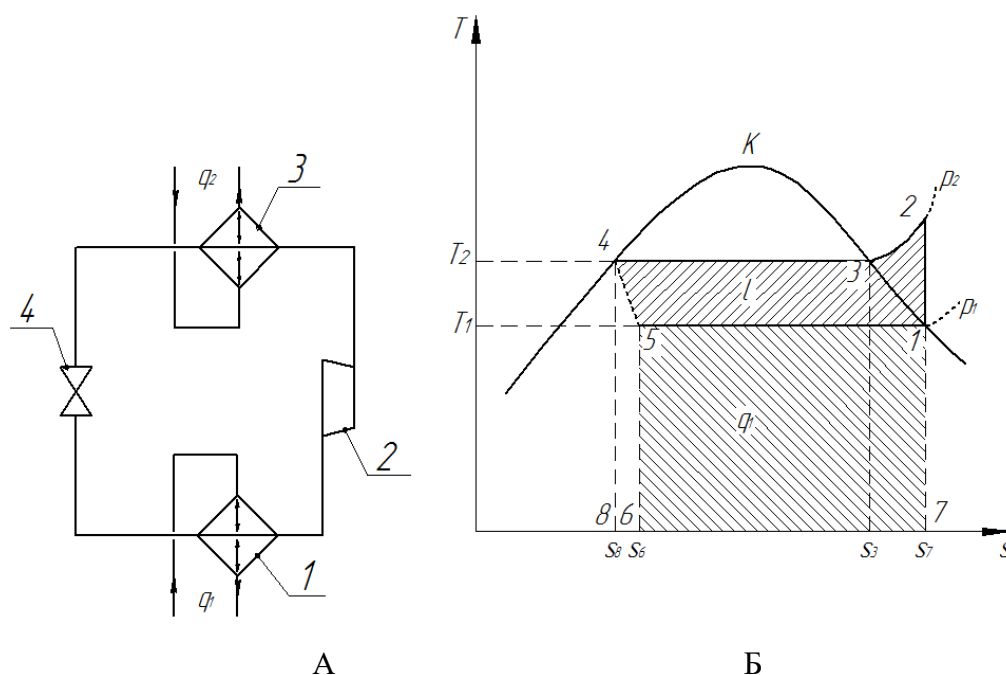


Рисунок 2.2 – Идеальный цикл парокompрессионного теплового насоса

А – принципиальная схема; Б – круговой цикл на T - s -диаграмме;

1 – испаритель; 2 – компрессор; 3 – конденсатор; 4 – дроссельный клапан.

В цикле работы теплового насоса рабочее тело претерпевает следующие изменения состояния. От источников с низкой температурой в испаритель подводится теплота, которая в изотермическом процессе при давлении p_1 и T_1 обеспечивает фазовый переход рабочего тела из капельного в парообразное состояние. В T - s -диаграмме этот процесс изображается линией 5-1, а удельный тепловой поток графически определяется площадкой 65176 под линией процесса.

Из испарителя пар поступает в компрессор, где сжимается от давления p_1 до давления p_2 с повышением температуры от T_1 до T_2 . Этот процесс изображается адиабатой 1-2 и осуществляется с затратой удельной внешней работы l , определяемой площадкой 84321568.

Перегретый пар с давлением p_2 по циркуляционному трубопроводу поступает в конденсатор, где в изобарном процессе охлаждается и конденсируется с понижением температуры до T_2 и выделением удельной теплоты конденсации q_2 . Теплота конденсации поступает потребителю. Процесс изображается линией 2-3-4, а удельный поток теплоты, отводимой от конденсатора, - площадкой 723481.

В капельном состоянии рабочее вещество проходит через дроссельное устройство, где в необратимом процессе его давление понижается до p_1 . Соответственно давлению снижается температура насыщения до T_1 . На T - S диаграмме этот процесс показан штриховой линией 4-5.

Эффективность работы парокompрессионного теплового насоса определяется коэффициентом преобразования

$$\varphi_T = \frac{q_1 + l}{l} = \frac{h_2 - h_5}{h_2 - h_1} \quad (2.6)$$

где h_1 , h_2 , h_5 – значения энтальпии, снижаемые непосредственно с фазовой диаграммы рабочего тела, кДж/кг.

Рассмотренный цикл существенно идеализирован. Замена расширительной машины (детандера) дроссельным устройством, ограничения, связанные с необходимостью сжатия только сухого пара, не позволяют учитывать необратимость остальных процессов и отличный от 100 % КПД элементов установки. Так, потери при сжатии связаны с трением в компрессоре и недостаточным охлаждением рабочего тела, не позволяющими компенсировать увеличение энтропии. Потери давления в конденсаторе и испарителе при прохождении через них потока рабочего тела требуют его восстановления, что связано с дополнительной работой компрессора. Существенно необратимым является и процесс дросселирования.

Необратимость процессов, происходящих в тепловых насосов в результате тепловых, механических и электрических потерь, существенно снижает реальный коэффициент преобразования. В действительности он в несколько раз меньше идеального. Для предварительной оценки энергетических показателей ТН можно воспользоваться следующей эмпирической формулой:

$$\varphi_D = \varphi_T \cdot \eta_e \quad (2.7)$$

где φ_D - действительный коэффициент преобразования; $\eta_e = f(\eta_i, \eta_m, \eta_{эл})$ - коэффициент, учитывающий необратимость потери; $\eta_i, \eta_m, \eta_{эл}$ - соответственно индикаторный, механический, электрический КПД.

Для ориентировочного расчета тепловых насосов при использовании крупных турбокомпрессоров значение коэффициента η_e , учитывающего необратимые потери, может быть выбрано в зависимости от тепловой мощности теплового насоса.

Для поршневых компрессоров коэффициент преобразования φ_D следует выбирать в зависимости от температуры кипения и конденсации рабочего вещества.

Одноступенчатый цикл работы парокompрессионного теплонасоса становится менее эффективным с ростом отношения давлений p_2/p_1 из-за увеличения потерь в компрессоре. При $p_2/p_1 > 7$ рекомендуется переходить на двухступенчатые и каскадные циклы.

В двухступенчатом тепловом насоса парообразное рабочее тело сжимается последовательно в двух компрессорах $K1$ и $K2$ с невысокими значениями отношения p_2/p_1 . Тепловой поток подводится к рабочему телу в испарителе первой (нижней) ступени, а отводится к нагреваемому теплоносителю сначала на участке конденсации первой ступени ТК1, затем на участке охлаждения перегретого пара рабочего тела, после чего - в конденсаторе второй ступени ТК2. Конденсат рабочего тела из второй ступени отводится через Д2 в зону конденсации ЗК. Разделение конденсаторов на

участки позволяет повышать температуру нагреваемого теплоносителя и снижать потери эксергии вследствие необратимости теплообмена. Дросселирование рабочего тела в обеих ступенях сопровождается меньшими суммарными потерями эксергии, чем в одноступенчатом тепловом насосе, работающем в том же температурном интервале. Эксергетические преимущества двухступенчатого теплового насоса определяются также снижением потерь эксергии в компрессорах.

2.1.2 Воздушно-компрессионные теплонасосные установки

Воздушно-компрессионные тепловые насосы основаны на классическом цикле Джоуля (иногда его называют циклом Брайтона), состоящем из двух изобар и двух адиабат (рисунок 2.3):

1-2 - адиабатное сжатие в компрессоре от давления p_1 и температуры T_1 , соответствующих требуемому уровню охлаждения до давления p_2 и температуры T_2 с расходом удельной внешней работы l_k ;

2-3 - изобарное охлаждение с отводом удельной теплоты q_2 и понижением температуры рабочего вещества с T_2 до T_3 ;

3-4 - адиабатное расширение в детандере, при котором давление газа снижается до p_1 , температура - до T_4 , а газ производит удельную внешнюю работу l_o ;

4-1 - изобарное нагревание с температуры T_4 до T_1 , с подводом удельной теплоты q_1 .

Общие затраты удельной работы на проведение процесса равны работе на привод компрессора за вычетом работы, возвращенной детандером:

$$l = l_k - l_o \quad (2.8)$$

Для сжатия и расширения газа используются, как правило, турбомашинны.

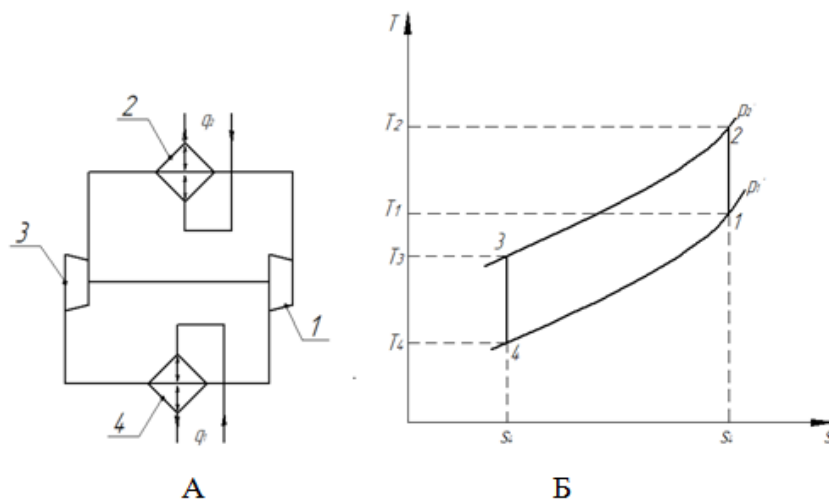


Рисунок 2.3 - Цикл (А) и принципиальная схема (Б) воздушно-компрессионного теплового насоса:

1 - компрессор; 2 - теплообменник-охладитель; 3 - детандер;
4 - теплообменник-нагреватель

Удельное количество теплоты q_2 , отданное в теплообменнике,

$$q_2 = C_p \cdot (T_2 - T_3) \quad (2.9)$$

а удельная затраченная работа

$$l = C_p \cdot [(T_2 - T_3) - (T_1 - T_4)] \quad (2.10)$$

Отсюда с учетом того, что для адиабатного процесса

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (2.11)$$

коэффициент преобразования цикла

$$\varphi_T = \frac{q_2}{l} = \frac{T_2 - T_3}{(T_2 - T_3) - (T_1 - T_4)} = \frac{1}{1 - T_1/T_2} = \frac{1}{1 - (p_1/p_2)^{\frac{k-1}{k}}} \quad (2.12)$$

Газовый цикл теплового насоса имеет существенный недостаток. Нагрев и охлаждение газа во всем интервале температур осуществляется в машинах – компрессоре и детандере. Это исключает возможность использования тепловых насосов и в больших интервалах температур, так как степень повышения давления p_2/p_1 будет слишком большой. В практических условиях работа теплового насоса будет сопровождаться большими потерями.

Рассматриваемый цикл применяется в основном для газотурбинных двигателей. При этом рабочее тело (воздух) в начале процесса забирается из атмосферы, а в конце выбрасывается в атмосферу. Теплонасосный цикл осуществляется следующим образом. Засасывание окружающего воздуха происходит перед компрессором (точка 1), нагрев при сжатии осуществляется по изоэнтропе 1-2, отбор полезной энергии - процесс 2-3, расширение в турбодетандере и выброс в атмосферу - процесс 3-4.

2.1.3 Абсорбционные теплонасосные установки

Абсорбционные тепловые насосы отличаются от компрессионных тем, что вместо механического компрессора процесс повышения давления рабочего тела осуществляется с помощью, так называемого термохимического компрессора. Его действия основано на использовании экзотермических процессов смешения и эндотермических процессов разделения. Остальные элементы ТН принципиально аналогичны.

Рабочими телами в абсорбционных ТН служат бинарные смеси, состоящие из рабочего агента и абсорбента (поглотителя), имеющих различные температуры насыщения и способность в процессе смешения повышать температуру смеси. Наиболее известны пары веществ вода - аммиак и вода - бромистый литий.

Отличительная особенность абсорбционных ТН в том, что в качестве подводимой внешней энергии используется тепловая энергия, менее ценная, чем электрическая или механическая.

В качестве примера рассмотрим принцип работы водоаммиачного абсорбционного ТН, схема которого представлена на рисунке 2.4.

Образующийся при разделении рабочего тела в генераторе (за счет подвода теплоты Q_1' при температуре $T_1=300K$ концентрированный пар аммиака низкого давления p_1 поступает в теплообменник-охладитель, где конденсируется, отдавая в окружающую среду количество теплоты Q_0 при температуре T_0 . Полученный конденсат сжимается насосом до давления $p_2=1,0$

МПа. При этом давлении за счет вторичного подвода теплоты Q_1'' при температуре $T_1=300K$ в теплообменнике-испарителе жидкость испаряется. Образовавшийся насыщенный пар высокого давления поступает в смеситель-абсорбер, где смешивается с раствором низкой концентрации. Выделяющаяся за счет абсорбции теплота вызывает нагрев смеси до температуры $T_2 = 420 K$. Образующийся из этой смеси в абсорбере пар с меньшей концентрацией, но с той же температурой T_2 , поступает в теплообменник-конденсатор, где конденсируясь, отдаёт теплоту сетевой воде, нагревая её примерно до $370K$. Нагретую сетевую воду используют для нужд отопления и горячего водоснабжения.

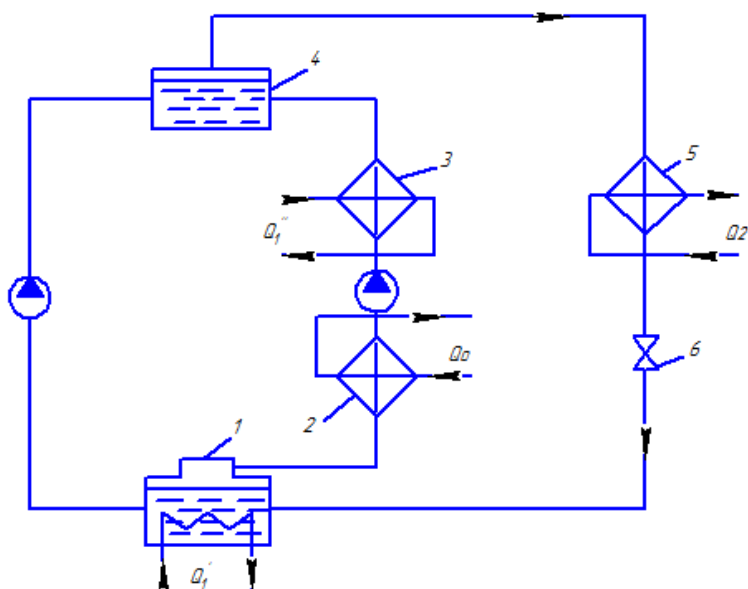


Рисунок 2.4 – Схема абсорбционной установки:

- 1 – генератор; 2 – теплообменник-охладитель; 3 – теплообменник-испаритель;
4 – смеситель-абсорбер; 5 – теплообменник-конденсатор; 6 – дроссель

Образующийся в теплообменнике-конденсаторе конденсат раствора через дроссель направляется в генератор, где из него снова выпаривается аммиак. Обедненный раствор из генератора подается насосом в смеситель-абсорбер, и цикл повторяется.

Достоинство такой абсорбционной машины состоит в том, что она дает возможность использовать для отопления теплоту низкого потенциала (300 К), каким является бросовая теплота различных технологических установок.

Коэффициент преобразования теплоты ТН

$$\varphi_T = \frac{Q_2}{Q_1' + Q_1''} \quad (2.13)$$

где Q_2 - количество теплоты, отводимой в конденсаторе, кДж;

$Q_1' + Q_1''$ - количество теплоты, подводимой к генератору и теплообменнику-испарителю соответственно, кДж.

Реальное значение коэффициента преобразования для абсорбционных ТН равно в среднем 1,6.

Достоинства абсорбционных ТН – малые затраты электрической энергии, бесшумная работа, высокая надёжность, положительный срок службы.

Перспективная область применения абсорбционных ТН и дородовые системы кондиционирования воздуха, использующие ВЭР. В последние годы большое внимание в мире уделяется абсорбционным бромисто-литиевым ТН. Объясняется это их экологической чистотой и высокой эффективностью. Применяются они для получения горячей воды на нужды отопления, горячего водоснабжения, а также для одновременного нагрева и охлаждения технологических сред различных производств.

Тепловые насосы нового поколения с одноступенчатой регенерацией бинарной смеси имеют коэффициент преобразования до 1,75, а с двухступенчатой - до 2,2.

2.2 Источники низкопотенциального тепла для тепловых насосов

Окружающая среда представляет интерес как источник энергии, когда ее температурный уровень незначительно отличается от температуры, необходимой потребителю, что характерно для отопления помещений. Ведь в зависимости от сезона температуры воздуха в помещениях и источника энергии

из окружающей среды отличаются не более чем на 10-35°C. Источниками энергии для ТНУ из окружающей среды могут служить почва, грунтовые и поверхностные воды, воздух, речная вода, вода из скважин, морская вода.

Таблица 2.1 – Потенциал сбросов сточных вод, геотермального и низкотемпературного тепла грунтов и водоемов России

Параметр	Валовый потенциал	Технический потенциал	Экономический потенциал	Производственный потенциал
	млн т у.т			
Всего по РФ, в том числе:	более 30000	12 058	216,3	20,08
- сбросы сточных вод	40,8	19,1	8,56	2,82
- тепло грунтов и водоемов	-	26,4	13,22	4,36
- системы охлаждения конденсаторов электростанций	142,4	37,4	9,50	3,14
- системы оборотного водоснабжения	370,3	106,0	20,0	6,60
Геотермальное тепло	более 30000	11869	165	3,16

Источник [23]

С помощью ТНУ можно использовать существующую энергию окружающей среды, прежде всего, в целях отопления помещений. Однако эффективное использование ТНУ предусматривает учет целесообразных условий эксплуатации, связанных с температурным полем источников энергии.

Окружающий воздух как источник теплоты зависит от суточных и сезонных колебаний температуры. Другие же источники энергии могут слабее реагировать на эти факторы или даже не ощущать их влияния. Таким образом, температурный уровень энергии окружающей среды зависит от различных внешних условий, влияющих друг на друга. При применении ТНУ для отопления не стремятся к непосредственному использованию энергии окружающей среды, а стараются брать источники с высоким температурным уровнем, чтобы достичь высокого коэффициента преобразования энергии

благодаря разности температур между источником теплоты и теплоносителем ТНУ.

Тепловые насосы, использующие тепло внешнего воздуха, имеют существенно большие потенциальные возможности для применения в жилом секторе по сравнению с другими типами тепловых насосов, хотя из воздуха удастся извлечь несколько меньшее количество тепла, чем из большинства других источников низкопотенциального тепла.

Температура атмосферного воздуха меняется в течение года, соответственно, и производительность насоса уменьшается с ее понижением. Так, снижение температуры внешнего воздуха с 10 до 0 °С приводит к увеличению потребности в обогреве помещений в индивидуальных домах почти на 100%. Следовательно, необходимо увеличивать объем прокачиваемого воздуха.

Вполне возможно извлекать тепло из воздуха даже при температуре его до минус 20°С, но при этом требуются значительные затраты энергии для привода компрессора. Обычно тепловые насосы отключаются, когда температура воздуха опускается ниже минус 10 °С. При этом включается резервная отопительная система.

Несмотря на вышеуказанные недостатки, простота установки теплового насоса, использующего тепло наружного воздуха, и экономическая конкурентоспособность определили его широкое распространение в Швеции. Учитывая, природно-климатические условия регионов России, где отопительный сезон длится не более 250 дней в году, а температура атмосферного воздуха опускается ниже минус 15 °С использование теплоты атмосферного воздуха для работы теплонасосных установок не получило широкого применения.

В качестве источника низкопотенциального тепла возможно использование вентиляционного воздуха. Температура воздуха, выбрасываемого через вентиляционную систему жилых зданий с механическим приводом, составляет около 20 °С, а объем может достигать десятков тысяч кубометров в

час. Указанная температура мало изменяется в течение дня, что позволяет получить более высокий коэффициент преобразования тепла по сравнению с другими источниками низкопотенциального тепла.

Поверхностные слои земли являются относительно стабильными аккумуляторами солнечного тепла, накопленного в летний период, и поэтому представляют собой огромный источник низкопотенциального тепла, которое может быть использовано даже зимой. В летний период солнечное тепло проникает в землю на глубину трех метров, и температура там достигает 10 °С и более. При этом температура грунта достигает максимума в конце лета и обычно заметно превышает температуру воздуха в период с сентября по март.

Пригодность для теплоснабжения зависит от типа грунта и содержания в нем воды. Стандартные системы способны обеспечивать в среднем 30-40 кВт·ч энергии с 1 м² в течение года. Максимальная теплоотдача грунта составляет 50-70 кВт·ч/м² в год.

Постоянная и относительно высокая температура поверхностных слоев земли позволяет подобрать тепловой насос, который способен обеспечить все энергетические потребности предварительно хорошо изолированного индивидуального дома. Несмотря на относительную дороговизну таких систем, они успешно применяются за рубежом в секторе коттеджей. Они могут использоваться для обогрева больших зданий, например школ, обладающих достаточной свободной площадью земли (например, территории стадионов).

Применение водоемов и водотоков, например рек, позволяет использовать эффект естественного сезонного накопления в них летнего тепла. Как известно, температура верхних слоев воды в озере может часто превышать плюс 20 °С. В зимний период, после формирования льда, наивысшей температурой обладает вода близ дна. При этом, донные отложения также обладают большим количеством низкотемпературного тепла при температурах от 6 до 9 °С. Учитывая, что температура воды в указанных водоемах относительно стабильна и медленно понижается к точке замерзания в холодную часть года, можно создать тепловой насос с приемлемыми

экономическими показателями для отопления и теплоснабжения дома в течение всего года.

Перспективы использования поверхностных вод в качестве источника тепла ограничены, с технической точки зрения, расстоянием между источником и местом его использования. Как правило, крупная установка с выходной мощностью около 10 МВт может быть размещена на расстоянии до 10 км от озера или другого крупного источника воды.

Известно, что температура подземных вод обычно является постоянной на глубине 15-20 м, хотя и существует значительная разница в температурах в северной и южной частях страны. Поэтому, как подтверждает зарубежный опыт, подземные воды могут быть с эффективностью использованы в качестве источника тепла для индивидуальных домов, многоквартирных зданий и групповых котельных мощностью до 1 МВт.

Считается, что тепловые насосы, использующие подземные воды, имеют большие потенциальные возможности по сравнению с системами, функционирующими на тепле поверхностных слоев земли. Это связано с тем, что применение последних ограничено наличием подходящих участков земли с необходимыми характеристиками, тогда как использование подземной воды в качестве источника тепла определяется лишь их наличием с надлежащими параметрами в приемлемой близости от потребителя. Однако при этом следует исключить возможность нарушения экологического баланса подземной воды, что может быть, если она имеется в недостаточно большом объеме и в то же время используется в целях водоснабжения населения.

Сточные воды при температуре около плюс 20 °С летом и редко менее плюс 8 °С зимой имеются, как правило, во всех городских поселениях.

В очищенном либо необработанном виде они могут быть использованы как источник низкопотенциального тепла. Неочищенные сточные воды обычно имеют большую температуру, и поэтому можно сократить расстояние между тепловым насосом и местом их использования, но их применение часто

приводит к засорению трубопроводов и блокированию теплообменных поверхностей.

Тепловые насосы, предназначенные для извлечения тепла, целесообразно размещать вблизи городских очистных сооружений либо в больших зданиях, например, больницах, где имеется большое количество относительно чистых сточных вод.

Во многих регионах на небольшой глубине есть геотермальные воды с температурой 20-30 °С и выше. Там с каждого метра длины скважины глубиной от десятков до нескольких сотен метров, служащей теплообменником с циркулирующей жидкостью, можно получить от 70 до 300 Вт тепла. Такие воды перспективны для теплоснабжения при помощи тепловых насосов.

2.3 Исследование эффективности работы парокompрессионной теплонасосной установки

Математическая модель парокompрессионной теплонасосной установки разрабатывается для определения целевой функции, которая отражает влияние внешних и внутренних параметров и характеристик моделируемого объекта.

С помощью математического моделирования, имеется возможность провести оценку эффективности работы теплового насоса при различных условиях работы.

Теплонасосные установки, как и другие преобразователи теплоты, могут эксплуатироваться в различных режимах, которые отличаются от базового по теплопроизводительности и при изменении параметров, влияющих на целевую функцию (например, температура и расход источника низкопотенциального тепла). По этой причине оценку эффективности ТНУ, уместно осуществлять на базе математического моделирования. При этом параметры низкопотенциальных источников теплоты изменяются в широком диапазоне.

Математическая модель ТНУ основывается на известных термодинамических и теплофизических параметрах хладагентов холодильных машин, на уравнениях тепловых и материальных балансов.

Постановка задачи для описания математической модели можно сформулировать следующим образом: определить энергетические характеристики (мощность электродвигателя компрессора, расходы теплоносителей, коэффициент преобразования теплоты) при различных внешних и внутренних параметрах, влияющих на работу теплового насоса.

2.3.1 Методика расчета термодинамического цикла парокompрессионной теплонасосной установки с переохладителем для отопления и ГВС

Тепловой расчет принципиальной схемы теплонасосной установки заключается в составлении тепловых балансов всего оборудования, на основе которых устанавливаются тепловые нагрузки теплообменников или расходы теплоносителей, температуры на входе и на выходе хладагентов, теплоносителей.

Термодинамическое совершенство ТНУ зависит от значений абсолютных температур испарителя и конденсатора, а также термодинамических характеристик реального цикла ТН. В свою очередь совершенство реального цикла определяется необратимостью процесса переноса теплоты и перепадом температур между её источником и теплоприемником.

Таким образом, основной задачей при расчете принципиальной схемы ТНУ является учет всех указанных факторов, влияющих на коэффициент преобразования теплоты ТН.

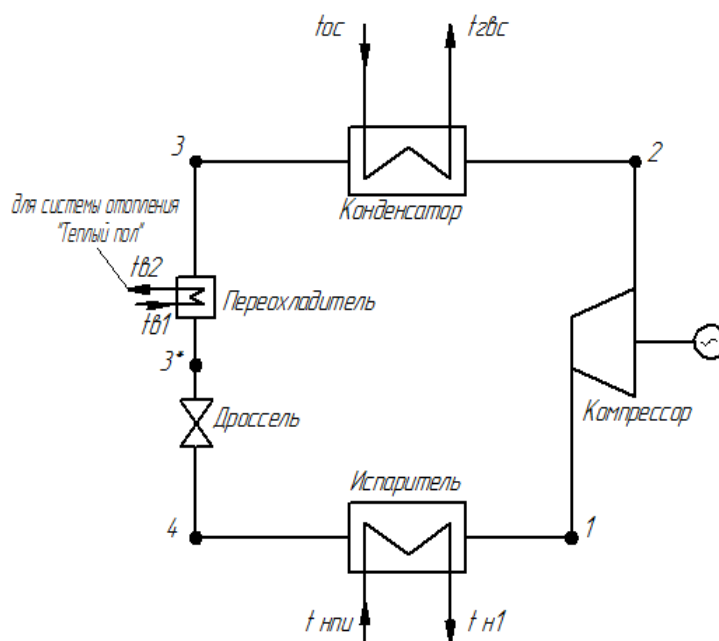


Рисунок 2.5 – Принципиальная схема ПТНУ с пререохладителем

При расчете принципиальной схемы теплонасосной установки была составлена следующая последовательность:

1. Составление принципиальной тепловой схемы ТНУ. Системы воздушного и водяного отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха с тепловыми насосами, как правило, имеют три контура: внутренний контур – замкнутый контур рабочего тела; внешний или первичный контур – контур носителя НПТ; отопительный контур – контур теплоносителя потребителя теплоты.

2. Выбор рабочего агента для ТН. Выбор хладагента производится по температуре и давлению в цикле. Наилучшим является хладагент, критическая область которого наиболее удалена от рабочих параметров, так как приближение к этой области снижает теплопроизводительность, увеличивает затраты энергии на сжатие в компрессоре.

3. Определяются основные параметры термодинамического цикла ТН.

Температура испарения рабочего тела принимается в зависимости от температуры источника низкопотенциального тепла. Она должна быть на 4-5 °С ниже температуры источника НПТ:

$$t_1 = t_u = t_{\text{НПТ}} - \Delta t_u, \quad (2.14)$$

где $t_{\text{НПТ}}$ - температура источника низкопотенциального тепла, °С;

Δt_u - температурный напор испарителя, °С.

По полученной температуре испарения определяем параметры:

$$P_1 = P_u = f(t_1); h_1 = h_u = f(t_1); s_1 = f(t_1).$$

Температура конденсации принимается в зависимости от температуры источника ВПТ. Если теплоноситель – вода, то она на 3-5°С выше температуры ВПТ, а если воздух, то на 5...10°С.

$$t_2 = t_k = t_{nc} + \Delta t_k, \quad (2.15)$$

где t_{nc} - температура прямой сети, °С;

Δt_k - температурный напор конденсатора, °С.

По температуре конденсации на левой пограничной кривой в точке «3» определяем параметры: $P_3 = f(t_k); h_3 = f(t_k)$.

Определяем энтальпию в конце адиабатического сжатия: $h_{2a} = f(P_3; s_1)$.

Действительная энтропия в точке «2»: $h_2 = h_1 - \frac{h_{2a} - h_1}{\eta_a}$. По значению

действительной энтальпии в конце процесса сжатия и давлению конденсации рабочего тела определяется точка «2».

В схеме ТНУ с переохладителем необходимо определить параметры рабочего тела после переохладителя (точка «3*»). Согласно заданному температурному напору в переохладителе Δt_{ne} на выходе из него должно выполняться условие:

$$\Delta t_{ne} = t_{3*} - t_{B2}, \quad (2.16)$$

где t_{3*} - температура хладагента после пререохладителя, °С;

t_{B2} - температура теплоносителя после пререохладителя, °С.

Тепловой баланс переохладителя имеет следующий вид:

$$c_{p3}(t_k - t_{3*}) = c_B(t_{B2} - t_{B1}), \quad (2.17)$$

где c_{p3}, c_B - теплоемкость хладагента в точки «3», теплоёмкость воды соответственно, $\text{кДж} / \text{кг} \cdot \text{К}$;

t_k - температура конденсации, $^{\circ}\text{C}$;

t_{3*} - температура хладагента после пререеохладителя, $^{\circ}\text{C}$;

t_{B2} - температура теплоносителя после пререеохладителя, $^{\circ}\text{C}$;

t_{B1} - температура теплоносителя на входе в пререеохладитель, $^{\circ}\text{C}$.

Температура рабочего тела после пререеохладителя определяется следующим образом:

$$t_{3*} = \frac{c_{p3} \cdot t_k + c_B (\Delta t_{ne} + t_{B1})}{c_{p3} + c_B}, \quad (2.18)$$

где c_{p3}, c_B - теплоемкость хладагента в точки «3», теплоёмкость воды соответственно, $\text{кДж} / \text{кг} \cdot \text{К}$;

Δt_{ne} - температурный напор пререеохлодителя, $^{\circ}\text{C}$;

t_k - температура конденсации, $^{\circ}\text{C}$;

t_{B1} - температура теплоносителя на входе в пререеохладитель, $^{\circ}\text{C}$.

Энтальпия рабочего тела после пререеохладителя: $h_{3*} = f(t_{3*}; P_k)$.

Энтальпия на входе в испаритель: $h_4 = h_{3*}$.

1. Тепловой баланс конденсатора:

$$G_{xl} \cdot (h_{вх.кон}^{xl} - h_{вых.кон}^{xl}) = G_{св} \cdot Cp \cdot (t_{nc} - t_{oc}) = Q_{TH}, \quad (2.19)$$

где $G_{xl}, G_{св}$ - расход хладона и сетевой воды соответственно, $\text{кг}/\text{с}$;

$h_{вх.кон}^{xl}, h_{вых.кон}^{xl}$ - энтальпия хладона на входе и выходе конденсатора соответственно, $\text{кДж}/\text{кг}$;

Cp - теплоёмкость воды, $\text{кДж} / \text{кг} \cdot \text{К}$;

t_{nc}, t_{oc} - температура прямой и обратной сети, $^{\circ}\text{C}$;

Q_{TH} - тепловая мощность теплового насоса, кВт .

1.1 Находим расход хладагента:

$$G_{xl} = \frac{Q_{TH}}{(h_{ex.kon}^{xl} - h_{вых.kon}^{xl})}, \quad (2.20)$$

где $h_{ex.kon}^{xl}, h_{вых.kon}^{xl}$ - энтальпия хладона на входе и выходе конденсатора соответственно, кДж/кг;

Q_{TH} - тепловая мощность теплового насоса, кВт.

1.2 Находим расход сетевой воды:

$$G_{cv} = \frac{Q_{TH}}{C_p \cdot (t_{nc} - t_{oc})}, \quad (2.21)$$

где C_p - теплоёмкость воды, кДж / кг · К ;

t_{nc}, t_{oc} - температура прямой и обратной сети, °С;

Q_{TH} - тепловая мощность теплового насоса, кВт.

2. Тепловой баланс переохладителя:

$$G_{xl} \cdot (h_{ex.ne} - h_{вых.ne}) = G_{cv} \cdot C_p \cdot (t_{nc} - t_{oc}) = Q_{TH}, \quad (2.22)$$

где G_{xl}, G_{cv} - расход хладона и сетевой воды соответственно, кг/с;

$h_{ex.ne}^{xl}, h_{вых.ne}^{xl}$ - энтальпия хладона на входе и выходе из переохладителя соответственно, кДж/кг;

C_p - теплоёмкость воды, кДж / кг · К ;

t_{nc}, t_{oc} - температура прямой и обратной сети, °С;

Q_{TH} - тепловая мощность теплового насоса, кВт.

2.1 Находим расход хладагента:

$$G_{xl} = \frac{Q_{TH}}{(h_{ex.ne} - h_{вых.ne})}, \quad (2.23)$$

где $h_{ex.ne}^{xl}, h_{вых.ne}^{xl}$ - энтальпия хладона на входе и выходе из переохладителя соответственно, кДж/кг;

$Q_{ТН}$ - тепловая мощность теплового насоса, кВт.

$$2.2 \text{ Общий расход хладагента: } G_{\text{хл.общ}} = G_{\text{хл.звс}} + G_{\text{хл.омп}}$$

3. Тепловой баланс испарителя:

$$G_{\text{хл}} \cdot (h_{\text{вых.и}}^{\text{хл}} - h_{\text{вх.и}}^{\text{хл}}) = G_{\text{нти}} \cdot C_p \cdot \Delta t, \quad (2.24)$$

где $G_{\text{хл}}, G_{\text{нти}}$ - расход хладона и расход источника низкопотенциального тепла соответственно, кг/с;

$h_{\text{вх.и}}^{\text{хл}}, h_{\text{вых.и}}^{\text{хл}}$ - энтальпия хладона на входе и выходе из испарителя соответственно, кДж/кг;

C_p - теплоёмкость воды, кДж / кг · К ;

Δt - температурный напор испарителя, °С;

3.1 Находим расход теплоносителя НТП:

$$G_{\text{нти}} = \frac{G_{\text{хл}} \cdot (h_{\text{вых.и}}^{\text{хл}} - h_{\text{кон.пр.раси}}^{\text{хл}})}{C_p \cdot \Delta t}, \quad (2.25)$$

где $G_{\text{хл}}$ - расход хладона, кг/с;

$h_{\text{вх.и}}^{\text{хл}}, h_{\text{кон.пр.раси}}^{\text{хл}}$ - энтальпия хладона на выходе из испарителя и в конце процесса расширения соответственно, кДж/кг;

C_p - теплоёмкость воды, кДж / кг · К ;

Δt - температурный напор испарителя, °С;

4. Электрическая мощность, затрачиваемая на привод компрессора:

$$N_{\text{э}}^{\text{к}} = \frac{G_{\text{общ}} \cdot (h_{\text{вх.кон}}^{\text{хл}} - h_{\text{вых.и}}^{\text{хл}})}{\eta_{oi}}, \quad (2.26)$$

где $G_{\text{общ}}$ - общий расход хладона, кг/с;

$h_{\text{вых.и}}^{\text{хл}}, h_{\text{кон.пр.расш}}^{\text{хл}}$ - энтальпия хладагента на выходе из испарителя и в конце процесса расширения соответственно, кДж/кг;

η_{oi} - индикаторный КПД компрессора.

5. Коэффициент преобразования теплоты:

$$\varphi = \frac{Q_o}{N_9^k}, \quad (2.27)$$

где Q_{TH} - тепловая мощность теплового насоса, кВт;

N_9^k - Электрическая мощность, затрачиваемая на привод компрессора, кВт.

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Экономическая часть является важным компонентом выпускных квалификационных работ студентов, обучающихся по техническим специальностям.

Экономические знания, приобретенные в процессе изучения дисциплины «Экономика предприятия» дают возможность студентам успешного применения своих способностей по окончании обучения в университете, и быть конкурентоспособным специалистом на рынке труда в современном мире.

Данная выпускная квалификационная работа по теме «Использование теплонасосных установок в системах теплоснабжения» имеет теоретическую направленность и имеет научно-исследовательский характер. Поэтому экономическая часть представлена как определение затрат на проведение ВКР.

Целью данного раздела ВКР является расчет экономических затрат на выполнение ВКР, составление сметы затрат путем составления калькуляции по отдельным статьям затрат всех видов необходимых ресурсов.

3.1 Диаграмма Исикава

Причинно-следственная диаграмма Исикавы – это графический способ, который дает возможность проанализировать и сформулировать причинно-следственных связи; инструментальный способ для систематического установления причин поставленной проблемы и дальнейшего графического представления. Данная диаграмма позволяет выявить причины появления проблем; анализировать и структурировать процессы, связанные с устранением проблемы; оценить причинно-следственные связи.

На рисунке 3.1 представлена диаграмма Исикавы научного исследования для сформулированной проблемы магистерской диссертации.

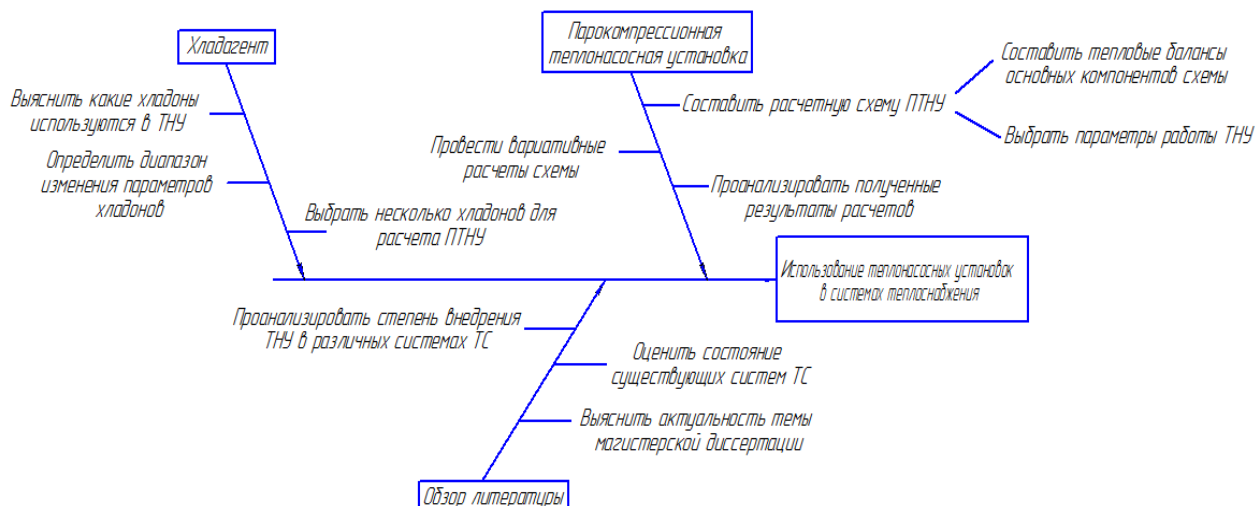


Рисунок 3.1 – Диаграмма Исикава для научного исследования

На основании построенной диаграммы Исикавы для решения поставленных задач в магистерской диссертации необходимо выполнить следующие пункты:

1. Провести литературный обзор для выяснения актуальности темы научного исследования, степень внедрения ТНУ в системах теплоснабжения оценить состояние существующих систем теплоснабжения;
2. Выбрать хладагенты для расчета в системе ТНУ и выяснить диапазон параметров, при которых уместно использовать тот или иной вид хладагента для ТНУ;
3. Выполнить вариативные расчеты ПТНУ и проанализировать полученные результаты.

3.2 Планирование этапов и работ по выполнению ВКР

В данном разделе необходимо составить перечень этапов и работ по выполнению ВКР, провести распределение исполнителей по видам работ (таблица 3.1). Планирование ВКР представляет собой составленный в определенном порядке перечень работ с развернутый содержанием каждого пункта.

Таблица 3.1 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Наименование работ	Содержание работ	Исполнитель	Кол-во, дн.
Разработка ТЗ на выполнение магистерской диссертации	1. Составление, утверждение задания	Руководитель ВКР	7
Подбор и изучение материала по теме магистерской диссертации	2. Подбор материала по теме	Студент-дипломник	17
	3. Анализ актуальности темы магистерской диссертации	Студент-дипломник	21
	4. Выбор направления исследования	Руководитель ВКР	21
	5. Календарное планирование работ по теме	Руководитель ВКР	7
Экспериментальное исследование	6. Выбор метода экспериментального исследования	Студент-дипломник	7
	7. Разработка математической модели для выполнения экспериментального исследования	Студент-дипломник	30
Анализ полученных результатов	8. Проведение расчетов	Студент-дипломник	50
	9. Анализ полученных результатов		
Обобщение и оценка результатов	10. Оценка эффективности полученных результатов	Студент-дипломник	80
	11. Сравнение результатов с ранее полученными и известными в научной литературе исследованиями	Студент-дипломник	
	12. Оценка целесообразности ВКР		
Составление отчета по ВКР	13. Подготовка текста диссертации и демонстрационных материалов для защиты	Студент-дипломник	10
Проверка пояснительной записки	14. Ознакомление с пояснительной запиской, выявление замечаний по ВКР	Руководитель ВКР	20
	15. Допуск студента-дипломника в защите ВКР		

3.3 Смета на выполнение магистерской диссертации

Экономические затраты – выплаты, которые компания (фирма) обязана сделать, или те доходы, которые компания обязана гарантировать поставщику ресурсов с целью отвлечь данные ресурсы от использования в других целях.

Экономические затраты на выполнение ВКР рассчитывались по формуле:

$$K_{ВКР} = I_{\text{mat}} + I_{\text{ам}} + I_{\text{зн}} + I_{\text{со}} + I_{\text{пр}} + I_{\text{накл}} \quad (3.1)$$

где I_{mat} – материальные затраты;

$I_{\text{ам}}$ – амортизационные отчисления;

$I_{\text{зн}}$ – заработная плата;

$I_{\text{со}}$ – социальные отчисления;

$I_{\text{пр}}$ – прочие затраты;

$I_{\text{накл}}$ – накладные расходы.

3.3.1 Материальные затраты

В данную статью экономических затрат входят затраты на приобретение всех видов материалов, необходимых для выполнения работ.

Расчет стоимости материальных затрат выполняется по действующим ценам. В эту статью включаются затраты на оформление магистерской диссертации (канцелярские принадлежности, транспортные расходы, и т.д). Результаты по данной статье представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Материалы, необходимые для выполнения магистерской диссертации

Наименование	Количество, шт.	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Шариковая ручка	2	5	10
Тетрадь в клеточку (12листов)	1	5	5
Бумага для печати 1000 листов	1	150	150
Папка «Дипломный проект» 100 листов	1	130	130
Всего за материалы			295
Транспортно-заготовительные расходы (5%)			15
Электроэнергия $C = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об}$			690
Итого $I_{мат}$			1000

Примечание: в формуле для определения затрат на электроэнергию $C_{эл} = 2,25$ руб. за 1 кВт-ч; $P = 0,2$ кВт – мощность ноутбука Acer; $F_{об} = 1500$ часов.

3.3.2 Амортизация основных фондов и нематериальных активов

Амортизационное отчисление определяется по формуле:

$$I_{ам} = \frac{T_{исп.кт.}}{T_{кол.вр.}} \cdot I_{кт} \cdot \frac{1}{T_{сл.}} \quad (3.2)$$

где $T_{исп.к.д}$ – количество дней использования компьютерной техники;

$T_{кол.вр.}$ – количество дней;

$I_{кт}$ – стоимость компьютерной техники;

$T_{сл.}$ – срок службы компьютерной техники.

$$I_{ам} = \frac{T_{исп.кт.}}{T_{кол.вр.}} \cdot I_{кт} \cdot \frac{1}{T_{сл.}} = \frac{1500}{365} \cdot 15000 \cdot \frac{1}{1825} = 34 \text{ руб./день}$$

3.3.3 Затраты на оплату труда

Заработная плата участников научного исследования определяется по формуле:

$$I_{зн} = 3\Pi_o \cdot k_1 \cdot k_2 \quad (3.3)$$

где $3\Pi_o$ – месячный оклад;

k_1 – коэффициент, учитывающий отпуск $k_1=1,1$;

k_2 – районный коэффициент $k_2=1,3$ (для г. Томска);

D – доплата к заработной плате.

Месячный оклад для научного руководителя ВКР, имеющего должность доцента составляет 27 500 рублей, доплата к заработной плате 1900 рублей. Месячный оклад инженера составляет 14500 рублей.

Фактическая заработная плата определяется по формуле:

$$I_{зп}^{\phi} = \frac{I_{зн}}{21} \cdot n \quad (3.4)$$

Заработная плата научного руководителя ВКР:

$$I_{зн} = (ЗП_o \cdot k_1 + D) \cdot k_2 = (27500 \cdot 1,1 + 1900) \cdot 1,3 = 41795 \text{ руб.}$$

Заработная плата инженера 9-го разряда:

$$I_{зн} = ЗП_o \cdot k_1 \cdot k_2 = 14500 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 20735 \text{ руб.}$$

Тогда фактическая заработная плата:

- научного руководителя ВКР:

$$I_{зп}^{\phi} = \frac{I_{зн}}{21} \cdot n = \frac{41795}{21} \cdot 5 = 9951 \text{ руб.}$$

- инженера 9-го разряда

$$I_{зп}^{\phi} = \frac{I_{зн}}{21} \cdot n = \frac{20735}{21} \cdot 62 = 61217 \text{ руб.}$$

Фонд заработной платы составляет:

$$\Phi ЗП = ЗП_{нр} + ЗП_{инж} = 9951 + 61217 = 71168 \text{ руб.}$$

3.3.4 Затраты на социальные отчисления

Отчисления на социальные нужды – постоянные отчисления по нормам, установленные законодательством государственного социального страхования в Фонд социального страхования РФ, Пенсионный фонд РФ, фонды обязательного медицинского страхования от затрат на оплату труда работников, включаемых в себестоимость продукции (работ, услуг), по элементу «Затраты на оплату труда» (кроме тех видов оплаты, на которые страховые взносы не начисляются).

Отчисления на социальные нужды составляют 30% от ФЗП :

$$I_{co} = 0,3 \cdot \text{ФЗП} = 0,3 \cdot 71168 = 21350 \text{ руб.}$$

3.3.5 Затраты на прочие расходы

К прочим расходом относятся следующие расходы:

- налоги, установленные законодательными актами о налогах и сборах;
- затраты на сертификацию продукта;
- комиссионные сборы;
- расходы, связанные с обеспечением мер пожарной безопасности, которые проводятся в соответствии с законодательством Российской Федерации, расходы на услуги по охране имущества, расходы по обслуживанию охранно-пожарной сигнализации, и т.д;
- затраты, необходимые для обеспечения нормальных условий труда и техники безопасности, установленных законодательством Российской Федерации и т.д.

Прочие затраты на выполнение ВКР определяются по формуле:

$$I_{np} = 0,1 \cdot (I_{mat} + I_{am} + I_{zn} + I_{co}) \quad (3.4)$$

$$I_{np} = 0,1 \cdot (I_{mat} + I_{am} + I_{zn} + I_{co}) = 0,1 \cdot (1000 + 34 + 71168 + 21350) = 93552 \text{ руб.}$$

3.3.6 Накладные затраты

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$I_{\text{накл}} = 200\% \cdot \PhiЗП \quad (3.5),$$

$$I_{\text{накл}} = 2 \cdot 71168 = 142336 \text{ руб.}$$

3.3.7 Составление сметы затрат на выполнение ВКР

Смета затрат – это отчетный документ, который оформляется согласно финансовым составляющим расходов в производство и реализацию продукта (в нашем случае на выполнение ВКР). В состав сметы включается четыре вида расходов:

- материальные затраты;
- заработная плата и отчисления на социальные нужды;
- амортизационные отчисления;
- накладные расходы.

Таблица 3.4 – Смета затрат на выполнение ВКР

Элемент затрат	Стоимость, руб.
Материальные затраты	1000
Амортизационные отчисления	34
Заработная плата	71168
Социальные отчисления	21350
Прочие расходы	93552
Накладные затраты	142336
Итого:	329440

3.4 Техничко-экономическая оценка пароконпрессиионного теплового насоса

Проектирование ТНУ как источника теплоты источника теплоты для системы теплоснабжения зданий преследует цель экономии топлива. Экономическую целесообразность их применения следует доказывать, учитывая при этом особенности района строительства, данные по затратам на электроэнергию и топливо, по удельным капиталовложениям в строительство.

Определим экономию условного топлива и простой срок окупаемости ТНУ для утилизации производственной воды, имеющей температуру 40 °С, с целью обеспечения рабочего поселка горячей водой вместо действующей котельной. Количество теплоты отпущенной потребителям за отопительный сезон $Q_{OT} = 2\ 000\ 000\ \text{кВт}\cdot\text{ч}$. Расход электроэнергии на привод компрессора ТН составляет $N_{э} = 400\ 000\ \text{кВт}\cdot\text{ч}$

Расход условного топлива для варианта отопления от котельной:

$$B_K = \frac{Q_{OT}}{Q_n^p \cdot \eta_k \cdot \eta_{m.c}} = \frac{2\ 000\ 000 \cdot 3,6}{29,3 \cdot 0,8 \cdot 0,95} = 323\ 334\ \text{кг у.т. / год} \quad (3.6)$$

где Q_{OT} – сезонная отопительная нагрузка, кВт·ч;

Q_n^p – теплота сгорания условного топлива, кВт;

$\eta_k, \eta_{m.c}$ – КПД котельной и тепловых сетей

Расход условного топлива для варианта отопления с помощью ТН:

$$B_T = N_{э} \cdot b_{кэс}^э = 400\ 000 \cdot 0,32 = 128\ 000\ \text{кг у.т. / год} \quad (3.7)$$

где $b_{кэс}^э$ – удельный расход топлива на выработку электроэнергии, кг у.т./кВт·ч;

Экономия топлива от замещения котельной тепловым насосом составляет:

$$\Delta B = B_K - B_T = 323\ 334 - 128\ 000 = 195\ 334\ \text{кг у.т. / год} \quad (3.8)$$

Финансовая экономия составит (в предположении, что топливо – природный газ, стоимостью $C=660$ руб./1000 м³):

$$\Delta C = \Delta B \cdot C = 1,14 \cdot 195\ 334 \cdot 0,66 = 146\ 969\ \text{руб. / год} \quad (3.9)$$

Единовременные капитальные затраты K , руб, на приобретение и установку теплового насоса средней мощности составляют около 800 000 рублей:

Простой срок окупаемости T , лет, может быть определен по формуле:

$$C = \frac{K}{\Delta C} = \frac{800000}{146696} = 5,5 \text{ лет} \quad (3.10)$$

3.5 Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Тепловыми насосами называют установки, предназначенные для повышения потенциала теплоты с низкого температурного уровня на более высокий на основе обратного термодинамического цикла за счёт расхода электрической или другой высокопотенциальной энергии. С помощью теплового насоса можно отбирать теплоту окружающей среды, низкопотенциальных источников вторичных энергоресурсов и передавать ее среде с более высокой температурой, например теплоносителю системы отопления. Основным преимуществом теплонасосных установок как источника теплоты для системы теплоснабжения является экономия топлива.

Так как магистерская диссертация по теме «Использование теплонасосных установок в системах теплоснабжения» имеет теоретическую направленность и научно-исследовательский характер, экономическая часть представлена как определение затрат на проведение ВКР.

В данном разделе разработана причинно-следственная диаграмма Исикава, составлен календарный план проведения научного исследования, составлена смета, в которой отражены основные затраты на выполнение ВКР.

Кроме того, рассчитаны годовая экономия топлива, которая составила 146 969 руб./год. Срок окупаемости теплового насоса для поставленных условий – 5,5 лет. Таким образом, была доказана экономическая целесообразность применения теплонасосных установок в системах местного (децентрализованного) теплоснабжения.