

На правах рукописи



Третьякова Полина Александровна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО  
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОВЫХ  
НАСОСОВ**

Специальность 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование  
воздуха, газоснабжение и освещение

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

Тюмень - 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет»

Научный руководитель **Степанов Олег Андреевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный  
университет»

Официальные оппоненты: **Рафальская Татьяна Анатольевна**  
доктор технических наук  
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный  
архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)»

**Кириченко Анна Сергеевна**  
кандидат технических наук  
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный  
аграрный университет имени И.Т. Трубилина»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Омский государственный  
университет путей сообщения».

Защита состоится «12» декабря 2024 г. в 12:00 часов (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.419.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», по адресу: 625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, д. 2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и на сайте <http://www.tyuiu.ru>

Автореферат разослан «21» октября 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Степанов Максим Андреевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В соответствии с ФЗ № 190 «О теплоснабжении» развитие систем теплоснабжения осуществляется наиболее энергоэффективным и наименее затратным способом при условии минимального воздействия на окружающую среду. Проблема энергоэффективности систем теплоснабжения в России является актуальной и находит свое отражение в ФЗ № 190 «О теплоснабжении», в ФЗ № 261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» и в Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года. Нормативно-правовые акты обязывают организации, занимающиеся производством и транспортом энергоресурсов, разрабатывать программу энергосбережения и внедрять энергосберегающие мероприятия, направленные на снижение потребления энергоресурсов.

Система централизованного теплоснабжения города включает в себя источник тепловой энергии, тепловые сети и потребителей. Как правило, в мегаполисах теплоснабжение осуществляется от теплоэлектроцентралей (далее – ТЭЦ) и характеризуется большой протяженностью тепловых сетей. Неиспользуемые низкопотенциальные вторичные энергоресурсы ТЭЦ и тепловые потери теплосети развивают направление оптимизации систем централизованного теплоснабжения (далее – СЦТ) за счет применения тепловых насосов. Включение тепловых насосов в СЦТ способствует снижению выбросов продуктов сгорания в окружающую среду, снижению расхода топлива на выработку энергии, снижению теплового воздействия. При этом существуют различные варианты включения тепловых насосов в систему теплоснабжения, но отсутствует способ оценки тепловой эффективности альтернативных моделей теплоснабжения.

Таким образом, разработка способа повышения эффективности системы теплоснабжения за счет включения тепловых насосов в технологическую схему является актуальной задачей.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросами тепловых насосов и их включения в систему теплоснабжения, различными аспектам эксплуатационной надежности тепловых сетей, модернизации существующих систем теплоснабжения занимались такие ученые, как Andersen A. N., Ayou D. S., Vacquet A., Barco-Burgos J., Basciotti D., Bendtsen JD, Bensadi S., Bloess A., Boldrini A., Bruno J. C., Calise F., Cappiello F. L., Cimmino L., Cipriano J., Coronas A., Galindo-Fernandez M., Guelpa E., Hamid K., Hirth L., Iov F., Jimenez Navarro J. P., Junnila S., Khatibi M., Kinnane O., Kontu K., Lennon D., Mor G., O'Hegarty R., Ostergaard P. A., Praktiknjo A, Rinne S., Ruhnaу O., Sajjad U., Schill WP., Schmidt R. R., Spreitzhofer J., Terreros O., Ulrich Ahrens M., Wardhana M. F., Zerrahn A., Аверьянов В. К., Андрющенко, А. И., Бакшеев А. Ю., Батухтин А. Г., Берзан В. П., Бирюзова, Е. А., Богданов, А. Б., Бородихин, И. В., Бямбоцогт П., Васильев Г. П., Горшков А. С., Григорьева О. К., Данилов В. В., Даутов, Р. Р., Дмитриев А. Н., Журавлев А. А., Козлов С. А., Коршунова В. В., Ларкин Д. К., Логинова С. А., Ломовцев П. Б., Мацко И. И.,

Молодкина М. А., Мордовин В. А., Николаев Ю. Е., Ноздренко Г. В., Овсянник А. В., Овчинников Ю. В., Огуречников Л. А., Олейникова Е. Н., Орлов М. Е., Петин, А. Ю., Петров С. И., Постникова В. В., Потапов Ю. А., Проценко В. П., Пугач Л. И., Пугач Ю. Л., Реев В. Г., Резанов Е. М., Робу С. Г., Ротов П. В., Серант Ф. А., Славин В. С., Стенин В. А., Степанов О. А., Степин В. А., Суворов Д. М., Сутягинский М. А., Сущих В. М., Терехов Д. В., Тимошин А. А., Томилов В. Г., Федотов А. С., Францева А. А., Фролов М. Ю., Худякова Е. А., Чаукин П. Е., Чернышов П.С., Чуйкина А. А., Шарапов В. И., Шит М. Л., Юрченко В. А., Юша В.Л.

**Объект исследования:** система централизованного теплоснабжения.

**Предмет исследования:** влияние тепловых насосов на работу системы централизованного теплоснабжения при их применении в тепловых пунктах потребителя.

**Цель диссертационной работы:** разработка и оценка эффективности системы теплоснабжения с использованием тепловых насосов и выбор рациональной трассировки тепловых сетей.

**Задачи исследования:**

- выполнить обзор способов включения тепловых насосов в систему централизованного теплоснабжения и проанализировать вторичные энергоресурсы ТЭЦ, которые возможно использовать в качестве источников низкопотенциальной теплоты для систем централизованного теплоснабжения;
- разработать эффективную схему теплоснабжения с применением тепловых насосов (далее – ТН) с использованием низкопотенциальной теплоты паротурбинной ТЭЦ;
- разработать способ оценки эффективности системы теплоснабжения с тепловыми насосами;
- разработать методику выбора трассы трубопроводов от ТЭЦ до тепловых пунктов;
- выявить наиболее значимые параметры эффективности тепловых сетей и предложить методику комплексной оценки системы теплоснабжения.

**Научная новизна результатов:**

- разработан способ генерации тепловой энергии на основе применения тепловых насосов, расположенных в центральных тепловых пунктах, позволяющих повысить тепловую экономичность паротурбинных парогазовых теплоэлектроцентралей за счет утилизации теплоты системы оборотного водоснабжения;
- получены аналитические зависимости, позволяющие исследовать изменение коэффициента использования теплоты топлива и удельной выработки электроэнергии на ТЭЦ при применении тепловых насосов в тепловых пунктах от соотношения выработки тепловой и электрической энергии, коэффициента трансформации теплового насоса, снижения потерь теплоты в тепловых сетях и снижения расхода электроэнергии на привод сетевых насосов;

- предложена методика выбора трассы тепловой сети с учетом влияния ситуационных факторов, влияющих на стоимость проведения ремонтных работ, показывающих возможность совмещения с другими инженерными системами, оценивающих воздействие окружающей среды и близлежащих объектов на износ трубопровода. Методика предполагает перевод растровых карт, показывающих вышеперечисленные факторы, в структурированную многофакторную сетку;
- разработана методика оценки эффективности существующих схем тепловой сети с учетом экономических, экологических, эксплуатационных и технологических факторов, приведенных к удельным величинам. Каждый фактор переводится в численное значение, характеризующее его отклонение от «эталона» с учетом значимости, оцененной экспертами.

**Теоретическая значимость** работы заключается в разработке способа теплоснабжения с применением тепловых насосов, позволяющей повысить тепловую экономичность ТЭЦ.

**Практическая значимость** работы заключается в разработке методики выбора трассы тепловой сети и методики комплексной оценки эффективности систем теплоснабжения.

**Методология и методы исследования.** Поставленные задачи решены с использованием методов математического анализа, метода экспертной оценки и метода аппроксимации.

**Личный вклад автора** заключается в разработке системы централизованного теплоснабжения с применением внутриквартальных тепловых насосов и технико-экономическом обосновании эффективности ее применения, разработке способа трассировки тепловых сетей от источника теплоты до тепловых пунктов, разработке критериев оценки эффективности тепловых сетей.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Способ централизованного теплоснабжения с применением тепловых насосов, повышающих энергоэффективность систем централизованного теплоснабжения за счет утилизации сбросной низкопотенциальной теплоты ТЭЦ.

2. Аналитические зависимости, позволяющие исследовать изменение коэффициента использования теплоты топлива и удельной выработки электроэнергии на ТЭЦ при применении тепловых насосов в тепловых пунктах от выработки электроэнергии на тепловом потреблении, коэффициента трансформации теплового насоса, снижения потерь теплоты в тепловых сетях и изменений расхода электроэнергии на привод сетевых насосов.

3. Методика выбора трассы тепловой сети с учетом влияния ситуационных факторов, влияющих на стоимость проведения ремонтных работ, показывающих возможность совмещения с другими инженерными системами, учитывающих воздействие окружающей среды и близлежащих объектов на износ трубопровода. Методика предполагает создание структурированных многофакторных сеток на основе растровых карт.

4. Методика оценки эффективности существующих схем тепловой сети с учетом экономических, экологических, эксплуатационных и технологических факторов, приведенных к удельным величинам.

**Достоверность защищаемых положений** обеспечивается применением методов исследования, основанных на фундаментальных законах технической термодинамики, методах вычислительной математики, теории теплообмена и теплофизики. Проводимые расчеты выполнены согласно требованиям нормативной документации. Полученные расчетные данные сопоставлялись с известными в литературе значениями и согласовывались с ними.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на международных и всероссийских конференциях в Тюмени, Челябинске, Екатеринбурге, Санкт-Петербурге, Казани и получили положительную оценку. Внедрение и апробация результатов диссертационной работы осуществлялась ООО «Смарт инжиниринг» при согласовании проекта тепловых сетей.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 19 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых изданиях по списку ВАК РФ, и 6 статей, входящих в базу Scopus. Получен патент на полезную модель RU2571361C1.

**Структура и объем работ.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы. Общий объем составляет 148 страниц, включает 29 таблиц, 30 рисунков, список литературы из 134 источников.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Согласно полученным научным результатам, диссертация соответствует п. 3 и 4 паспорта специальности 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость работы.

**Первая глава** посвящена литературному обзору систем централизованного теплоснабжения с применением тепловых насосов. Проведенный обзор литературных источников позволил рассмотреть достоинства и недостатки существующих вариантов встраивания тепловых насосов в существующие и проектируемые системы отопления, а также выделить предпосылки к усовершенствованию системы централизованного теплоснабжения с применением тепловых насосов.

**Во второй главе** выполнен сравнительный анализ источников низкопотенциального тепла с учетом их тепловой мощности и температуры на примере энергоблока ПГУ-110. Сделан вывод, что техническая вода системы оборотного водоснабжения имеет достаточный расход и температуру для теплоснабжения потребителей с применением тепловых насосов. Разработана и запатентована система централизованного

теплоснабжения с использованием теплового насоса.

Система технического водоснабжения состоит из трех замкнутых контуров. Замкнутый контур охлаждающей воды на охлаждение оборудования и механизмов блока предназначен для подачи охлаждающей воды на воздухоохладители генератора паровой турбины (далее – ПТ), на маслоохладители ПТ, на теплообменники станции вакуумирования ПТ, на холодильники отборов проб воды и пара блока, на охладители конденсата блоков автономных конденсаторов, на охладители грязного конденсата, на воздухоохладители электродвигателей. В качестве охлаждающей воды используется умягченная вода из водоподготовительной установки. Нагретая после охлаждения оборудования и механизмов вода с температурой 42<sup>0</sup>С поступает в теплообменник, температура воды снижается до 35<sup>0</sup>С и направляется обратно в бак запаса воды.

Замкнутый контур охлаждающей воды охлаждения механизмов предназначен для подачи охлаждающей воды на охлаждение подшипников летних и зимних сетевых насосов (СНЛ, СНЗ) и охлаждение масла в маслоохладителях маслостанций СНЗ. Умягченная вода из бака запаса контура подается в теплообменники, где охлаждается до 30<sup>0</sup>С, далее поступает на охлаждение оборудования и механизмов, а затем возвращается обратно в баки.

В контуре технической воды (охлаждающей воды) охлаждающей средой является техническая вода, подаваемая насосами из напорного циркуляционного водовода на теплообменники замкнутых контуров. Отвод технической воды после теплообменников производится в сливной циркуляционный водовод, ведущий в градирню. Кроме того, в градирню поступает и циркуляционная техническая вода, охлаждающая конденсатор ПТ (рисунок 1).

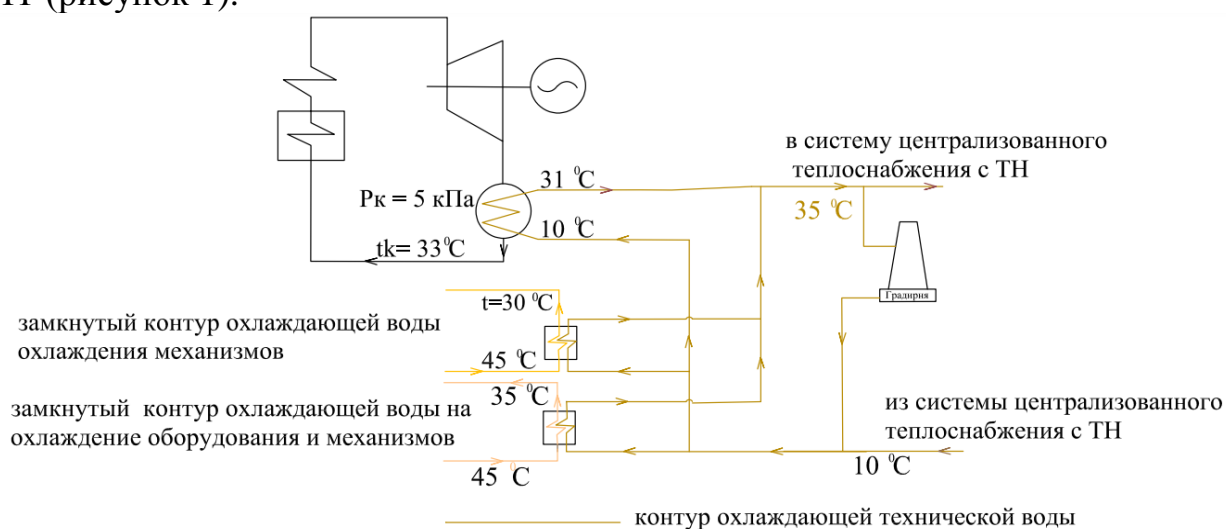


Рисунок 1 – Контур системы технического водоснабжения ТЭЦ

Предложено техническую воду из контура охлаждающей воды с температурой 35-40<sup>0</sup>С, минуя градирню, передавать в тепловые пункты потребителей, а охлажденную в тепловых насосах воду возвращать обратно (рисунок 2).

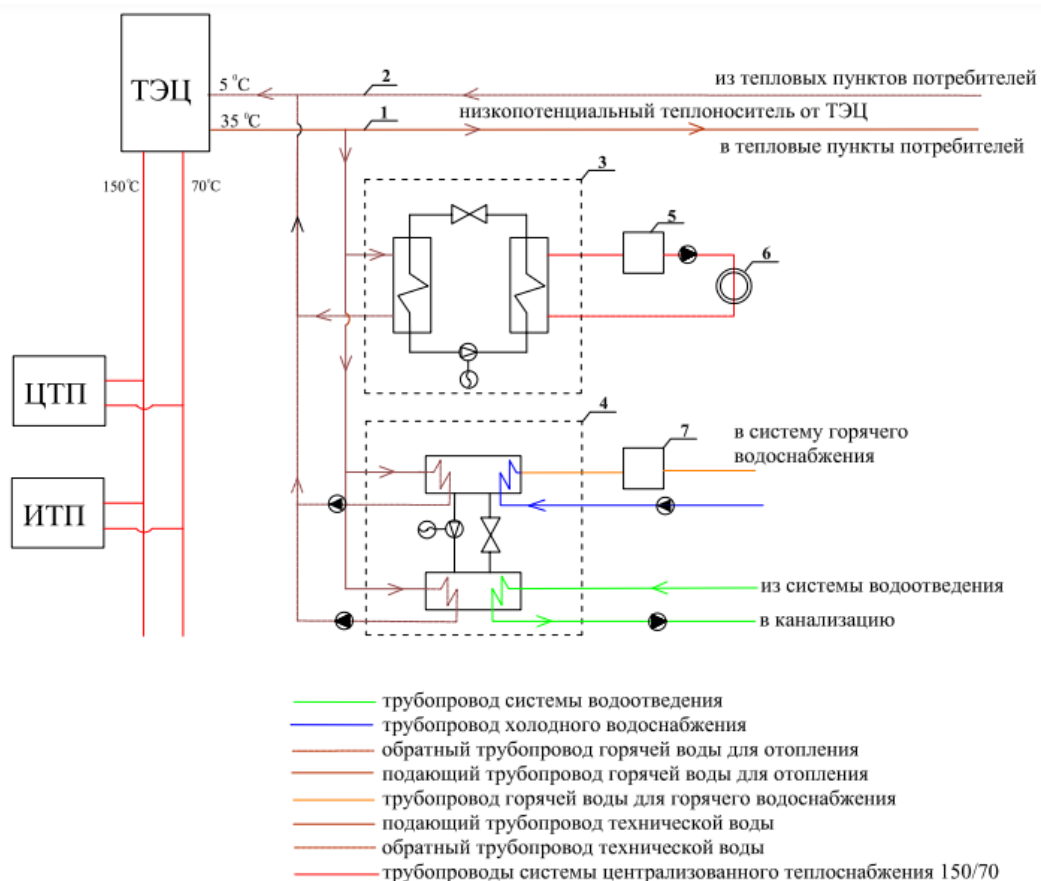


Рисунок 2 – Система централизованного теплоснабжения с тепловым насосом  
 1, 2 - прямой и обратный трубопроводы сетевой воды, 3, 4 – тепловой насос, 5 - бак-аккумулятор горячей воды системы отопления, 6 – потребители тепла, 7 - бак-аккумулятор горячей воды

Вода транспортируется по сетевому трубопроводу 1 до удаленных тепловых пунктов, оборудованных компрессионными тепловыми насосами, работающими на систему отопления (3) и горячего водоснабжения (4) потребителей. ТН использует полученную теплоту в качестве источника низкопотенциальной теплоты. На вход испарителя теплового насоса системы горячего водоснабжения преимущественно направляется вода бытовых стоков потребителя. Тепловой насос системы отопления может обеспечить подогрев воды в системе отопления до 95 °С, а контура системы ГВС до 60 °С.

Разработан способ оценки включения теплового насоса в систему централизованного теплоснабжения, основанный на изменении соотношения выработки электрической и тепловой энергии (Э) и коэффициенте использования теплоты топлива (КИТТ) на ТЭЦ. Предлагается ввести коэффициент, показывающий соотношение количества электроэнергии, которое не выработалось из-за отбора пара в турбине, к количеству выработанной тепловой энергии:

$$\mu_{\text{ТЭЦ}} = \frac{1}{\mathcal{E}} = \frac{\left( h_{\text{омб}}'' - h_{\text{омб}}' \right)}{\eta_{\text{oi}} \eta_{\text{м}} \eta_{\text{э}} \left( h_{\text{омб}}'' - h_{\text{к}} \right)}, \quad (1)$$



где  $h''_{омб}$  – энтальпия пара в отборе части низкого давления на сетевые подогреватели, кДж/кг;

$h'_{омб}$  – энтальпия конденсата после сетевых подогревателей, кДж/кг;

$h_k$  – энтальпия пара в конденсаторе паровой турбины, кДж/кг;

$\eta_{oi}, \eta_m, \eta_e$  – внутренний относительный, механический и электрический КПД паровой турбины.

Изменение выработки электроэнергии на тепловом потреблении ( $\Delta \mathcal{E}$ ) для системы теплоснабжения с использованием теплового насоса определяется выведенной зависимостью:

$$\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E} = \frac{\Delta N_{шт} - N_k + \Delta N_{тр}}{Q} - \frac{\Delta N}{Q_{уст}} = \frac{1}{Q_{уст}} \left( \frac{\Sigma Q_{тн} + Q_{тр} - Q'_{тр}}{\mu_{тэц}} - \frac{\Sigma Q_{тн}}{\mu_{тн}} - \Delta N_H \right) \frac{MBm}{MBm}, \quad (2)$$

где  $\Delta N_{шт}$  – изменение выработки электроэнергии за счет снижения отбора пара из турбины, МВт;

$\Delta N_{тр}$  – выработка электроэнергии за счет снижения тепловых потерь, МВт;

$\Delta N_k$  – затраты электроэнергии на работу ТН, МВт;

$\Delta N$  – изменение отпуска электроэнергии, МВт;

$Q$  – мощность потребителей тепла с учетом потерь в сетях, МВт;

$Q_{уст}$  – тепловая мощность теплофикационных отборов, МВт;

$Q_{тн}$  – выработка тепловой энергии тепловыми насосами, МВт;

$\mu_{тэц}$  – выработка тепла на электрическом потреблении паровой турбины;

$\mu_{тн}$  – коэффициент трансформации теплового насоса;

$Q_{тр}, Q'_{тр}$  – потери тепла в тепловых сетях без теплового насоса и с ним, МВт;

$\Delta N_H$  – разница в затратах электроэнергии на привод сетевых насосов за счет изменения расхода теплоносителя, МВт.

Изменение коэффициента использования теплоты топлива ( $\Delta \text{КИТТ}$ ) составит:

$$\Delta \text{КИТТ} = \frac{\Delta N}{B \cdot Q_H^P}, \quad (3)$$

где  $B$  – расход топлива на ТЭЦ, кг(м<sup>3</sup>)/с;

$Q_H^P$  – низшая рабочая теплота сгорания топлива, МДж/кг(м<sup>3</sup>)

Для упрощения расчетов предложено использовать разработанное эмпирическое уравнение определения коэффициента преобразования ТН в зависимости от разности температур в испарителе и конденсаторе (рисунок 3):

$$\mu_{тн} = 42,3 \cdot \Delta t^{-0,62}, \quad (4)$$

где  $\Delta t$  – разность температур фреона в испарителе и конденсаторе.

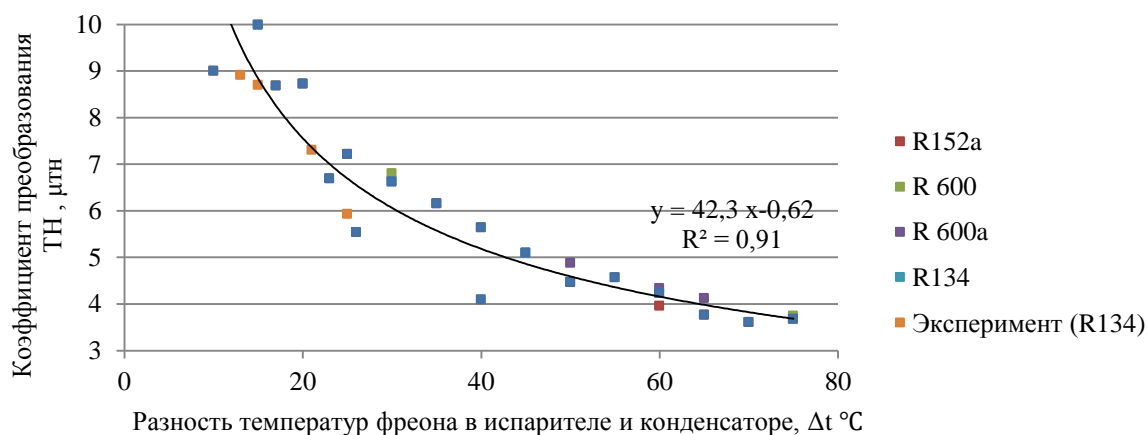


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента преобразования ТН ( $\mu_{тн}$ ) от температурного напора между испарителем и конденсатором ( $\Delta t$ )

Для подтверждения эффективности применения системы теплоснабжения с тепловыми насосами, использующими низкопотенциальную теплоту ТЭЦ, выполнено сравнение следующих вариантов теплоснабжения:

1 вариант системы теплоснабжения представляет собой подключение планировочного района г. Тюмени № 12 «Патрушевский» к существующей системе теплоснабжения от ТТЭЦ-2.

2 вариант предполагает передачу теплоносителя из подающего трубопровода существующей системе теплоснабжения от ТТЭЦ-2 с температурой 150 °C и возврат в магистральный трубопровод воды с температурой 30 °C. При этом в тепловом пункте потребителей установлен тепловой насос (способ теплоснабжения Стенина В.А.).

3 вариант предполагает передачу теплоносителя от ТТЭЦ-2 с температурой 100 °C и возврат в магистральный трубопровод воды с температурой 40 °C. При этом в тепловом пункте потребителей установлен тепловой насос (способ теплоснабжения Томилова В.Г.).

4 вариант предполагает передачу теплоносителя от ТТЭЦ-2 с температурой 40 °C и возврат воды с температурой 5 °C. При этом в тепловом пункте потребителей установлен тепловой насос (способ теплоснабжения Третьяковой П.А.).

5 вариант предполагает ввод в эксплуатацию новой водогрейной котельной, обеспечивающей тепловой энергией планировочный район г. Тюмени № 12 «Патрушевский».

Основные характеристики сравниваемых систем теплоснабжения представлены в таблице 1. Тепловая нагрузка потребителей для всех вариантов составляет 10,318 МВт, длина тепловой сети 5 км.

Основная проблема централизованного теплоснабжения заключается в протяжённости тепловых сетей и, как следствие, потери теплоты при транспортировке. Включение тепловых насосов в обратную магистраль снижает диаметры тепловой сети и температуру в обратном трубопроводе и позволяет снизить относительные тепловые потери на 7 %, применение ТН

для снижения температурного графика до уровня 100/40 снижает тепловые потери с 15% до 7% (рисунок 4).

Таблица 1 - Характеристика сравниваемых систем теплоснабжения

Показатели	1 вариант	2 вариант	3 вариант	4 вариант	5 вариант
Количество теплоты, вырабатываемой ТН, МВт	-	4,33	3,80	10,32	0
Требуемая теплота низкопотенциального теплоносителя (воды), МВт	-	2,97	2,60	6,92	-
Тип регулирования	качественное			качественно-количественное	качественное
Температура в подающем/обратном трубопроводе, °С	150/70	150/30	100/40	40/5	150/70
Расход воды, кг/с	30,78	17,85	31,11	15,86-55,05	30,78
Диаметр трубопровода, м	0,207	0,149	0,207	0,259	0,207
Скорость воды, м/с	0,91	1,02	0,92	1,04	0,91

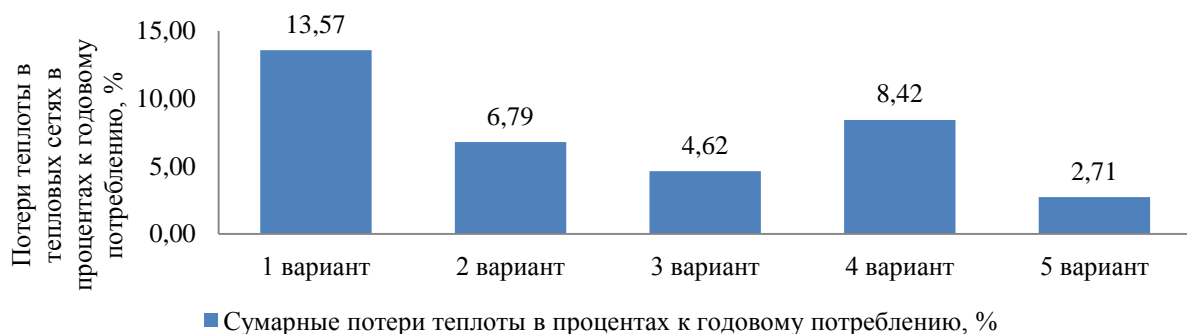


Рисунок 4 – Суммарные потери теплоты в тепловых сетях

На рисунке 5 представлены годовые затраты электроэнергии, потребляемой сетевыми насосами и тепловыми насосами. При применении ТН в системах теплоснабжения затраты электроэнергии значительно выше, чем в традиционном варианте теплоснабжения от ТЭЦ и котельной. Имеет место снижение потребления тепловой энергии или топлива.

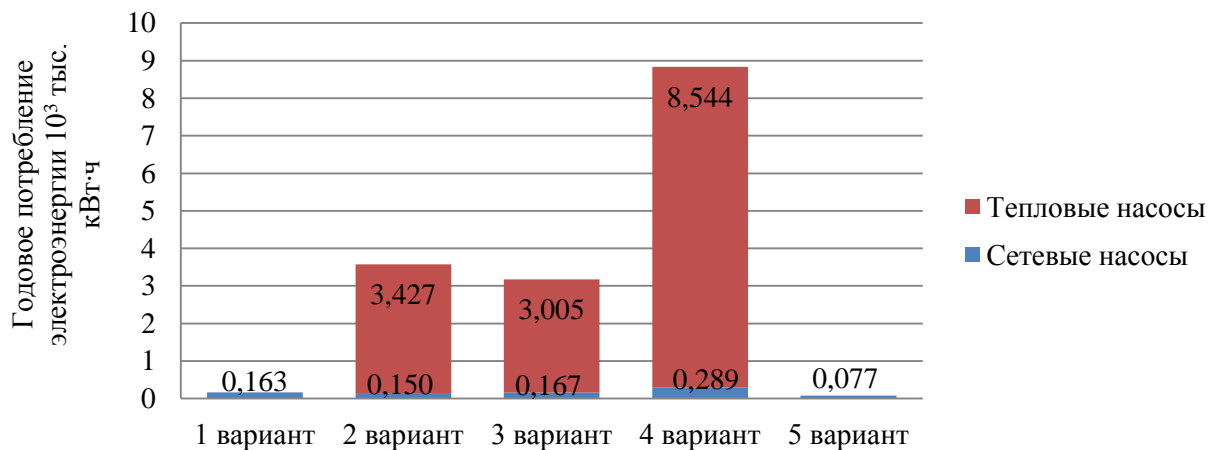


Рисунок 5 – Годовое потребление электроэнергии

Изменение отношения выработки электрической и тепловой энергии ТЭЦ увеличивается при применении тепловых насосов на ВЭР ТЭЦ (рисунок 6). При использовании в качестве источника низкопотенциального тепла теплоносителя, нагреваемого за счет отборов пара от турбины (вариант 2 и 3), роста не происходит.



Рисунок 6 – Изменение отношения выработки электрической и тепловой энергии

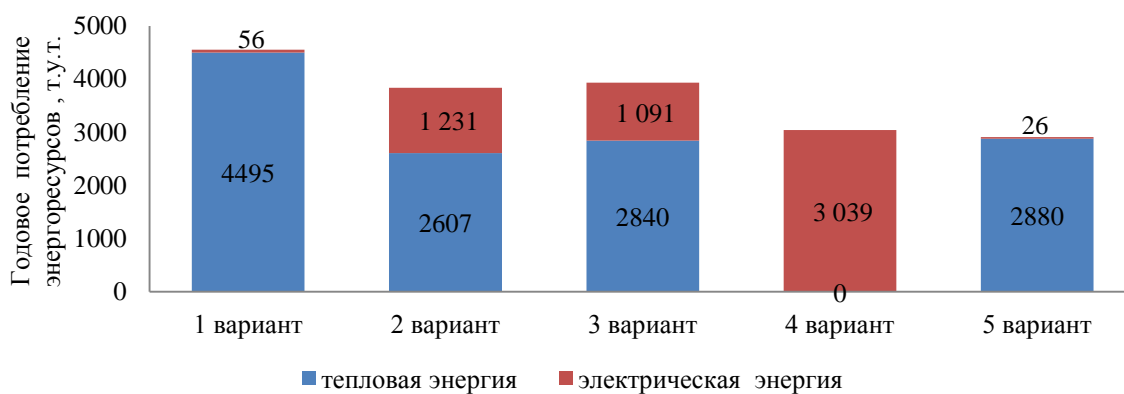


Рисунок 7 – Годовое потребление энергоресурсов в системах теплоснабжения

Потребление тепловой энергии от ТЭЦ или котельной в тоннах условного топлива (т.у.т.) превышает потребление электроэнергии (рисунок 7), следовательно, применение тепловых насосов повышает энергоэффективность систем теплоснабжения.

Для сравнения различных систем теплоснабжения на этапе согласования проектных решений приведена методика оценки их эффективности, основанная на четырех группах факторов. Эксперты в составе 10 человек оценили весовые коэффициенты факторов и значения входящих в них параметров.

Вес факторов оценивается по шкале от 0 до 10. При этом разрешается приписывать одну и ту же величину нескольким критериям. Критерий, в зависимости от вошедших в него параметров, принимает численную характеристику от 0 до значения, определенного экспертной группой. Полученные весовые коэффициенты групп факторов представлены в таблице 2. Способы определения значения критериев приведены в таблице 3. Критерии оцениваются в сравнении с несколькими вариантами по индексу отклонения, рассчитанного по правилу интерполяции.

Таблица 2 – Весовые коэффициенты групп факторов

Группа факторов	Весовые коэффициенты	Дисперсия оценок	Вариация
Технологические	0,304	0,00059	0,00728
Эксплуатационные	0,307	0,00062	0,00737
Экологические	0,214	0,00066	0,01093
Экономические	0,174	0,0012	0,0178

Таблица 3 – Определение значений критериев

Наименование показателя	Формула перевода в баллы
<b>Технологические факторы</b>	
Величина отклонения расчетного (фактического) значения толщины стенки от нормативного ( $\Delta\delta$ , %)	$3,7 - 3,7 \cdot \frac{\Delta\delta - \Delta\delta_{\min}}{\Delta\delta_{\max} - \Delta\delta_{\min}}$
Затраты энергоресурсов на выработку и передачу тепловой энергии ( $b$ , т.у.т./Гкал)	$4,6 - 4,6 \cdot \frac{b - b_{\min}}{b_{\max} - b_{\min}}$
Удельную величину компенсации теплового расширения, ( $\Delta l$ , м/Гкал)	$4,6 - 4,6 \cdot \frac{\Delta l - \Delta l^{\min}}{\Delta l^{\max} - \Delta l^{\min}}$
Величина отклонения расчетного (фактического) значения удельной плотности теплового потока от нормативного ( $\Delta q$ , %)	$4,3 - 4,3 \cdot \frac{\Delta q - \Delta q_{\min}}{\Delta q_{\max} - \Delta q_{\min}}$
<b>Эксплуатационные факторы</b>	
Среднечасовой расход сетевой воды, отнесенный к единице отпущенной тепловой энергии ( $g$ , т/Гкал)	$4,1 - 4,1 \cdot \frac{g - g_{\min}}{g_{\max} - g_{\min}}$
Удельный расход электрической энергии, используемой при передаче тепловой энергии ( $\mathcal{E}_{TP}$ , кВт·ч/Гкал)	$7,4 - 7,4 \cdot \frac{\mathcal{E}_{TP} - \mathcal{E}_{TP}^{\min}}{\mathcal{E}_{TP}^{\max} - \mathcal{E}_{TP}^{\min}}$
Потери давления на главной ветке тепловой сети, ( $P$ , Па)	$7,4 - 7,4 \cdot \frac{P - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}}$
Разность температур воды в подающем и обратном трубопроводах ( $\Delta\tau$ , °С)	$6,3 \cdot \frac{\Delta\tau - \Delta\tau_{\min}}{\Delta\tau_{\max} - \Delta\tau_{\min}}$
Удельная тепловая нагрузка на один км. трассы тепловых сетей ( $Q_L$ , Гкал/ч/км)	$9,1 \cdot \frac{Q_L - Q_L^{\min}}{Q_L^{\max} - Q_L^{\min}}$
Доля потерь тепловой энергии с утечками теплоносителя от годового потребления тепловой энергии ( $q_{ym}$ , Гкал/Гкал)	$6,5 - 6,5 \cdot \frac{q_{ym} - q_{ym}^{\min}}{q_{ym}^{\max} - q_{ym}^{\min}}$
Доля потерь тепловой энергии через изоляцию тепловой сети от годового потребления тепловой энергии ( $q_{uz}$ , Гкал/Гкал)	$6,2 - 6,2 \cdot \frac{q_{uz} - q_{uz}^{\min}}{q_{uz}^{\max} - q_{uz}^{\min}}$
<b>Экологические факторы</b>	
Удельная площадь, занимаемая сетями и сооружениями с учетом санитарно-защитной зоны, на тепловую нагрузку потребителей ( $f_c$ , га/Гкал/ч)	$3,6 - 3,6 \cdot \frac{f_c - f_c^{\min}}{f_c^{\max} - f_c^{\min}}$

Наименование показателя	Формула перевода в баллы
Удельная площадь, занимаемая техническими зонами, на тепловую нагрузку потребителей ( $f_t$ , га/Гкал/ч)	$4,7 - 4,7 \cdot \frac{f_t - f_t^{\min}}{f_t^{\max} - f_t^{\min}}$
Удельный расход сточных вод, содержащих минеральные соли, на одну 1 Гкал потребленного тепла ( $g_{ст}$ , м <sup>3</sup> /Гкал)	$5,7 - 5,7 \cdot \frac{g_{ст} - g_{ст}^{\min}}{g_{ст}^{\max} - g_{ст}^{\min}}$
Удельная материальная характеристика трубопровода ( $m$ , м·м/Гкал/ч)	$6,6 - 6,6 \cdot \frac{m - m_{\min}}{m_{\max} - m_{\min}}$
Удельные тепловые потери в окружающую среду ( $q_{mn}$ , Гкал/Гкал)	$4,9 - 4,9 \cdot \frac{q_{mn} - q_{mn}^{\min}}{q_{mn}^{\max} - q_{mn}^{\min}}$
<b>Экономические факторы</b>	
Удельные капитальные вложения в тепловую сеть ( $KB_{уд}$ , тыс. руб/Гкал)	$6,2 - 6,2 \cdot \frac{KB_{уд} - KB_{уд}^{\min}}{KB_{уд}^{\max} - KB_{уд}^{\min}}$
Удельные эксплуатационные затраты в тепловую сеть ( $ЭК_{уд}$ , тыс. руб/Гкал)	$6,8 - 6,8 \cdot \frac{ЭК_{уд} - ЭК_{уд}^{\min}}{ЭК_{уд}^{\max} - ЭК_{уд}^{\min}}$
Удельная длина тепловой сети, ( $l_{уд}$ , м/Гкал/ч)	$7 - 7 \cdot \frac{l_{уд} - l_{уд}^{\min}}{l_{уд}^{\max} - l_{уд}^{\min}}$
Примечание: min – минимальное, max – максимальное значение показателя.	

Результат применения данного способа к рассматриваемым четырем вариантам централизованного теплоснабжения приведен на рисунке 8.

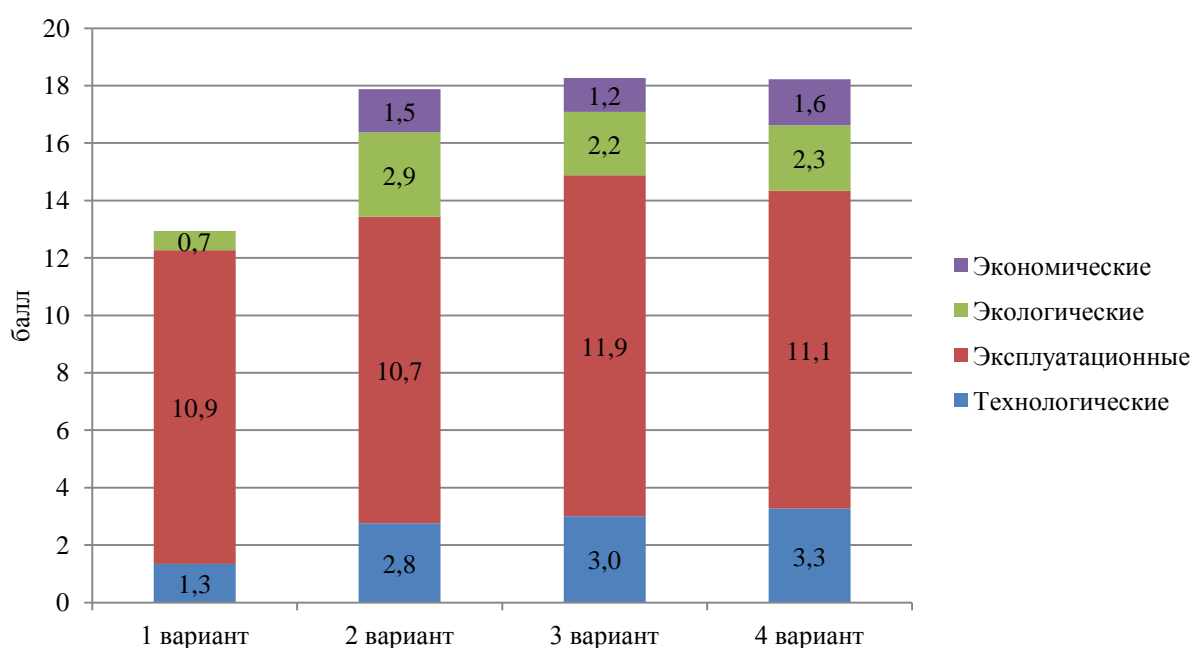


Рисунок 8 – Результаты оценки систем теплоснабжения

Рост экспертных технологических показателей при применении ТН обоснован: сокращением расхода энергоресурсов на выработку тепловой энергии т.у.т./Гкал, снижением металлоемкости тепловых сетей и уменьшением числа компенсаторов. Экспертные эксплуатационные показатели системы централизованного теплоснабжения на базе ТЭЦ имеет низкое значение, связанное с высокими потерями тепловой энергии через изоляцию трубопроводов, с утечкой теплоносителя и с высокой значимостью эксплуатационных показателей по оценке экспертов. Применение тепловых насосов способствует снижению потребления ресурсов и снижению тепловых потерь в окружающую среду. Низкое значение экспертных экономических показателей системы централизованного теплоснабжения без ТН обоснованы высокими эксплуатационными затратами.

Разработанная методика позволяет оценить эффективность системы теплоснабжения, исключив субъективный фактор, и может быть применен теплоснабжающими организациями для согласования схемы теплоснабжения.

**Третья глава** посвящена разработке методики выбора трассы тепловой сети, основанной на экспертной оценке, с учетом влияния ситуационных факторов на этапе проектирования централизованных систем теплоснабжения.

В основе разработанной методики лежат **критерии сложности**, объединенные в 3 группы:

**1. Воздействие окружающей среды и близлежащих объектов на износ трубопровода:** коррозионная активность грунтов и оснований, коррозионная активность параллельно идущих и пересекаемых коммуникаций и сетей.

**2. Совмещение с другими инженерными системами:** наличие подземного тоннеля или эстакады с сетями водоснабжения, силовыми кабельными линиями, кабелями связи и управления, сетей напорной и самотечной канализации и т.д.

**3. Стоимость проведения строительных и ремонтных работ:** стесненные условия жилой и промышленной застройки, препятствия в виде оврагов, водных преград, скальных и обводненных грунтов и т.п.

При определении трассы прокладки тепловых сетей предложено все влияющие объекты отобразить на структурированной сетке. Каждая ячейка сетки имеет одинаковый размер и характеризует участок земли по одному из приведенных выше факторов. В результате появляется сетка с числовыми значениями, определяющими влияние этого фактора на трассу тепловой сети на конкретном участке.

Для расчёта трассы необходимо из множества  $N$  растровых карт получить одну путем поэлементного объединения (рисунок 9):

$$c_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^N w_k} \sum_{k=1}^N w_k \cdot a_{ij}^k, \quad (5)$$

где  $c_{ij}$  – значение  $ij$  ячейки на единой (результатирующей) карте;

$a_{ij}^k$  – значение ячейки с индексом  $ij$  на  $k$ -й карте характеризующей один фактор;  
 $w_k$  – весовой коэффициент  $k$ -й карты характеризующей один фактор.



Рисунок 9 – Ситуационная карта расположения 12 планировочного района г. Тюмень с указанием вариантов трасс тепловых сетей

Тепловую сеть можно представить в виде дерева, корнем которого является источник тепла, а вершинами – тепловые пункты. Сумма длин ребер покажет сложность предлагаемой системы. Чем меньше сложность, тем более привлекательна система теплоснабжения для дальнейшего рассмотрения. Для получения и проведения анализа такого дерева можно воспользоваться теорией оптимизации на графах. Все полученные трассы добавляются во множество  $P$ .

При выборе оптимальной трассы по показателю совокупных приведенных затрат рекомендовано учитывать сложность трассы, определенную на основе экспертной оценки.

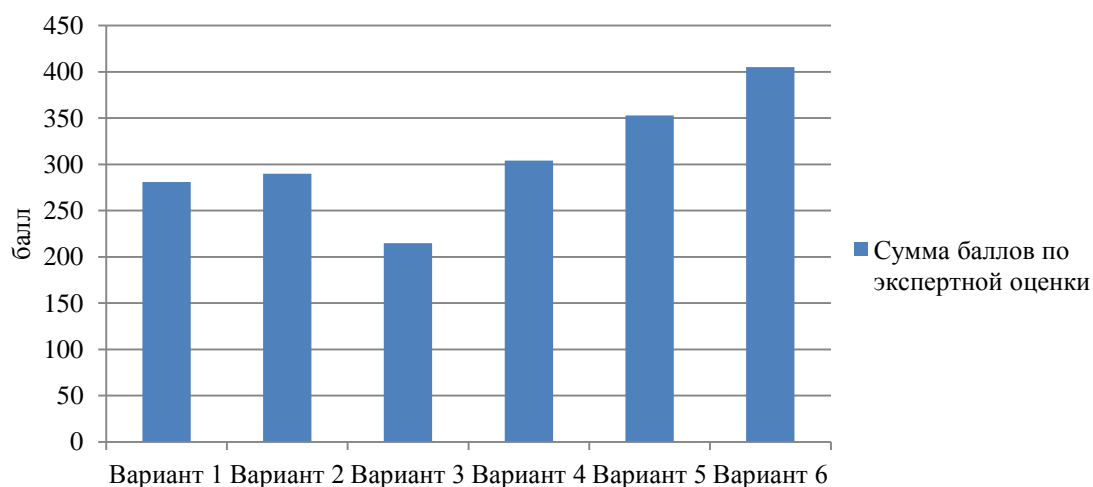


Рисунок 10 – Сравнительная характеристика рассматриваемых вариантов прокладки тепловых сетей



В работе рассмотрены схемы прокладки тепловых сетей от ТЭЦ 2 до 12-го планировочного района г. Тюмени. Результаты сравнения шести вариантов прокладки тепловых сетей представлены на рисунке 10.

Из рисунка 10 видно, что с учетом мнения экспертов наиболее приемлемым является третий вариант прокладки тепловой сети от источника до теплового пункта.

**Глава 4** посвящена технико-экономической оценке системы теплоснабжения с применением тепловых насосов. Для расчета эффективности системы теплоснабжения с тепловыми насосами разработана программа в среде Microsoft Excel, которая позволяет определить оптимальный диаметр трубопроводов путем сравнения чистого дисконтированного дохода (далее - NPV) при переходе на систему теплоснабжения с тепловыми насосами при различных диаметрах. Алгоритм определения чистой дисконтированной прибыли представлен на рисунке 11.

Для предварительной оценки эффективности применения ТН, использующих вторичные энергоресурсы (далее – ВЭР) ТЭЦ, и определения оптимального диаметра трубопровода предложена аналитическая зависимость чистой приведенной стоимости от длины трубопровода ( $l$ , м), диаметра трубопровода ( $d$ , м) и тепловой нагрузки группы потребителей ( $q$ , МВт).

Все факторы в ходе полного факторного эксперимента варьированы на двух уровнях, соответствующих значениям кодированных переменных +1 и –1 (таблица 4).

Таблица 4 – Кодирование факторов

Обозначение	Параметр	Мин. значение	Макс. значение	Ед. изм.	Середины диапазонов	Шаг варьирования
x1	d	300	420	мм	360	60
x2	L	5	10	км	7,5	2,5
x3	q	12	17	Гкал/час	14,5	2,5

Модель ограничена стоимостью электроэнергии в г. Тюмени, стоимостью трубопроводов и теплоизоляции, стоимостью монтажных работ, стоимостью теплового насоса и температурой грунта.

С помощью приведенного выше алгоритма проведена технико-экономическая оценка применения тепловых насосов, использующих сбросную теплоту ТЭЦ в городе Тюмени, при использовании тепловых насосов НТ-3000 и получена следующая зависимость NPV, млн. руб.:

$$NPV = -248495 + 1247 \cdot d - 4178 \cdot l + 10610 \cdot q - 1,59 \cdot d^2 - 55,684 \cdot l^2 - 162,576 \cdot q^2 \quad (6)$$

Используя зависимость чистой приведенной стоимости, можно определить рациональный диаметр тепловой сети при заданной удаленности потребителей и их нагрузки. Например, при нагрузке потребителей 10,318 МВт и удаленности от ТЭЦ в 5 км рациональный диаметр трубопровода от

ТЭЦ составляет 390 мм, при этом NPV при замене существующего источника тепла составляет 77,374 млн. руб.

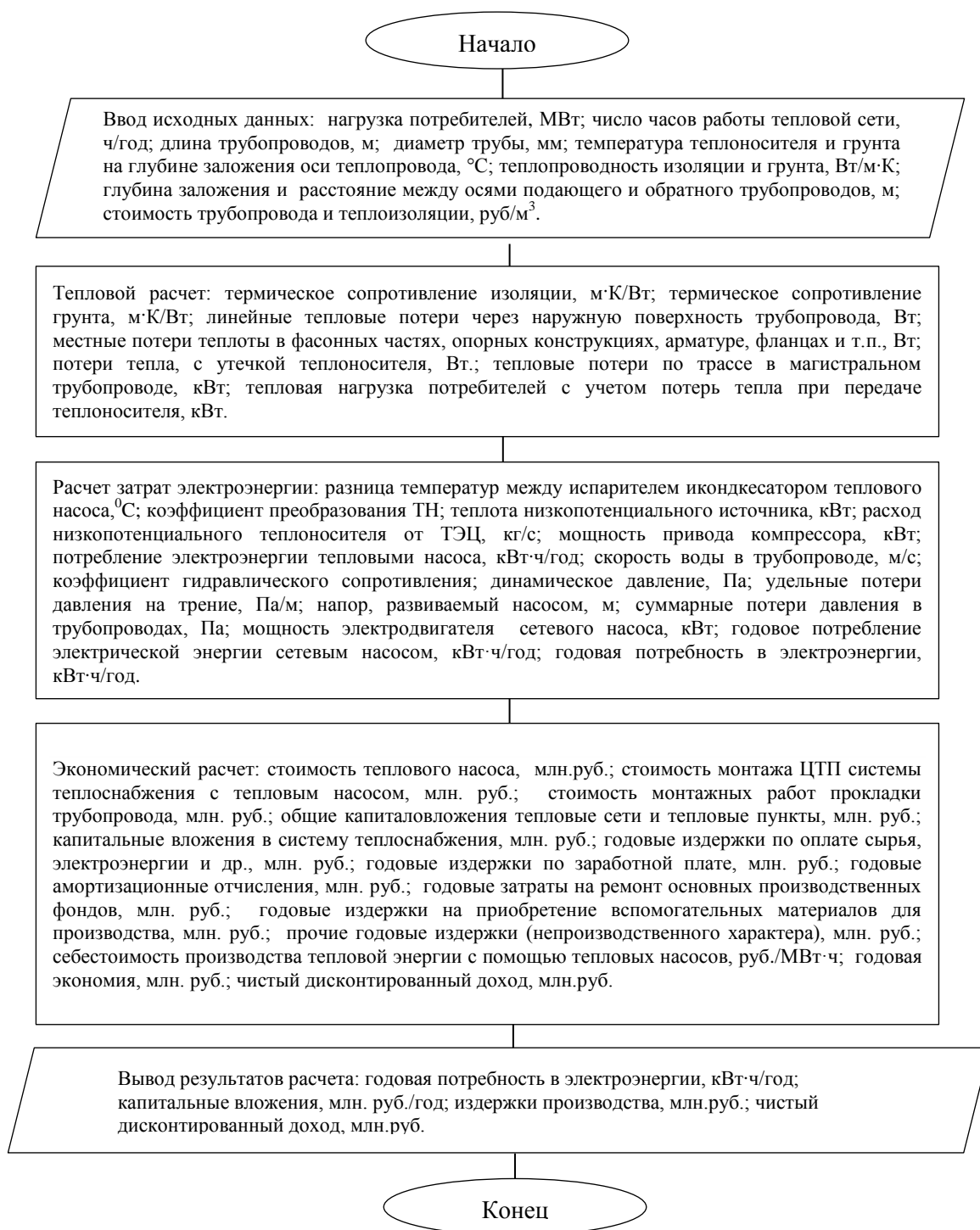


Рисунок 11 – Алгоритм определения чистой дисконтированной прибыли при применении тепловых насосов

Результат экономического сравнения различных систем теплоснабжения, описанных во второй главе, приведен в таблице 5. Затраты на тепловую энергию от ТЭЦ и от котельной превышают затраты на покупку электроэнергии (рисунок 12), что говорит об экономичности применения ТН для потребителей.

Таблица 5 – Экономические показатели систем теплоснабжения

Показатели	1 вариант	2 вариант	3 вариант	4 вариант	5 вариант
Стоимость тепловых насосов, млн. руб	0	9,53	8,36	22,71	0
Капиталовложения в тепловые сети и тепловые пункты, млн. руб	28,47	17,16	19,88	11,46	6,49
Приведенные капитальные вложения, млн. руб	1,938	1,852	1,951	2,394	3,008
Годовые затраты на покупку электроэнергии энергии, млн. руб	0,407	8,945	7,930	22,083	0,191
Затраты на покупку тепла ТЭЦ, млн. руб	37,2	21,6	23,5	0	23,8
Себестоимость тепла, отданного потребителем, руб/Гкал	1790	1507	1548	1215	1232
Экономия, млн. руб/год		6,4	5,8	12,1	12,2
Чистый дисконтированный доход (NPV), млн. руб		14,5	8,7	43,3	35,1
Суммарные дисконтированные затраты, млн. руб		7 079	6 738	14 158	14 940
Дисконтированный срок окупаемости (DPP)		11,8	21,2	5,8	8,4

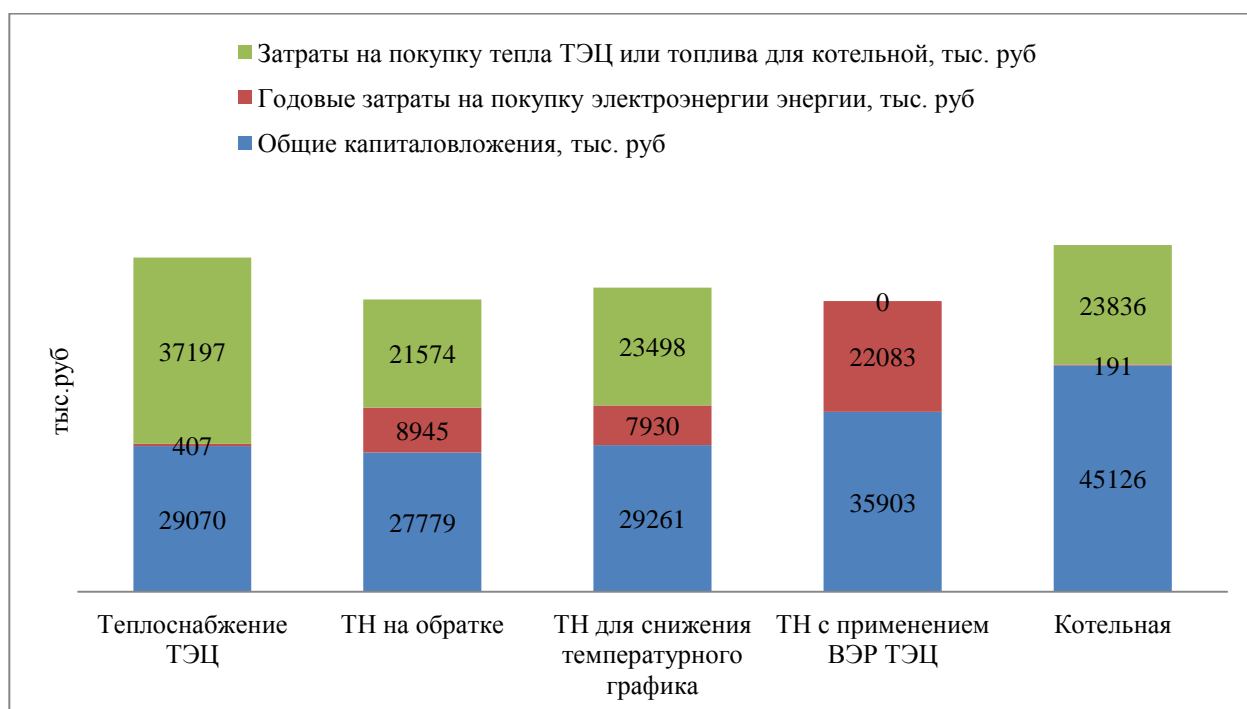


Рисунок 12 – Затраты в различные системы теплоснабжения

Дисконтированный срок окупаемости предлагаемой системы централизованного теплоснабжения за счет утилизации сбросной низкопотенциальной теплоты ТЭЦ составляет около 6 лет и значительно отличается от сроков окупаемости других рассматриваемых вариантов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Выполнен обзор систем теплоснабжения с применением тепловых насосов. Большинство авторов предлагают использовать обратную сетевую воду в качестве источника низкопотенциальной теплоты или снижать температуры в подающем и обратном трубопроводе за счет применения ТН, что не всегда является рациональным решением. Проведен сравнительный анализ источников низкопотенциальной теплоты (ИНТ) на ПГУ-ТЭЦ и показана возможность их применения в тепловых насосах.

2. Разработана и запатентована система теплоснабжения, включающая ТЭЦ, соединенную трубопроводом сетевой воды с удаленными тепловыми пунктами, причем каждый тепловой пункт оборудован тепловым насосом системы отопления и тепловым насосом системы горячего водоснабжения. При этом по трубопроводу передается вода с температурой 40 °С, нагретая от тепловых вторичных энергоресурсов ТЭЦ. Выполнено сравнение разработанной системы теплоснабжения с четырьмя прочими системами при климатических параметрах, характерных для г. Тюмени, при подземной бесканальной прокладке и определена возможность ее применения при значительных потерях в тепловых сетях при допустимой удалённости потребителя теплоты. При нагрузке потребителей 10,318 МВт и протяженности тепловых сетей 5 км расчетные тепловые потери трубопроводов в системе теплоснабжения с температурным графиком 150/70 составляют 14 %.

Применение тепловых насосов и снижение температуры воды в подающем трубопроводе до 100 °С, а в обратном до 30 °С позволяет снизить это значение до 5 %. При передаче потребителю тепловых ВЭР ТЭЦ тепловые потери трубопроводов составляют 8 % от мощности потребителей, но нет необходимости компенсировать данные потери за счет сжигания природного топлива.

3. Предложены эмпирические зависимости, позволяющие исследовать изменение коэффициента использования теплоты топлива и удельной выработки электроэнергии на ТЭЦ за счет применения ТН в тепловых пунктах потребителей. Зависимости основаны на сравнении коэффициента трансформации теплового насоса и коэффициента, показывающего соотношение количества электроэнергии, невыработанной из-за отбора пара в турбине, к количеству выработанной тепловой энергии ТЭЦ. Учитывается выработка тепловой энергии тепловыми насосами, потери теплоты при транспорте теплоносителя и изменение отпуска электроэнергии. В результате появляется возможность оценить минимальный коэффициент трансформации теплового насоса, при котором их применение в тепловых пунктах потребителей эффективно влияет на технико-экономические показатели ТЭЦ. Достичь роста коэффициента использования теплоты топлива и удельной выработки электроэнергии на ТЭЦ возможно только при применении вторичных энергоресурсов в качестве источника низкопотенциальной теплоты (в рассматриваемом примере на 0,1 кВт/кВт). Предложена

аналитическая зависимость чистой дисконтированной прибыли при применении тепловых насосов, утилизирующих ВЭР ТЭЦ от длины трубопровода, диаметра трубопровода и тепловой нагрузки группы потребителей, позволяющая определять выгодный диаметр трубопроводов системы теплоснабжения с тепловыми насосами, использующими сбросное тепло ТЭЦ Тюмени. При правильно выбранном диаметре трубопроводов достигаются баланс между затратами электроэнергии на транспорт теплоносителя, тепловыми потерями трубопроводов и капитальными вложениями при применении низкотемпературных тепловых сетей.

4. Предложена методика выбора трассы тепловых сетей на основе построения минимального дерева, корнем которого является источник тепла. При этом минимальным является не просто наикратчайшее расстояние между тепловыми пунктами, а численное значение, названное критерием сложности. Критерий сложности определяется на основе структурированной сетки как сумма значений ячеек, соответствующих месту прокладки трубопровода. Значения ячеек определяются по трем группам факторов: воздействие окружающей среды и близлежащих объектов на износ трубопровода, возможность совмещения с другими инженерными системами и показатели, влияющие на стоимость проведения ремонтных работ. Методика применяется ООО «Смарт инжиниринг» при согласовании проектных решений.

5. Предложена методика оценки эффективности существующих схем тепловой сети с учетом технологических, эксплуатационных, экологических и экономических групп факторов. В основе методики лежит утверждение, что с уменьшением расхода топлива и электроэнергии на выработку и транспортировку тепловой энергии, с уменьшением количества теряемой тепловой энергии при транспорте теплоносителя, со снижением нагрузки на окружающую среду и снижением капитальных и эксплуатационных затрат эффективность системы теплоснабжения увеличивается.

**Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования:** исследование способов снижения затрат электроэнергии на сжатие фреона в тепловых насосах.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:**

1. Степанов, О.А.. Возможность применения тепловых насосов на тюменской ТЭЦ-1/ О.А. Степанов, **П.А. Третьякова** // Энергосбережение и водоподготовка. – 2020. – № 1. – С.12-16.

2. **Третьякова, П.А.** Показатели эффективности применения тепловых насосов в системе централизованного теплоснабжения/ П.А. Третьякова, А.А. Меньшикова, Т.В. Третьякова // Энергосбережение и водоподготовка. – 2020. – № 2. – С.17-21.

3. **Третьякова, П.А.** Выбор трассы тепловой сети // Энергосбережение и водоподготовка. – 2023. – № 2. – С.37-44.

4. **Третьякова, П.А.** Критерии оценки эффективности системы теплоснабжения // Энергосбережение и водоподготовка. – 2023. – № 2. – С.64-69.

5. **Третьякова, П.А.** К вопросу оценки применения тепловых насосов в централизованной системе теплоснабжения // Энергосбережение и водоподготовка. – 2023. – № 3. – С.62-67.

#### Патент:

6. Пат. 2571361 Российская Федерация, МПКF24D 11/02, F01K17/02. Система централизованного теплоснабжения, горячего и холодного водоснабжения / **Третьякова П.А.**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тюменский государственный архитектурно-строительный университет". – № 2014141144/12; заявл. 13.10.2014; опубл. 13.10.2014, Бюл. № 18. – 6 с.

#### Публикации, индексируемые Web of Science и Scopus:

7. **Tretyakova, P.A.** The comparison of thermal insulation materials for a process pipeline/Tretyakova, P.A., Stepanov, O.A., Tretyakova, T.V// Materials Science Forum 927 MSF. – 2018. – P. 176-182

8. **Tretyakova, P.** The effectiveness of heat pumps as part of CCGT-190/220 Tyumen CHP-1 / Tretyakova, P// MATEC Web Conf. XV International Conference "Topical Problems of Architecture, Civil Engineering, Energy Efficiency and Ecology . – 2016. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1051/matecconf/20167302016>

9. Stepanov, O. Centralized Heating System with Heat Pumps / Stepanov, O., **Tretyakova, P.**//MATEC Web of Conferences 73, 2016 XV International Conference "Topical Problems of Architecture, Civil Engineering, Energy Efficiency and Ecology – 2016". – 2016. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1051/matecconf/20167302016>

10. **Tretyakova, P.** Assessment of heat pump efficiency for microclimate formation in a greenhouse/ P. Tretyakova//International scientific conference on energy, environmental and construction engineering (EECE-2018) electronic edition. Сер. "MATEC Web of Conferences" . – 2018. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201824506017>

11. **Tretyakova, P.** Heat supply system in the areas remote from the centralized source: the case of Tyumen /Tretyakova, P.// International Science and Technology Conference "EastConf". – 2019. - Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/334850185\\_Heat\\_Supply\\_System\\_in\\_the\\_Areas\\_Remote\\_from\\_the\\_Centralized\\_Source\\_The\\_Case\\_of\\_Tyumen](https://www.researchgate.net/publication/334850185_Heat_Supply_System_in_the_Areas_Remote_from_the_Centralized_Source_The_Case_of_Tyumen)

12. **Tretyakova, P.** Improving energy efficiency at compressor stations using waste heat boilers at gas turbine plants . /Tretyakova, P., Germanova T.V., Tretyakova T.V.// Conference Series: Earth and Environmental Science, 990 (2022) 012052. – 2022. – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/990/1/012052/pdf>

**Статьи, опубликованные в других журналах и изданиях:**

13. **Третьякова П.А.** Эффективность систем теплоснабжения/ П.А. Третьякова, С.Е. Глазкова. // Современные проблемы энергетики. – Тюмень: ТИУ, - 2022. - С.97 – 101.

14. **Третьякова П.А.** Возможность применения тепловых насосов в системе теплоснабжения г. Тюмени/ П.А. Третьякова, О.А. Степанов // Современные задачи инженерных наук: сборник научных трудов VI-ого Международного научно-технического Симпозиума «Современные энерго- и ресурсосберегающие технологии СЭТТ - 2017». – Москва: ФГБОУ ВПО МГУДиТ, - 2017. - С. 240 – 245.

15. Степанов, О.А., Централизованная система теплоснабжения с тепловыми насосами/ О.А. Степанов, **П.А. Третьякова**, Б.Г. Аксенов, А.Ф. Шаповал, // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2016. – № 4. – С. 113-119.

16. **Третьякова П.А.** Выбор рабочих агентов для тепловых насосов систем отопления / П.А. Третьякова, А.А. Дедун // Сборник материалов XV научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, соискателей и магистрантов ТюмГАСУ. – Тюмень, ФГБОУ ВПО ТюмГАСУ, - 2015.- С. 116 – 121.

17. Степанов О.А. **Третьякова П.А.** Система централизованного теплоснабжения с применением тепловых насосов / О.А. Степанов, **П.А. Третьякова** // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. – Том 1. №4 (4). – С.43-51

18. **Третьякова П.А.**, Энергосбережение на курганской ТЭЦ-2 за счет утилизации низкопотенциальной теплоты // Омский научный вестник, 2014. – № 2 (130). - С. 182-185.

19. **Третьякова, П.А.**, Современные подходы к модернизации централизованного теплоснабжения на основе внедрения теплонасосных установок // Омский научный вестник, 2014. – № 2 (130). – С. 178-182.