

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»



На правах рукописи

БАНИКОВА Светлана Андреевна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ ЗА СЧЕТ УТИЛИЗАЦИИ
ТЕПЛОВЫХ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ**

Специальность: 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент Захаров Вадим Михайлович

ИВАНОВО – 2022

Реферат

Диссертация 149 стр., 56 рис., 19 табл., 120 библ.

Система теплоснабжения, тепловые сети, утилизация тепловой энергии, устройство по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы, математическая модель

Объектом исследования является устройство по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы, предназначенное для предельного сокращения (вплоть до исключения) удельных линейных тепловых потерь в тепловых сетях.

Целью работы является повышение эффективности систем теплоснабжения промышленных предприятий за счет применения устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы.

Проведен обзор источников информации для оценки существующих методов повышения эффективности системы транспорта тепловой энергии. Определен потенциал энергосбережения в тепловых сетях. Предложено и описано устройство по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы. Получены экспериментальные данные, позволяющие оценить влияние теплоотражающих экранов на процесс переноса теплоты в сети теплоснабжения. Разработаны математические модели теплопереноса в тепловой сети без дополнительных элементов, тепловой сети с теплоотражающим экраном и тепловой сети при ее совместной работе с предлагаемым устройством, на основе которых определена доля тепловых потерь, которую допустимо утилизировать. Разработана инженерная методика расчета параметров устройства.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	11
1.1 Оценка потенциала энергосбережения в сетях централизованных систем теплоснабжения промышленных предприятий.....	12
1.2 Анализ современных технических решений по сокращению удельных линейных тепловых потерь в сетях теплоснабжения.....	26
1.3 Сетевые тепловые потери как источник низкопотенциальной энергии для работы трансформатора теплоты.....	35
1.4 Постановка цели и задач исследования.....	38
1.5 Выводы по первой главе.....	39
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В КАНАЛЕ ТЕПЛОТРАССЫ.....	40
2.1 Цель и задачи экспериментального исследования.....	40
2.2 Описание экспериментальной установки.....	40
2.3 Условия проведения эксперимента и экспериментальные данные.....	44
2.4 Математическая обработка результатов эксперимента.....	48
2.5 Выводы по второй главе.....	56
ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ И УСТРОЙСТВА ПО УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В КАНАЛЕ ТЕПЛОТРАССЫ.....	57
3.1 Описание объектов исследования.....	58
3.2 Математические модели процессов теплообмена в тепловой сети.....	59
3.3 Верификация математических моделей.....	67
3.4 Численное моделирование процессов теплообмена в тепловой сети	74

3.5 Оценка влияния работы устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы на тепловой режим работы тепловой сети.....	83
3.6 Исследование эффективности работы теплоотражающего экрана	90
3.7 Выводы по третьей главе.....	92
ГЛАВА 4. ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ	93
4.1 Методика расчета устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы.....	93
4.1.1 <i>Определение расчетной температуры теплоносителя в коллекторе устройства.....</i>	94
4.1.2 <i>Определение расчетных условий.....</i>	97
4.1.3 <i>Определение поверхности теплообмена коллектора устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы.....</i>	99
4.1.4 <i>Определение параметров работы теплового насоса.....</i>	108
4.2 Регулирование работы устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы.....	108
4.3 Методика определения экономических показателей эффективности реконструкции тепловых сетей на базе предлагаемого устройства.....	110
4.4 Практическое применение устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы.....	120
4.4.1 <i>Установка теплоотражающего экрана и коллектора в канале теплотрассы.....</i>	120
4.4.2 <i>Варианты практического применения устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы.....</i>	122
4.5 Выводы по четвертой главе.....	124
Заключение.....	125
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	127
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	140
Приложение 1. Документы, подтверждающие практическую реализацию результатов работы	141
Приложение 2. Объекты интеллектуальной собственности.....	144

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день повышение эффективности энергетических объектов, в частности, систем теплоснабжения является одним из приоритетных направлений развития Российской Федерации, что подтверждено рядом законодательных актов, такими как, ФЗ-261 «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», ФЗ-190 «О теплоснабжении», «Энергетическая стратегия России на период до 2035» и прочими.

Система теплоснабжения принципиально представляет собой совокупность трех взаимосвязанных элементов: источника, потребителя и коммуникаций в виде тепловых сетей.

Эффективность систем централизованного теплоснабжения напрямую зависит от качества тепловых сетей, обусловленного многими факторами, среди которых, потери тепловой энергии через изоляцию трубопроводов и накопленный к настоящему времени моральный и физический износ, что свидетельствует о необходимости принятия мер по повышению энергетической эффективности, модернизации и технологическому развитию тепловых сетей.

Снижение тепловых потерь через изоляцию трубопроводов в существующих системах теплоснабжения представляет собой актуальную задачу.

Настоящая диссертационная работа направлена на разработку и исследование технического решения, предназначенного для предельного сокращения, вплоть до исключения, удельных линейных тепловых потерь в тепловых сетях. Данное техническое решение предназначено для повышения эффективности работы тепловых сетей в нормальных условиях, не предусматривающих увлажнения изоляции, нарушение ее целостности и изменение ее теплофизических свойств.

Таким образом, актуальным является решение задачи по повышению эффективности тепловых сетей путем применения запатентованного устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы, включая разработку

инженерной методики его расчета на основе математического описания процессов теплообмена внутри канала теплотрассы.

Степень разработанности темы диссертации. Проблемам повышения энергетической эффективности тепловых сетей за счет сокращения тепловых потерь через изоляцию трубопроводов посвящены труды сотрудников кафедры теплогазоводоснабжения Юго-Западного государственного университета: Кобелева Н.С., Емельянова С.Г., Алябьевой Т.В., разработавших инновационную конструкцию канальной теплосети. Вопросы повышения надежности транспорта тепловой энергии затронуты в работах Ванькова Ю.В. из Казанского государственного энергетического университета. Кроме того, Моисеевым В.И. и Тувальбаевым Б.Г. предложена контактная конструкция трубопроводов, позволяющая уменьшить габаритные размеры тепловой сети и сократить тепловые потери в окружающую среду. Возможности использования потенциала температурного поля вокруг теплопроводов в целях утилизации неизбежно теряемой теплоты посвящена работа Голяка С.А. и Сикерина И.Е. Однако указанный этими авторами вариант утилизации тепловых потерь имеет ограниченное применение. Возможности использования тепловой энергии теплотрасс для повышения эффективности системы теплоснабжения посвящена диссертационная работа Марченко А.В. Автор диссертации предлагает воздух, загрязненный на автомагистралях, пропускать через подземный канал теплотрассы и затем направлять его в топки котлов, тем самым повышая эффективность системы теплоснабжения. Подобное решение с неизбежностью вызовет увеличение тепловых потерь.

Анализ предлагаемых решений показывает, что в настоящий момент вопрос предельного сокращения, вплоть до исключения, тепловых потерь в тепловых сетях не рассматривается.

Целью диссертации является повышение эффективности систем теплоснабжения промышленных предприятий за счет применения устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**:

1) Определение потенциала энергосбережения в тепловых сетях и анализ существующих методов повышения эффективности их работы.

2) Разработка и создание экспериментальной установки для исследования процессов переноса теплоты в тепловых сетях с теплоотражающими экранами.

3) Проведение экспериментального исследования для оценки влияния теплоотражающих экранов на процесс переноса теплоты в сети теплоснабжения и проверки адекватности математических моделей.

4) Разработка математических моделей переноса тепловой энергии в элементах сетей теплоснабжения различных конструкций и проведение численных расчетов с применением специализированного программного обеспечения, направленных на определение доли тепловых потерь, которую допустимо утилизировать.

5) Разработка инженерной методики расчета устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы и методики оценка экономической эффективности его применения.

Научная новизна работы обусловлена следующим:

1. Разработан способ повышения эффективности системы теплоснабжения на базе оригинального устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы, позволяющий обеспечить сбережение энергетических ресурсов за счет возврата в систему теплоснабжения теряемой тепловой энергии в месте установки устройства.

2. На основе разработанных математических моделей процессов теплообмена в сетях теплоснабжения различных конструкций определена допустимая доля тепловых потерь, которую можно утилизировать при сохранении теплового режима сети и прилегающего к ней грунта.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что проведенные исследования позволили определить долю тепловых потерь сети теплоснабжения, которую допустимо использовать в устройстве по утилизации тепловых

потерь в канале теплотрассы, и выявить основные факторы, влияющие на эффективность работы теплоотражающих экранов в тепловой сети.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработано новое техническое устройство, обеспечивающее повышение эффективности работы тепловых сетей систем теплоснабжения промышленных предприятий, предложен способ регулирования этого устройства и инженерная методика его расчета. Данное устройство может быть использовано при реконструкции введенных в эксплуатацию тепловых сетей, а также при проектировании и прокладке новых тепловых сетей промышленных предприятий. Результаты работы могут быть рекомендованы к включению в учебный процесс и к реализации в рамках энергосберегающих мероприятий на объектах различного назначения.

Методология и методы исследований. В работе использованы методы: математического моделирования теплоэнергетического оборудования; экспериментального исследования процессов теплообмена; математической обработки экспериментальных данных; балансовых расчетов энергетических установок; экономического анализа эффективности инвестиционных проектов.

Степень достоверности полученных результатов подтверждаются использованием апробированных программных средств моделирования теплоэнергетического оборудования; совпадением в пределах погрешности результатов расчета с экспериментальными данными; согласованностью отдельных результатов исследования с результатами, полученными другими авторами.

Положения, выносимые на защиту:

1. Техническое решение по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы.
2. Результаты экспериментального исследования по определению влияния теплоотражающих экранов на величину тепловых потерь.
3. Результаты численного моделирования процессов теплообмена в тепловых сетях различных конструкций в программном комплексе Comsol Multiphysics.

4. Инженерная методика расчета устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы и способ его регулирования.

Реализация результатов работы подтверждена актами внедрения и проведена по следующим направлениям:

1) Техническое решение принято в ООО «Ивановская тепловая электростанция» (г. Иваново) для сокращения транспортных потерь тепловой энергии в тепловых сетях. За счет реализации технического решения предполагается также увеличить тепловую нагрузку на источник путем бесконтактного подсоединения абонентов, сократив тем самым затраты на реконструкцию тепловых сетей и наладку режимов их эксплуатации.

2) Результаты работы внедрены в учебный процесс ИГЭУ на кафедре «Энергетика теплотехнологий и газоснабжение».

Личное участие автора в получении результатов работы заключается в определении цели и задач исследования, выборе информационной базы; в разработке элементов устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы; в разработке и реализации в программном комплексе Comsol Multiphysics математических моделей работы тепловой сети различных конструкций; в создании экспериментальной установки, проведении натурального эксперимента по определению эффективности работы теплоотражающих экранов и обработке полученных экспериментальных данных; в разработке инженерной методики расчета устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы и способа регулирования его работы; в разработке методики оценки экономической эффективности предлагаемого устройства; в подготовке публикаций по тематике исследования.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XVI, XVII, XVIII, XIX, XX и XXI международных научно-технических конференциях «Бенардосовские чтения» (Иваново, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019 и 2021 гг.); Конференция молодых ученых «Инновационные проекты молодых ученых» (2011-2019 гг.); Конкурсе «Умник», проводимого в рамках V Ивановского инновационного конвента

«Образование. Наука. Инновации» (Иваново, 2015); 9-я Международная школа-семинар молодых ученых и специалистов "Энергосбережение – теория и практика" (Москва, 2018).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 25 работах, в том числе в 2 статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК; 18 тезисах и полных текстах докладов конференций. Получено 4 патента на полезную модель и 1 свидетельство на программу ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения по работе, списка использованных источников из 120 наименований. Текст диссертации изложен на 149 стр. машинописного текста, содержит 56 рисунков, 19 таблиц и 2 приложения.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Важным направлением повышения эффективности объектов энергетики в Российской Федерации является создание условий для рационального использования энергетических ресурсов. Для этого разработан ряд законодательных актов [1-3], нашедших отражение в региональных программах в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Источником экономии ресурсов в системах теплоснабжения могут стать системы транспортировки теплоносителя.

Проблемы эффективности системы транспорта тепловой энергии определяются следующими обстоятельствами [4 -10]:

- высоким уровнем тепловых потерь;
- избыточной централизацией систем теплоснабжения, которая обуславливает завышение нормативных потерь на 5-10%;
- высокой степенью износа тепловых сетей и превышением критического уровня частоты отказов;
- неудовлетворительным техническим состоянием тепловых сетей, нарушением тепловой изоляции и, связанными с этим, высокими значениями потерь тепловой энергии;
- нарушением гидравлических режимов тепловых сетей.

Одним из факторов, снижающим эффективность систем теплоснабжения, являются тепловые потери через изоляцию трубопроводов тепловой сети [11]. Снижение или исключение такого рода потерь в существующих системах теплоснабжения представляет собой актуальную задачу.

Необходимо отметить, что нормативные потери тепловой энергии в тепловых сетях сами по себе имеют довольно высокие значения [105], но

существуют также факторы, приводящие к сверхнормативным потерям. Эти факторы можно разделить на две основные группы [11, 12]:

- эксплуатация теплопроводов с увлажненной тепловой изоляцией (в предельном случае – в условиях затопления), связанной с большой водопроницаемостью железобетонных элементов каналов из-за негерметичной заделки стыков стенок и перекрытий [13, 14] и утечками воды, прорывами трубопроводов, а также авариями в системах водоснабжения и водоотведения [15-17], неизбежно приводящими к увлажнению теплоизоляционного слоя;
- работа теплопроводов в условиях морального и физического старения тепловой изоляции, связанная с тем, что большинство эксплуатируемых в настоящее время теплотрасс были введены в эксплуатацию несколько десятков лет назад [18].

Одним из перспективных путей повышения эффективности сетей теплоснабжения является реализация энергосберегающих мероприятий, позволяющих утилизировать тепловые потери, которые по своей сути являются тепловыми вторичными энергоресурсами ВЭР, и, таким образом, наиболее полно использовать энергию, произведенную на источнике.

В конечном итоге увеличение эффективности использования первичной энергии за счет утилизации тепловых ВЭР позволяет повысить производительность систем теплоснабжения в целом или сократить расход топлива.

В настоящей главе определен потенциал энергосбережения в сетях теплоснабжения в нормальных условиях их работы, а также проанализированы имеющиеся способы сокращения потерь теплоты в тепловых сетях.

1.1 Оценка потенциала энергосбережения в сетях централизованных систем теплоснабжения промышленных предприятий

По данным Федеральной службы государственной статистики на 28 марта 2022 года потери тепловой энергии в системе теплоснабжения

составляют 12,3% от количества поданной в систему энергии [4]. В таблице 1 показана актуальная информация о состоянии систем теплоснабжения в Российской Федерации. При этом реальные потери в тепловых сетях по мнению экспертов могут достигать 30% [19].

Реальное состояние систем теплоснабжения возможно оценить на основе статистических данных, отраженных в информационно-аналитических докладах ФГБУ «Российского энергетического агентства» Минэнерго РФ «Централизованное теплоснабжение России в 2014-2018г.г.» [20] и «О состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в 2019г.» [21]. Анализируя эти документы в контексте тепловых потерь, можно сказать, что динамика снижения потерь в тепловых сетях не соответствует показателям Комплексного плана (рисунок 1). Комплексный план мероприятий по повышению энергетической эффективности экономики Российской Федерации предусматривает реализацию мероприятий, обеспечивающих повышение энергетической эффективности экономики Российской Федерации, в отношении предприятий промышленности, регулируемых организаций, организаций с государственным участием, организаций бюджетной сферы, многоквартирных домов [22]. Согласно [19], к 2025 году потери тепловой энергии в тепловых сетях должны быть сокращены на 3,2%, а к 2030 году на 5,6% по отношению к значению тепловых потерь, равному 12,6% в 2016 году. При этом под потерями тепловой энергии понимается разность между количеством поданной в сеть тепловой энергии и количеством потребленного тепла.

Таким образом, цель сокращения тепловых потерь по фактическим данным официальной статистики не достигается.

В качестве одной из причин роста потерь в докладе Минэнерго России [21] указана структура российских теплосетей по диаметрам трубопроводов (рисунок 2). В структуре тепловых сетей различных диаметров основную долю по протяженности занимают сети диаметром до 200 мм. Сети такого диаметра трубопроводов имеют наибольшие потери, поскольку на малых диаметрах доля потерь выше, чем на больших. Кроме того, весомыми причинами

увеличения потерь, указанными в данном документе, являются старение тепловых сетей, низкие темпы их обновления, недостаточное применение современных энергоэффективных технологий.

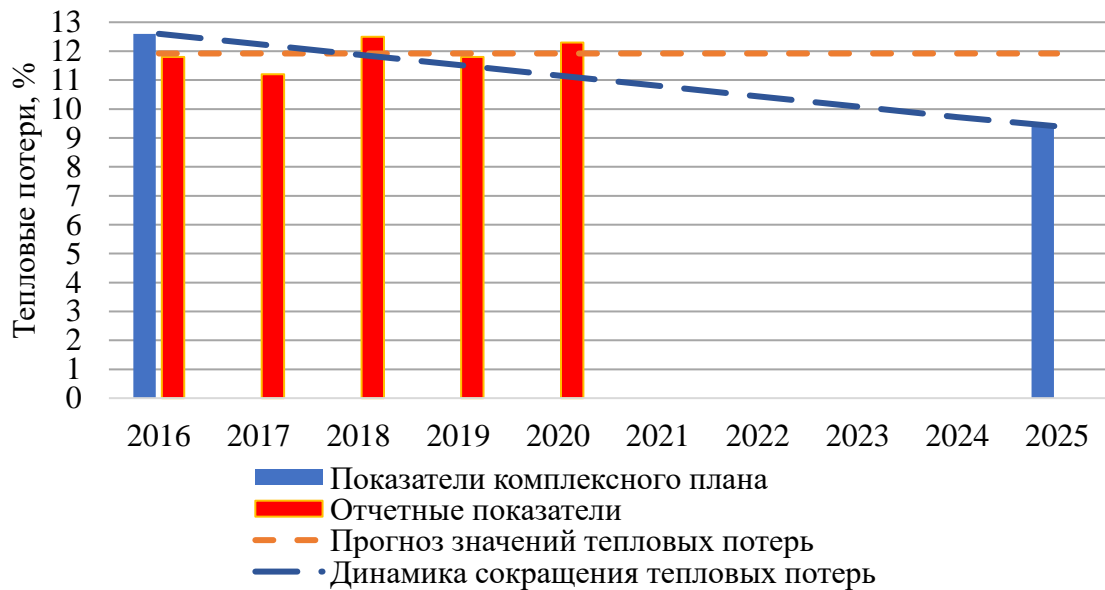


Рисунок 1 – Соответствие динамики снижения тепловых потерь в сетях теплоснабжения показателям Комплексного плана

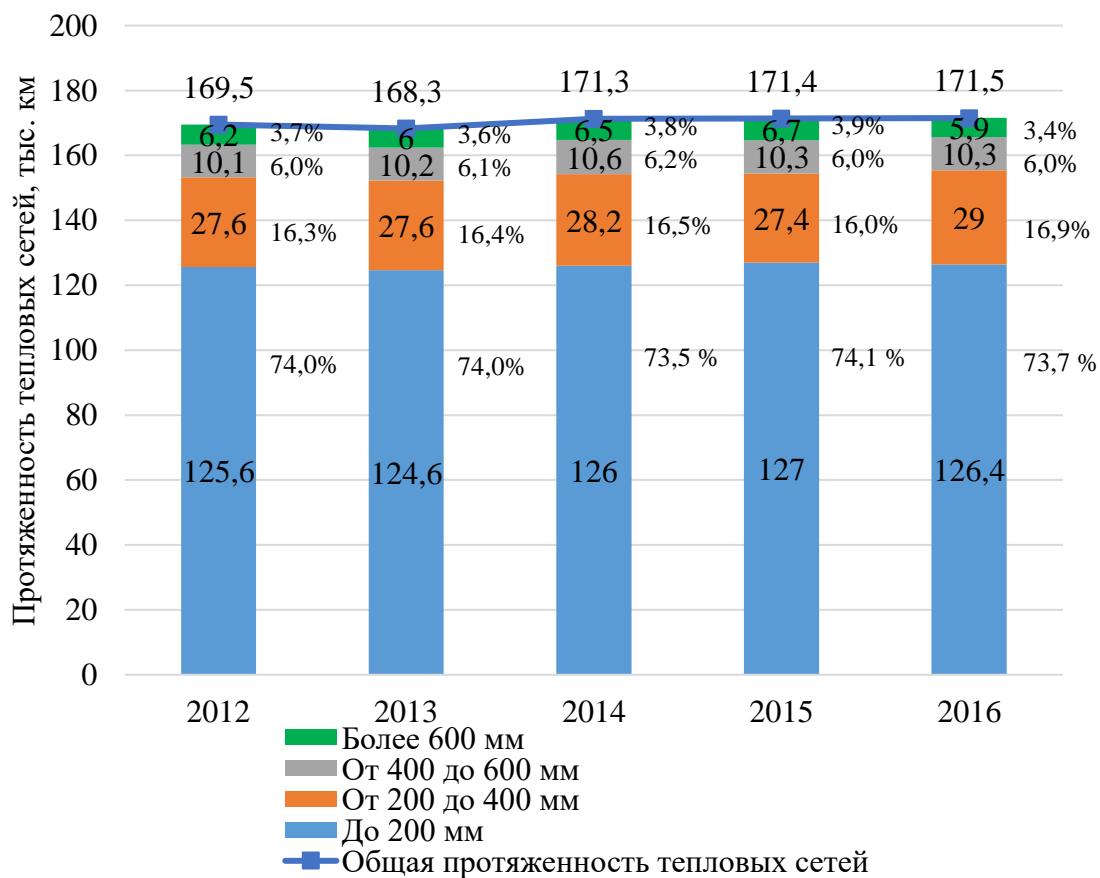


Рисунок 2 – Протяженность тепловых сетей по диаметрам трубопроводов в двухтрубном исчислении в 2012-2016 годы, тыс. км

Таблица 1 – Теплоснабжение населенных пунктов в России (статистические данные на 28.03.2022)

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Число источников теплоснабжения (на конец года), тыс.	73,1	73,9	73,5	73,9	75,2	76,0	73,8	74,9	74,8	76,7	77,3
Удельный вес котельных мощностью до 3 Гкал/ч в общем числе котельных, процентов	76	77	77	77	77	77	77	78	78	77	77
Суммарная мощность источников теплоснабжения, тыс. Гкал/ч	581,8	578,9	579,4	567,3	590,3	609,2	592,4	587,9	582,2	583,0	575,8
Протяженность тепловых и паровых сетей в двухтрубном исчислении - всего, км	171275,9	169913,2	169524,7	168336,6	171270,1	171448,4	171541,8	169456,0	168342,1	168308,6	167395,9
Протяженность тепловых и паровых сетей в двухтрубном исчислении, нуждающихся в замене - всего, км	47998,9	48578,0	49106,5	48119,2	48988,9	49852,6	49479,0	49562,4	48700,7	51579,3	51506,8
Число аварий на источниках теплоснабжения, паровых и тепловых сетях - всего	14584	10660	9397	8082	6782	5799	5738	5055	4312	4803	4411
Потери тепла в сетях, в процентах от подачи тепла	10,6	10,7	10,8	10,9	11,4	11,1	11,8	11,2	12,5	11,8	12,3
в городской местности	10,5	10,6	10,7	10,8	11,3	10,9	11,6	11,0	12,4	11,7	12,1
в сельской местности	11,2	11,4	12,1	12,4	13,0	13,8	14,5	14,2	14,6	13,6	14,5

Из приведенного анализа следует, что состояние тепловых сетей в России требует принятия решений по повышению их энергетической эффективности.

Проведенная в работах [23, 24] оценка температурных полей внутри канала теплотрассы и в прилегающем к нему грунте, говорит о высокой потенциальной возможности энергосбережения в тепловых сетях.

Для обоснования целесообразности проведения энергосберегающих мероприятий в тепловых сетях централизованных систем теплоснабжения необходимо оценить энергетический потенциал тепловых потерь. Для достижения поставленной цели в работе были определены расчетные значения тепловых потерь в тепловых сетях системы централизованного теплоснабжения, а также температура воздуха внутри канала теплотрассы в течение отопительного периода при соответствующих среднемесячных температурах наружного воздуха и грунта.

Расчеты были выполнены для наиболее распространенной в городах Центральной России, на примере города Иваново, закрытой двухтрубной системы теплоснабжения с подземной прокладкой в непроходных каналах при различных температурных графиках работы систем теплоснабжения. Диаметр подающего и обратного трубопроводов варьировался в диапазоне от 50 до 400 мм. Определение линейных тепловых потерь канала теплотрассы производилось по заданной толщине изоляционного слоя, принятой в соответствии с [25, 26] для климатических параметров города Иваново [27].

Глубина залегания непроходного канала принята равной 1,6 м, расчет геометрических размеров канала выполнен в соответствии с рекомендациями, приведенными в нормативной документации [28] в зависимости от внутреннего диаметра подающего и обратного трубопроводов. Изоляция трубопроводов выполнена из пенополиуретана в полиэтиленовой оболочке, с коэффициентом теплопроводности равным $0,035 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ [26, 29]. Преобладающим видом грунта является суглинок со средним влагосодержанием $0,27 \text{ кг/кг}$ и расчетной теплопроводностью $1,86 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ [26]. В расчетах также были учтены потери

теплоты через теплопроводные включения в теплоизоляционных конструкциях, обусловленные наличием в них крепежных деталей и опор [30].

На рисунках 3... 8 показан характер изменения значений тепловых потерь и температуры воздуха в канале теплотрассы в течение отопительного периода на примере трубопроводов диаметром 50, 200 и 400 мм.

Полученные расчетным путем значения линейных тепловых потерь позволили построить номограммы, показанные на рисунках 9... 12, позволяющие определять линейные потери тепловой энергии в тепловых сетях и температуру воздуха в канале теплотрассы для различных диаметров трубопроводов и температурных графиков работы сети.

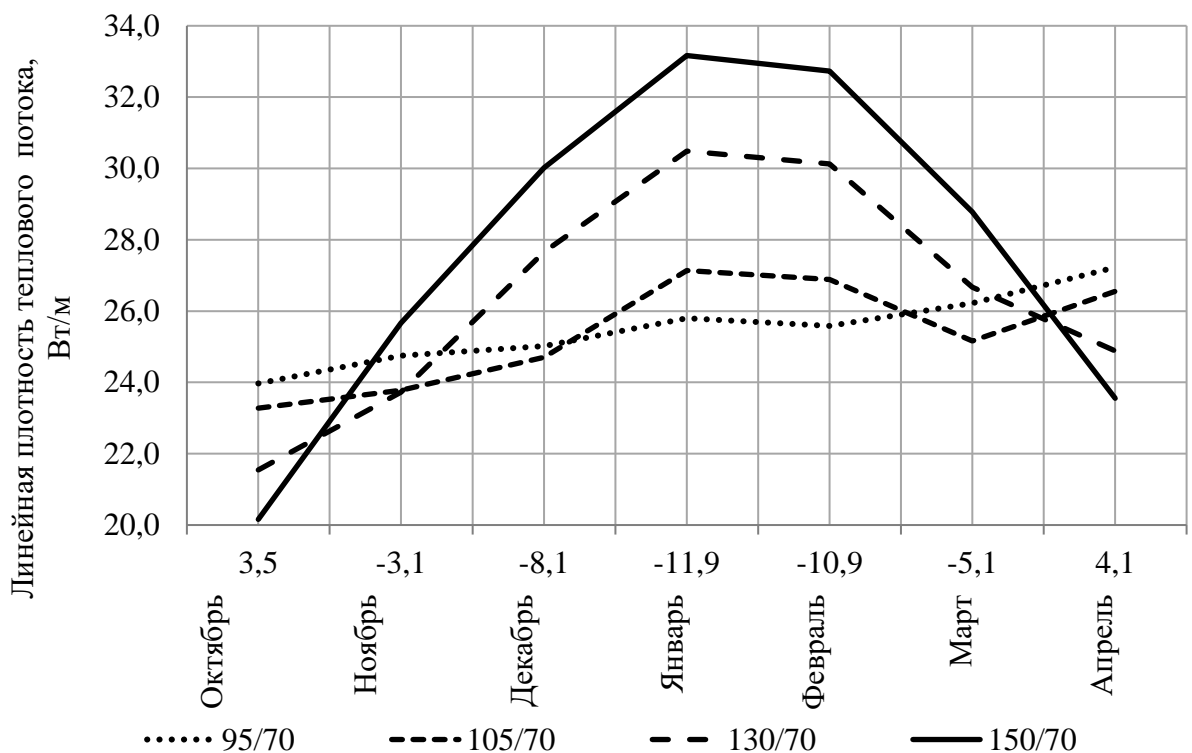


Рисунок 3 – Зависимость линейной плотности теплового потока от температуры наружного воздуха при диаметре трубопровода 50 мм

Значения средних за отопительный период величин плотности теплового потока (линейных тепловых потерь) в сетях теплоснабжения представлены в таблице 2.

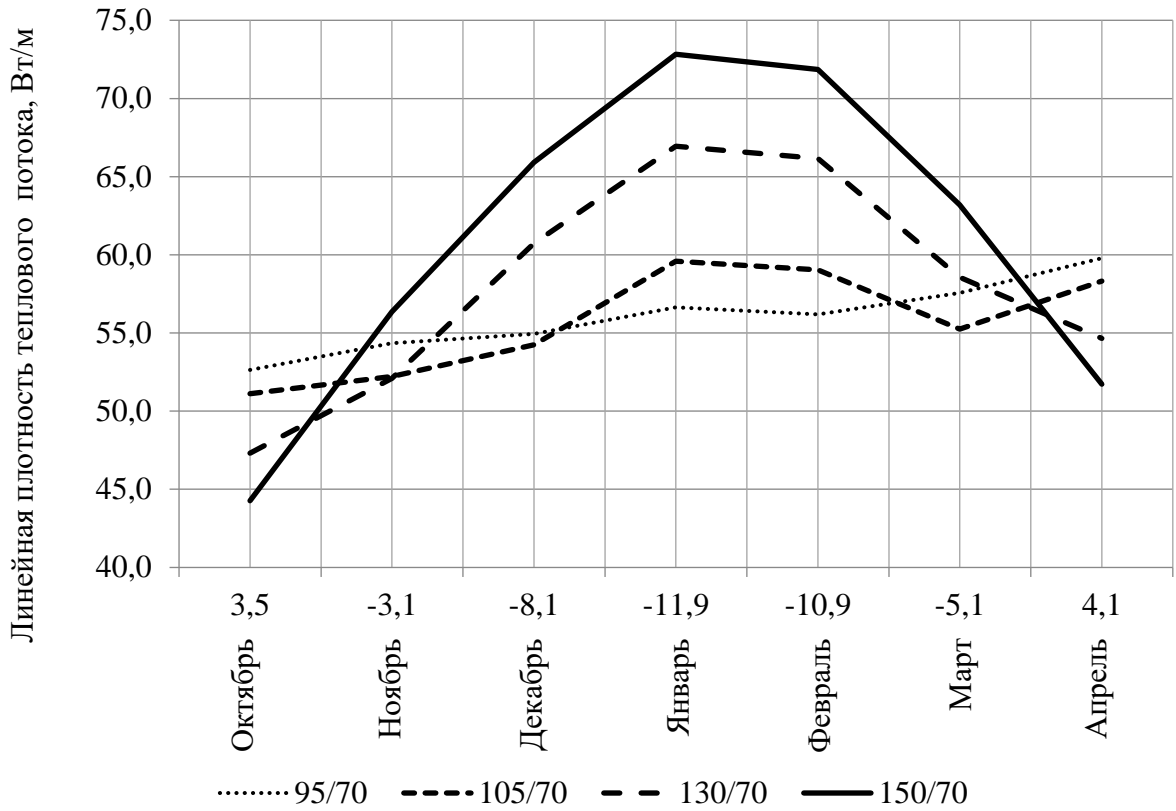


Рисунок 4 – Зависимость линейной плотности теплового потока от температуры наружного воздуха при диаметре трубопровода 200 мм

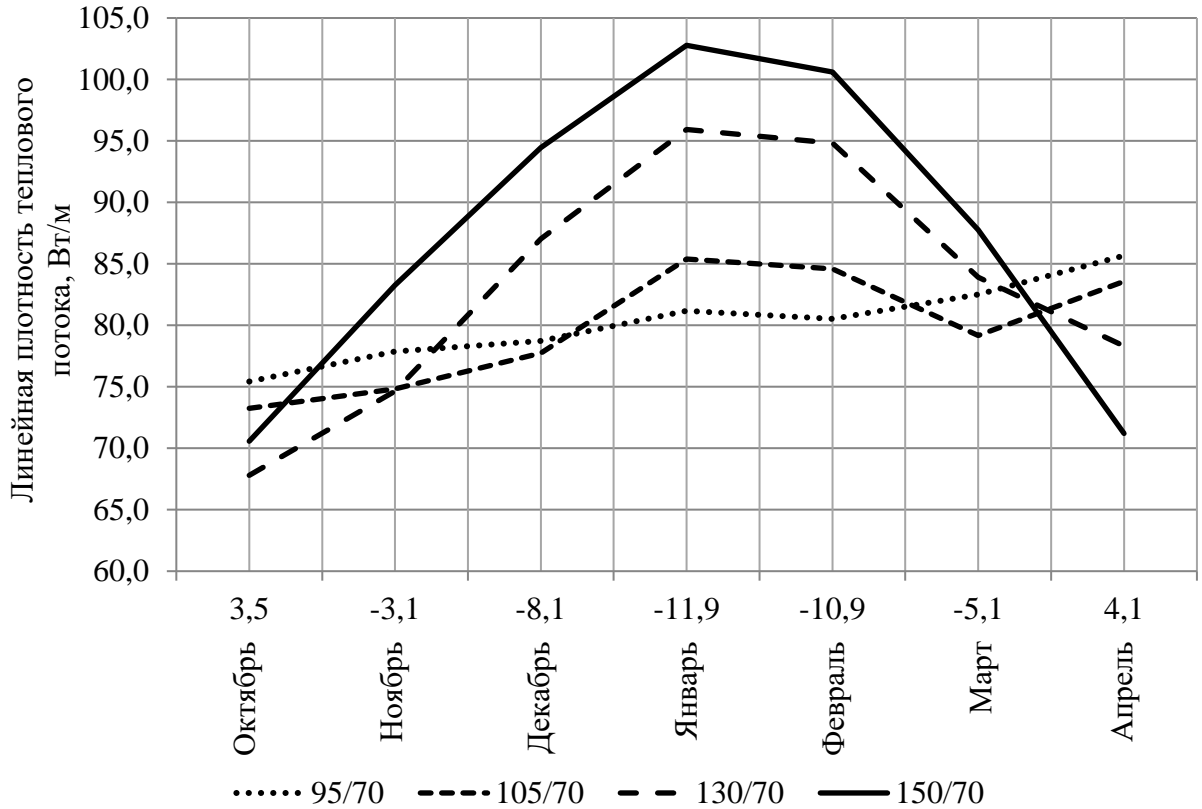


Рисунок 5 – Зависимость линейной плотности теплового потока от температуры наружного воздуха при диаметре трубопровода 400 мм

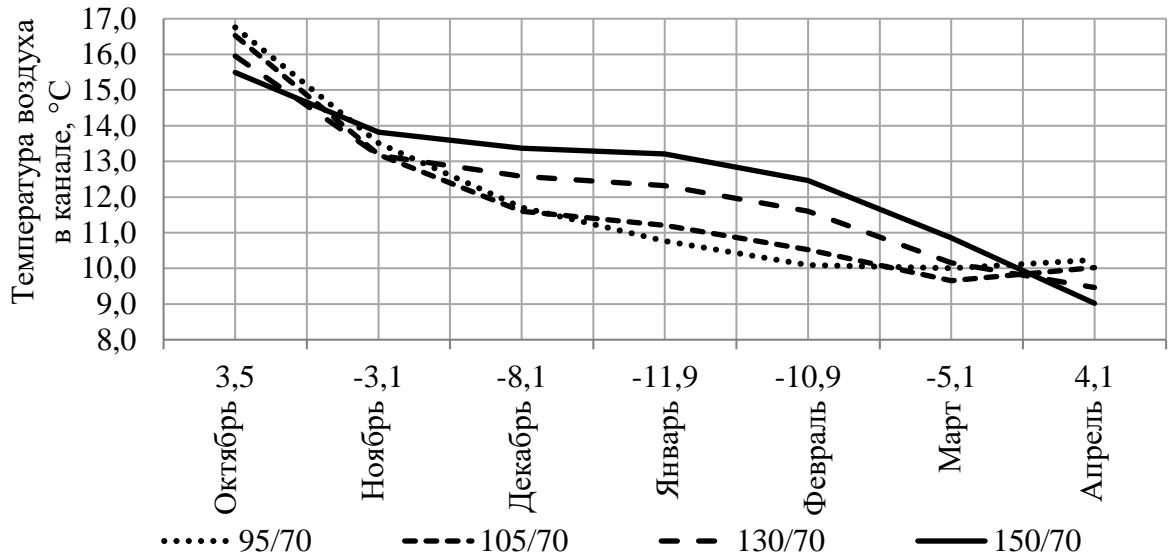


Рисунок 6 – Зависимость температуры воздуха внутри канала от температуры наружного воздуха при диаметре трубопровода 50 мм

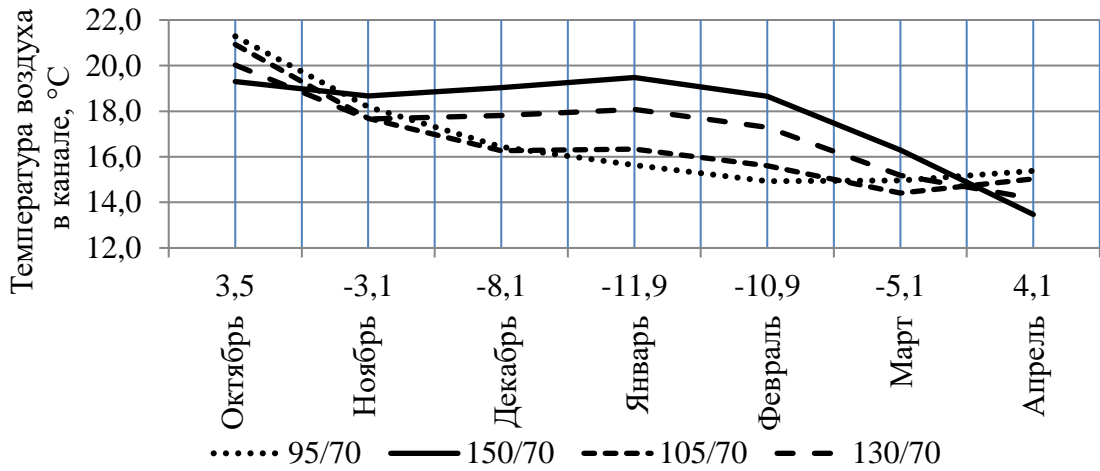


Рисунок 7 – Зависимость температуры воздуха внутри канала от температуры наружного воздуха при диаметре трубопровода 200 мм

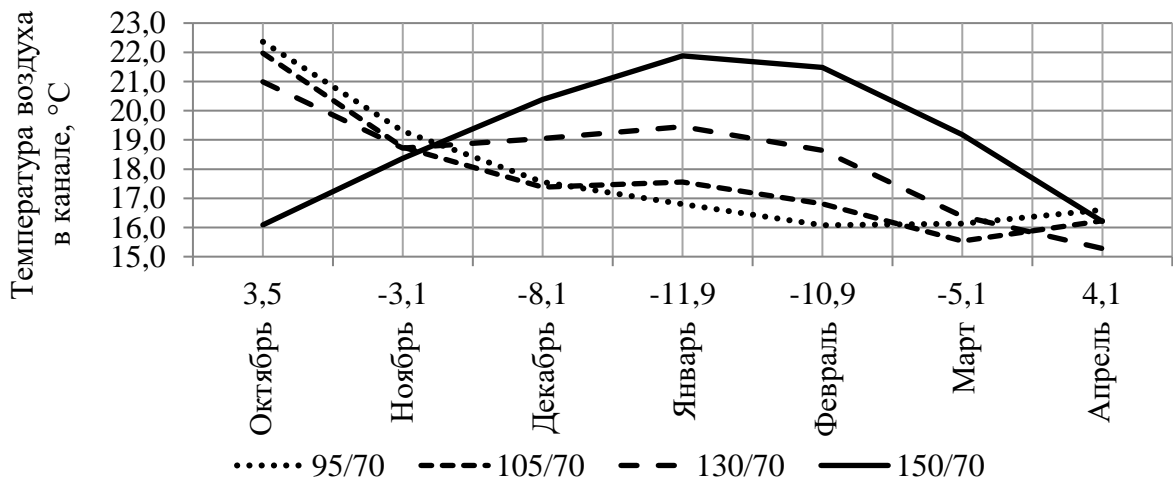


Рисунок 8 – Зависимость температуры воздуха внутри канала от температуры наружного воздуха при диаметре трубопровода 400 мм

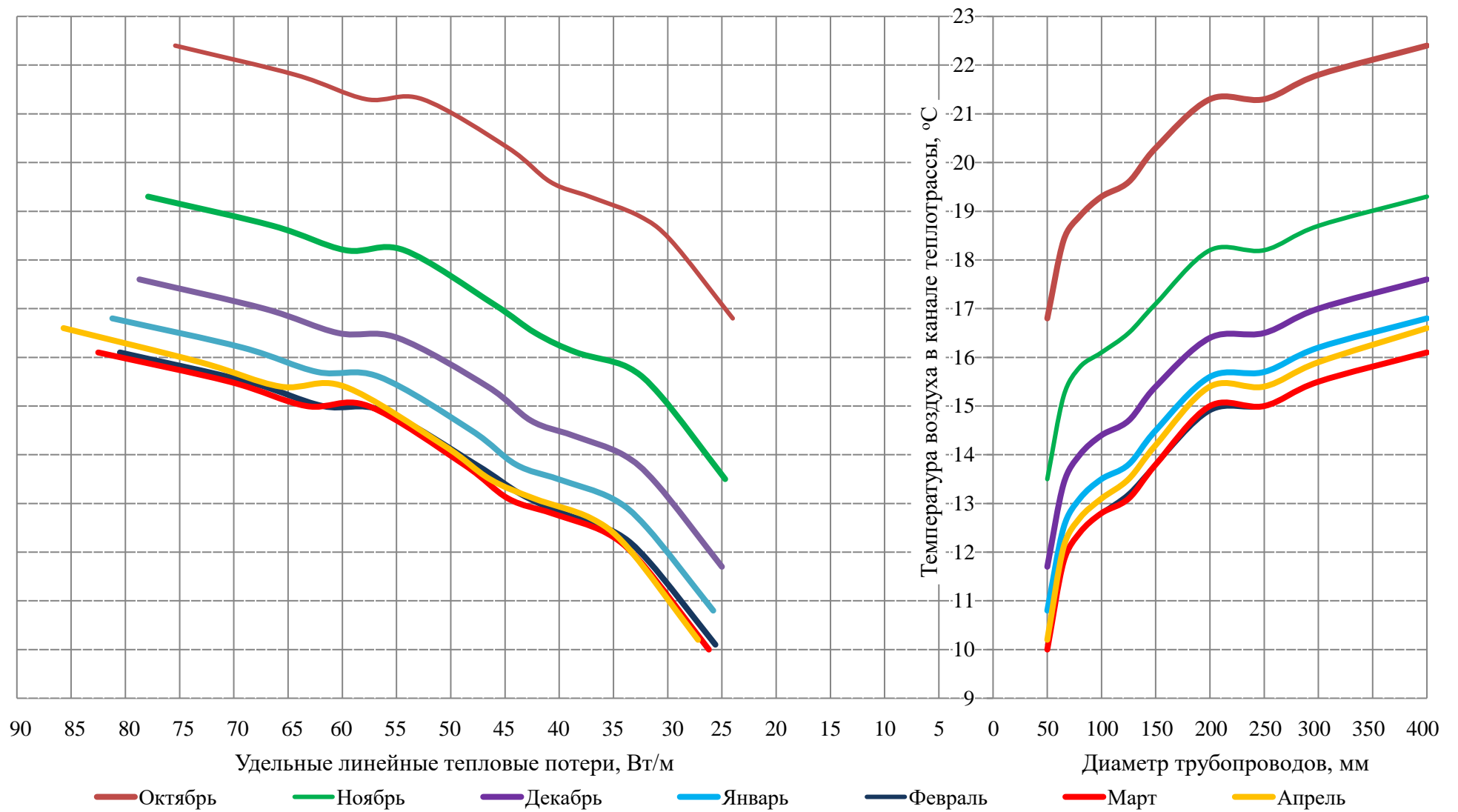


Рисунок 9 – Номограмма для определения линейных тепловых потерь в тепловых сетях при температурном графике работы системы теплоснабжения 95/70

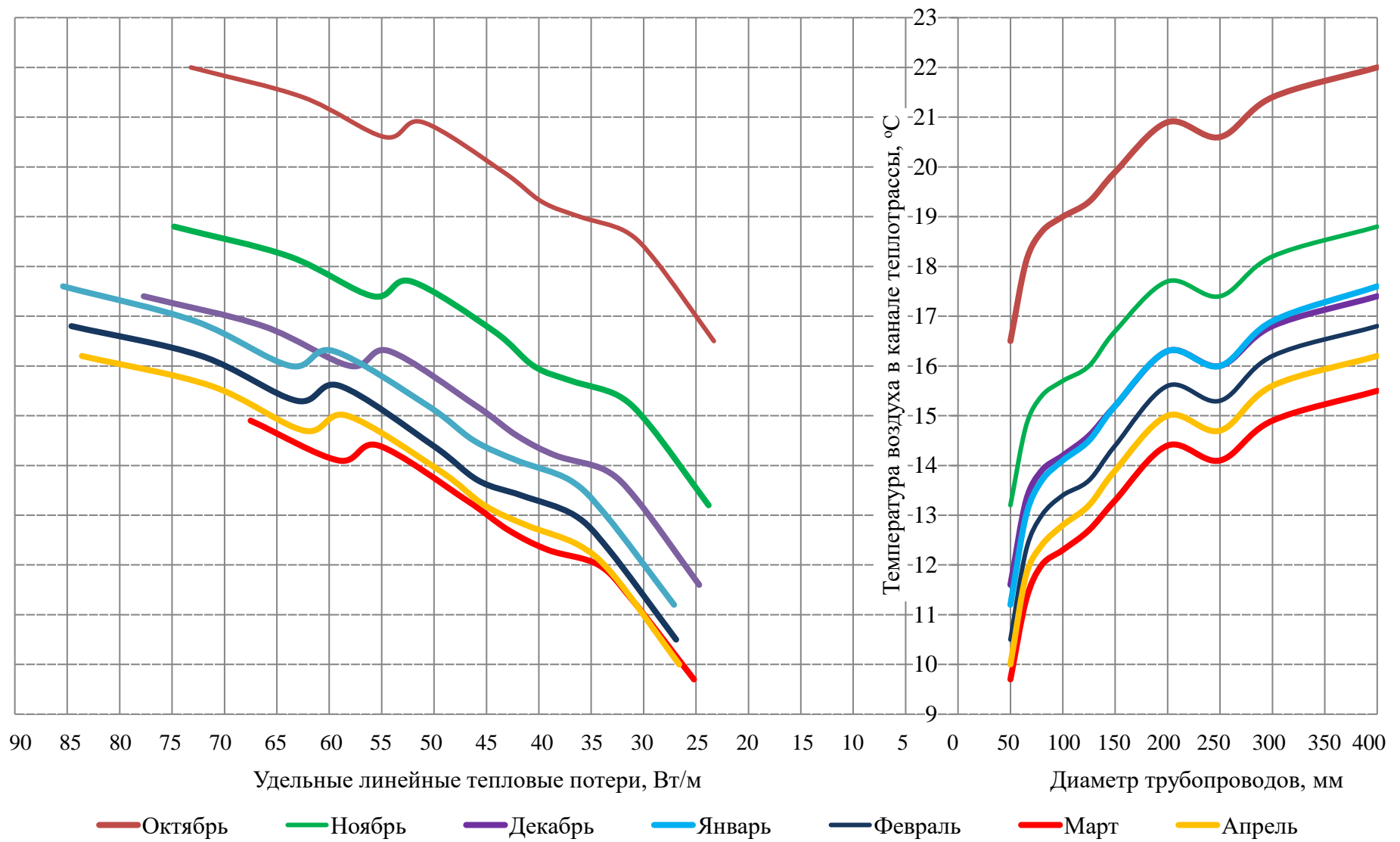


Рисунок 10 – Номограмма для определения линейных тепловых потерь в тепловых сетях при температурном графике работы системы теплоснабжения 105/70

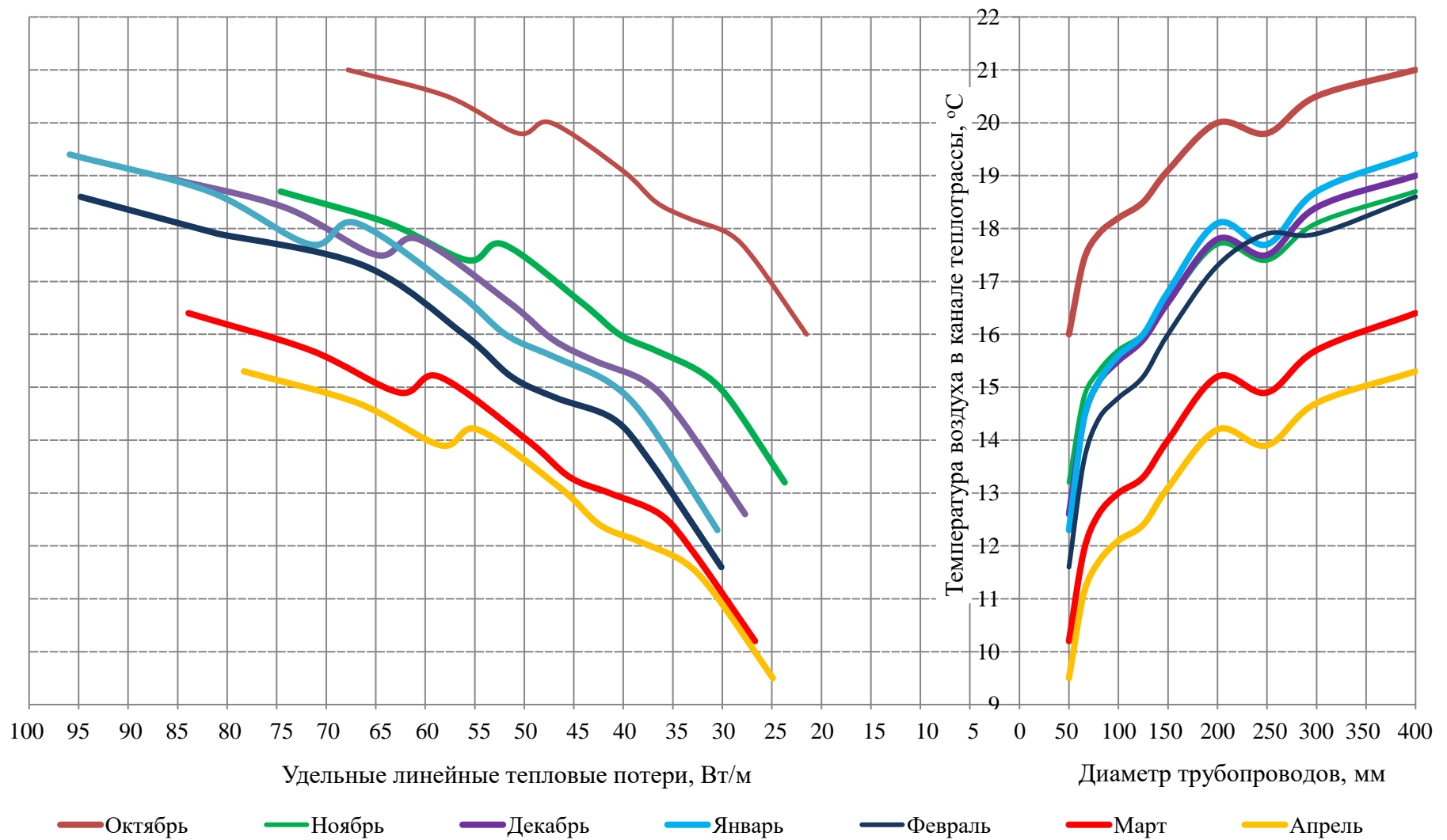


Рисунок 11 – Номограмма для определения линейных тепловых потерь в тепловых сетях при температурном графике работы системы теплоснабжения 130/70

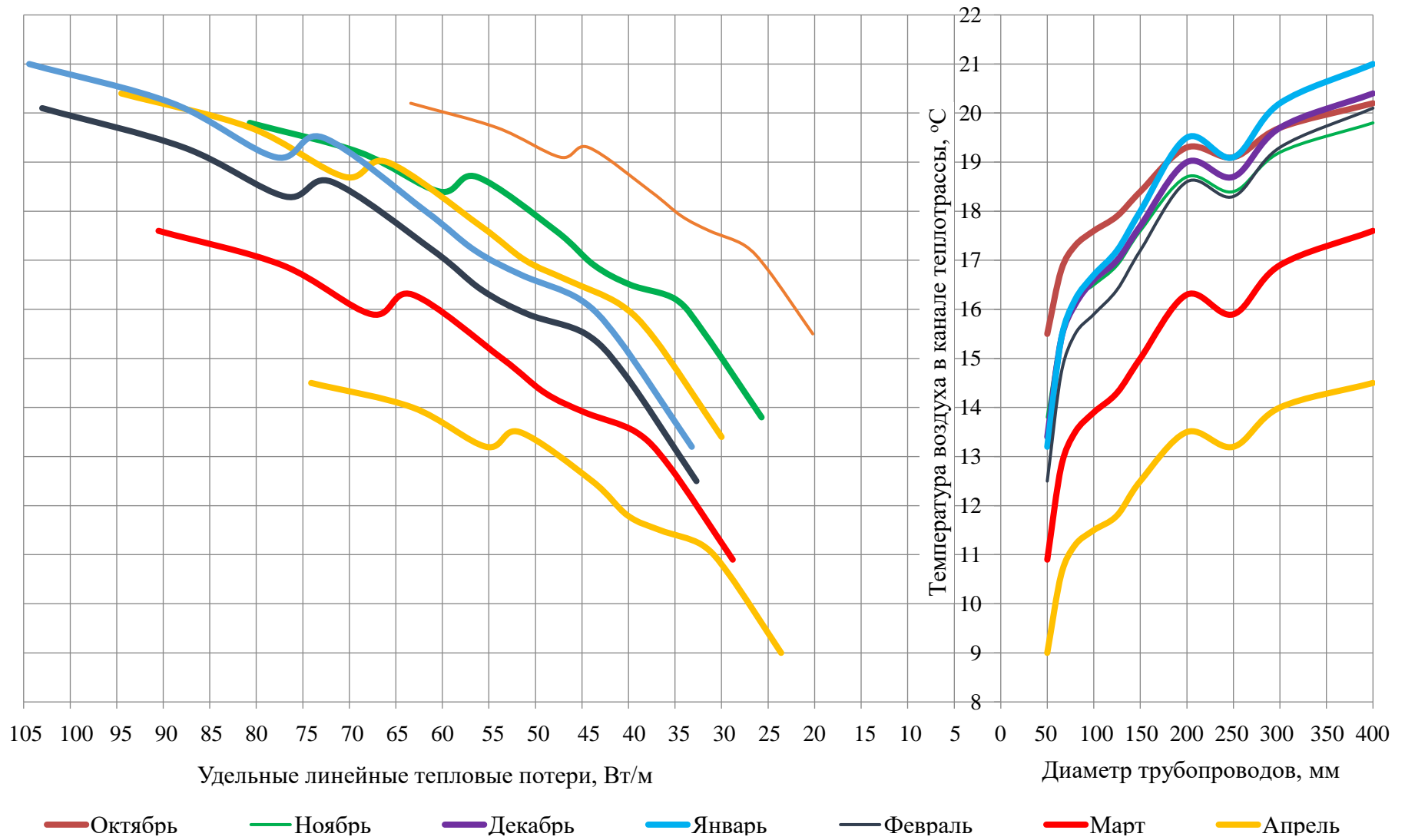


Рисунок 12 – Номограмма для определения линейных тепловых потерь в тепловых сетях при температурном графике работы системы теплоснабжения 150/70

Таблица 2 – Средние значения величин плотности теплового потока в сетях теплоснабжения, Вт/м

Диаметр трубопровода, мм	Температурный график			
	95/70	105/70	130/70	150/70
50	25,4	25,5	26,4	27,7
65	31,4	31,6	32,7	34,3
80	34,5	34,7	36,0	37,8
100	39,6	39,6	41,0	43,0
125	43,2	43,5	45,0	47,2
150	47,3	47,5	49,3	51,7
200	55,7	56,0	58,1	60,9
250	59,5	61,6	63,5	65,1
300	68,1	68,5	71,0	74,4
400	79,8	80,3	83,2	87,2

В настоящей работе также определены потери теплоты с одного метра длины тепловой сети за отопительный период для условий Центральной России (г. Иваново). Результаты расчетов для различных диаметров трубопроводов тепловых сетей и температурного графика 150/70 показаны на рисунке 13.

Суммарные годовые потери теплоты с 1 метра тепловой сети в зависимости от диаметра трубопроводов показаны на рисунке 14. Из иллюстрации следует, что для, например, часто применяемой двухтрубной тепловой сети диаметром трубопровода 200 мм с подземной канальной прокладкой в непроходных каналах потери составляют 1,16 ГДж тепловой энергии с одного метра тепловой сети за отопительный период. В пересчете на условное топливо, потери теплоты с одного километра тепловой сети за отопительный период эквивалентны 39,2 тоннам условного топлива.

Таким образом, тепловые сети, несомненно, имеют существенный потенциал для разработки и применения систем утилизации тепловых ВЭР, которые могут быть использованы для решения различных инженерных задач.

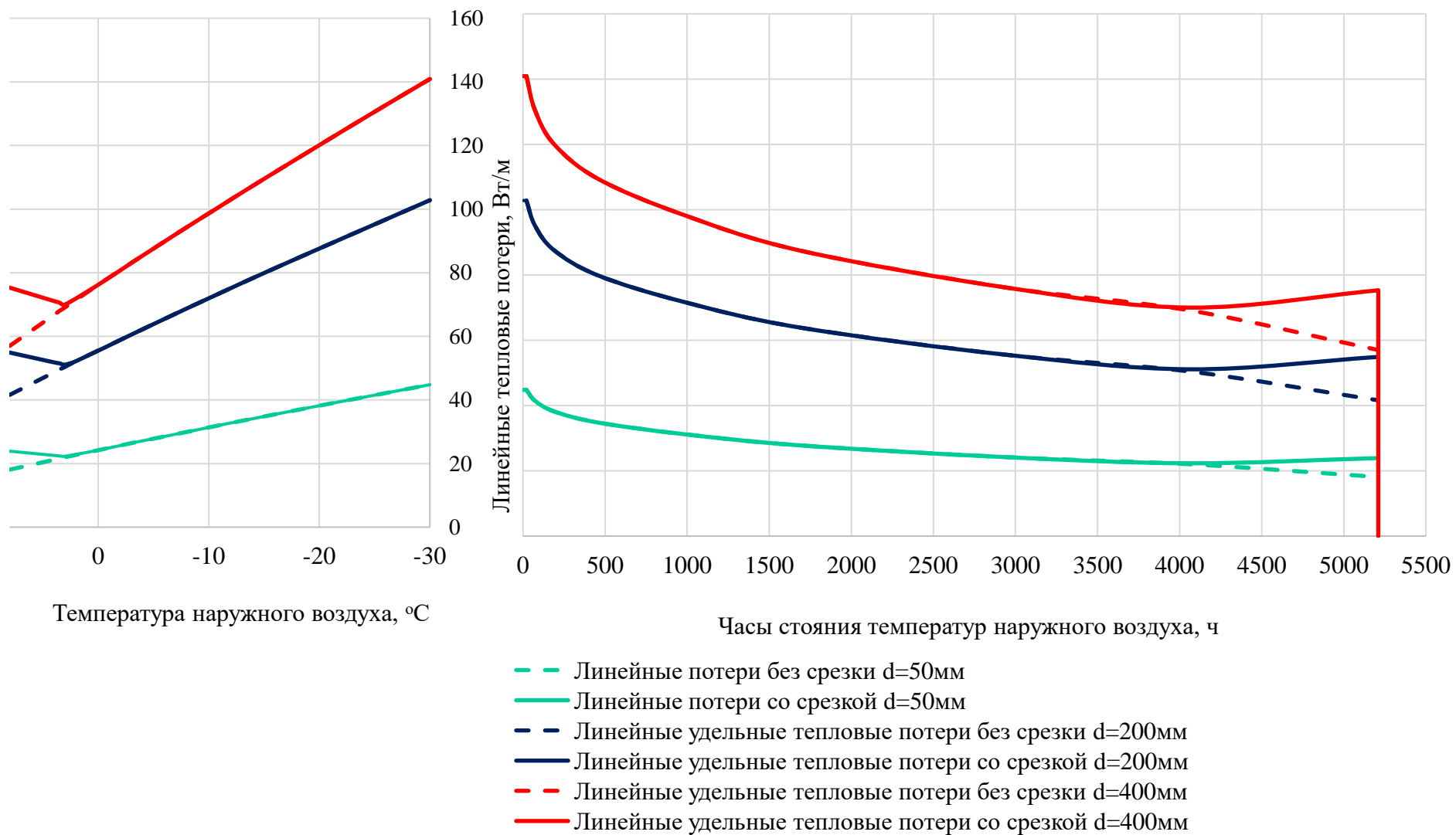


Рисунок 13 – График сезонных потерь теплоты в окружающую среду с одного метра тепловой сети при температурном графике 150/70

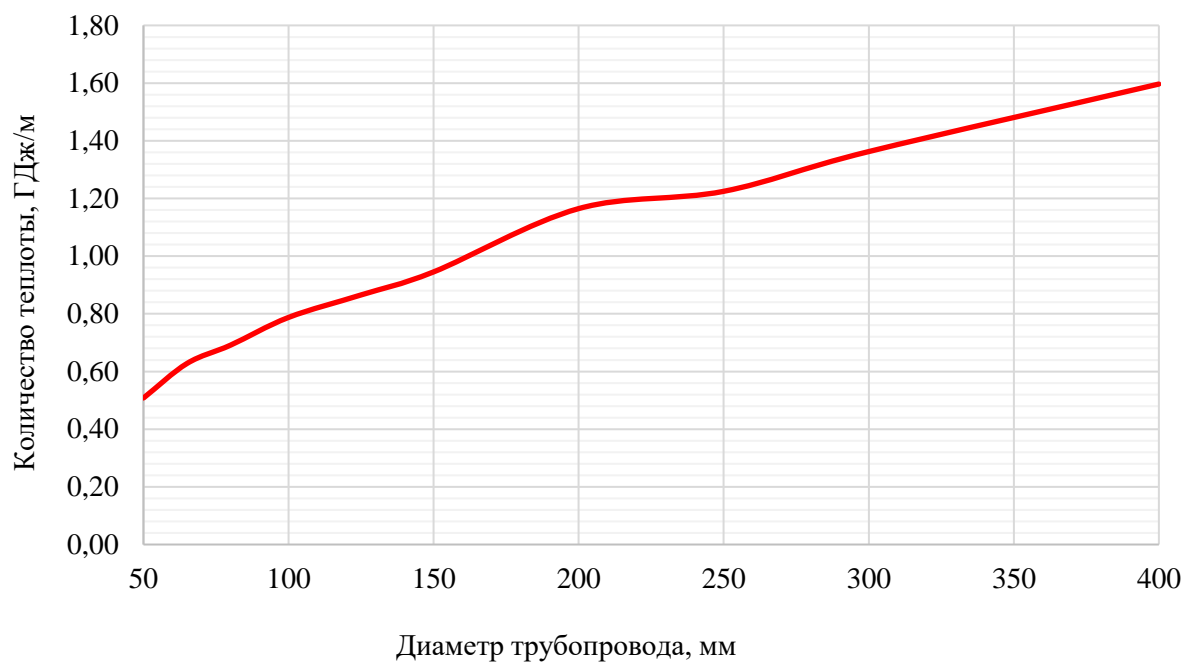


Рисунок 14 – Удельные сезонные потери теплоты в зависимости от диаметра трубопроводов тепловой сети

1.2 Анализ современных технических решений по сокращению удельных линейных тепловых потерь в сетях теплоснабжения

По результатам проведенного информационного обзора современных технических решений по сокращению удельных линейных тепловых потерь в тепловых сетях, работающих в нормальных условиях, можно выделить три подхода к повышению эффективности работы тепловых сетей:

- использование современных и перспективных теплоизоляционных материалов;
- применение оригинальных технических решений, направленных на изменение конструкции элементов тепловой сети;
- применение оригинальных технических решений, связанных с использованием теряющейся в окружающую среду тепловой энергии.

Наиболее простым и часто встречающимся решением является использование современных и перспективных теплоизоляционных материалов, позволяющих увеличить термическое сопротивление теплопередаче элементов сети

теплоснабжения [31 - 35]. К таким энергосберегающим технологиям, например, можно отнести:

- использование предварительно изолированных труб с пенополиуретановой (ППУ) изоляцией. Достоинствами такого вида изоляции являются низкий коэффициент теплопроводности и возможность изготовления данной изоляции вместе с системой оперативного дистанционного контроля (ОДК) состояния тепловой изоляции, позволяющей оперативно определять утечки теплоносителя [36];

- использование предварительно изолированных труб с пенополимерминеральной (ППМ) изоляцией. Трубу с ППМ изоляцией производят на базе вспениваемого полимера, как правило, закрытоячеистого ППУ, в который внедряется наполнитель, как правило, минеральный. ППМ изоляцию относят к одному из видов газонаполненных пластмасс. Композиция полимера и минерального наполнителя представляет собой смесь, т.е. химическая реакция между наполнителем и полимером отсутствует. Минеральный наполнитель существенно меняет физико-механические свойства ППМ композита, в первую очередь, повышает механическую прочность. Материал наносится на наружную поверхность стальной трубы. Труба ППМИ состоит из трех основных слоев: слой антикоррозийной защиты толщиной – это слой с отличной адгезией к стали, которую он защищает от внешних воздействий и коррозии; теплоизоляционный пористый слой; слой механической и гидроизоляционной защиты – по сути, этот слой является оболочкой, которая придает трубе прочность и защиту теплоизоляционного слоя от чрезмерной влажности. Все вышеперечисленные слои изоляции не впитывают капельную влагу (гидрофобны), но вместе с тем являются паропроницаемыми – это одна из важнейших особенностей ППМИ. Такая комбинация свойств теплоизоляции обеспечивает сохранность первоначальных свойств даже в любой тепловлажностной среде эксплуатации при любом способе строительства теплотрасс [37];

- использование изоляции из стекловолокна. Достоинствами данной изоляции является широкий диапазон температур применения от -60 до $+270^{\circ}\text{C}$,

низкий коэффициент теплопроводности, сохранность эксплуатационных свойств в течение всего срока службы конструкции, устойчивость к воздействию влаги;

- нанесение на поверхность трубопровода термоизоляционной краски. В основе её состава – акрил или латекс, в которые добавлены теплоизолирующие микросферы из керамики, стекла или различных полимеров. Теплоизоляционные свойства достигаются за счёт вакуума внутри таких сфер. Содержание таких сфер в акриловой основе теплоизоляционной краски может достигать до 80%. В акриловые сферы добавлен силикон и керамические элементы, после нанесения вместе образующие структуру, похожую по свойствам на фольгу: керамический компонент выполняет роль отражателя, а силиконовый становится вакуумной прослойкой между ними [38];

- применение альфольевой изоляции, направленной на ослабление лучистого теплообмена и исключение конвекции между трубопроводом и окружающей средой за счет организации воздушных полостей, образованных между установленными на трубопроводе опорными кольцами, и прикрепленных к ним нескольких экранов из материала, обладающего высоким значением коэффициента теплопроводности и малой теплоемкостью;

- изготовление композиционной термостойкой изоляции трубопроводов. После нанесения первого кремнепенобетонного слоя внутренней изоляции трубу-заготовку вращают и с помощью механизма возвратно-поступательного движения наносят четыре полимербетонных промежуточных слоя общей толщиной 20% толщины первой изоляции – скорлупы. В заключение монтажа наносят на эти слои наружную пенополиуретановую изоляцию [39];

- использование теплоизолирующего покрытия горизонтально расположенного трубопровода, имеющего тепловую изоляцию, выполненную монолитно из заливного теплоизоляционного материала (пенополиуретана, пенобетона и т.п.). Увеличение толщины теплоизолирующего покрытия к верху трубы позволяет снизить тепловые потери горизонтально расположенного трубопровода [40];

- нанесение тонкопленочного покрытия на поверхность трубопроводов тепловых сетей, состоящих из минеральной ваты в качестве основного слоя и стеклопластика, в качестве покровного, что ведет к сокращению потерь тепловой энергии;

- применение отражающей теплоизоляции (ОТИ) или фольгированного утеплителя. Фольгированный утеплитель – это комбинированный материал, основа которого состоит из универсального теплоизоляционного волокна или подложки, а внешняя сторона – из фольги. Фольга является паро- и влагонепроницаемым материалом, поэтому данные утеплители не нуждаются в защите пленками [41].

Помимо применения теплоизоляционных материалов существуют оригинальные технические решения, позволяющие сокращать тепловые потери. Примерами таких энергосберегающих технологий могут служить нижеприведенные инженерные решения.

Контактная конструкция теплопроводов двухтрубной тепловой сети для распределительных и магистральных тепловых сетей (рисунок 15). Технология заключается в использовании для транспортировки теплоносителя от источника тепловой энергии к потребителю теплопровода новой конструкции. Контактная конструкция теплопровода двухтрубной тепловой сети представляет собой два трубопровода оригинального поперечного сечения, прямой и обратный, совмещенных в один. Сечение каждого канала контактного теплопровода представляет собой полукруг, эквивалентный по площади поперечному сечению прямого или обратного стандартного стального трубопровода, причем оба канала контактного трубопровода соединены их плоскими стенками.

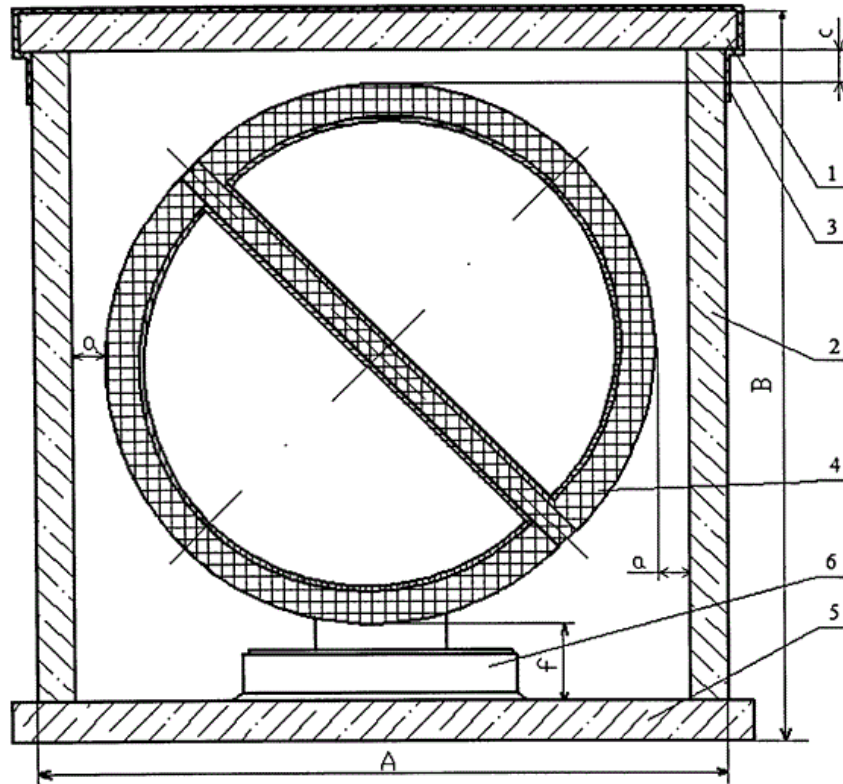


Рисунок 15 – Поперечное сечение непроходного канала контактной конструкции с наклонным расположением трубопровода:

1 – плита перекрытия; 2 – стеновой блок; 3 – гидроизоляция; 4 – трубопровод тепловой сети с теплоизоляцией; 5 – плита днища; 6 – скользящая опора трубопровода

Для уменьшения теплообмена между прямым и обратным потоками между плоскими стенками прокладывается слой теплоизоляционного материала. Изменение геометрической формы прямого и обратного теплопровода с соединением их через слой изоляции плоскими стенками приводит к уменьшению габаритных размеров тепловой сети; сокращению строительных материалов (железобетона), необходимых для прокладки трубопроводов в непроходных (проходных, полупроходных) каналах; экономии тепловой изоляции; сокращению тепловых потерь в окружающую среду от конструкции [42].

Использование инновационной конструкции канальной теплосети, разработанной кафедрой теплогазоводоснабжения Юго-Западного государственного университета (рисунок 16).

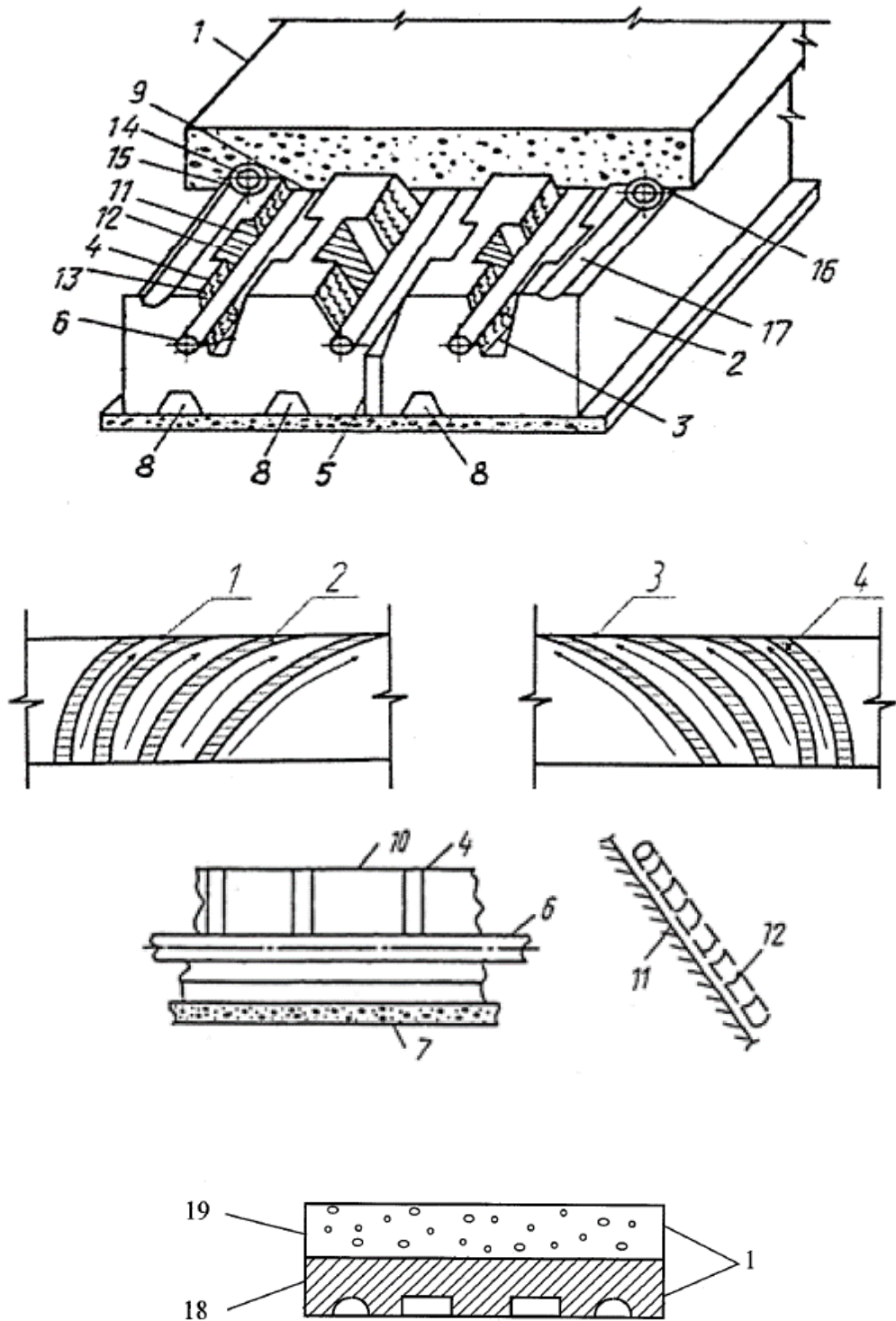


Рисунок 16 – **Иновационная конструкция каналной теплосети:**

1, 2 – верхняя и нижняя плиты; 3 – каналы; 4 – выступы с гранями в каналах; 5 – отверстия цилиндрической формы в днище нижней плиты; 6 – трубопроводы; 7 – основание из дренирующего материала; 8 – выемки треугольной формы в днище нижней плиты; 9 – выступы на внутренней поверхности верхней плиты; 10 – жесткие опоры по длине теплоизоляционного блока; 11 – выемки вокруг трубопровода в нижней плите; 12 – циклоидные направляющие; 13 – криволинейные винтообразные канавки; 14 – гибкий трубопровод; 15 – пазы для укладки гибкого трубопровода; 16, 17 – полусферы, образующие пазы; 18 – теплоизоляционная составляющая верхней плиты; 19 – железобетонная составляющая верхней плиты

Представленная тепловая сеть включает блок из теплоизоляционных плит с каналами для труб. Трубопроводы установлены с опиранием на стенки каналов треугольной или трапецеидальной формы поперечного сечения с уширениями, направленными вверх каналов. На стенках, в отдельных местах по длине канала, выполнены выступы с гранями, параллельными стенкам канала, для опирания трубопроводов. В днище блока по всей длине имеются выемки, а в верхней части блока - выступы, соответствующие форме верхней части канала. Во внутренней полости каналов вокруг трубопровода треугольной или трапецеидальной формы поперечного сечения, в пределах выемок, расположены циклоидальные направляющие, а в пределах выступов - криволинейные винтообразные канавки, шов между верхней и нижней плитами герметизирован гибким трубопроводом, уложенным в пазах, образованных двумя полусферами, при этом верхняя плита теплоизоляционного блока выполнена из биматериала. Материал со стороны каналов для труб имеет коэффициент теплопроводности в 10÷12 раз ниже, чем коэффициент теплопроводности биматериала со стороны грунта. В результате существенной разницы коэффициентов теплопроводности возникают разные температурные градиенты в материалах 18 и 19 и на поверхности их соединения образуется дополнительная зона термического сопротивления, равносильная термическому сопротивлению материала 18, что приводит к уменьшению тепловых потерь в окружающую среду [43].

Примеры технических решений, связанных с использованием теряющейся в окружающую среду тепловой энергии, приведены ниже.

О возможности использования потерь тепловой энергии говорится в работе Голяка С. А. и Сикерина И. Е [23]. В данной работе исследуется возможность использования энергетического потенциала прилегающего к тепловой сети грунта в целях утилизации теплоты, неизбежно теряемой теплоносителем. Голяк С. А. и Сикерин И. Е показывают температурное поле, возникающее вокруг канала с теплопроводами (рисунок 17). Изотермы построены для значений температуры: 15, 12, 10, 9, 8, 7, 6 °С.

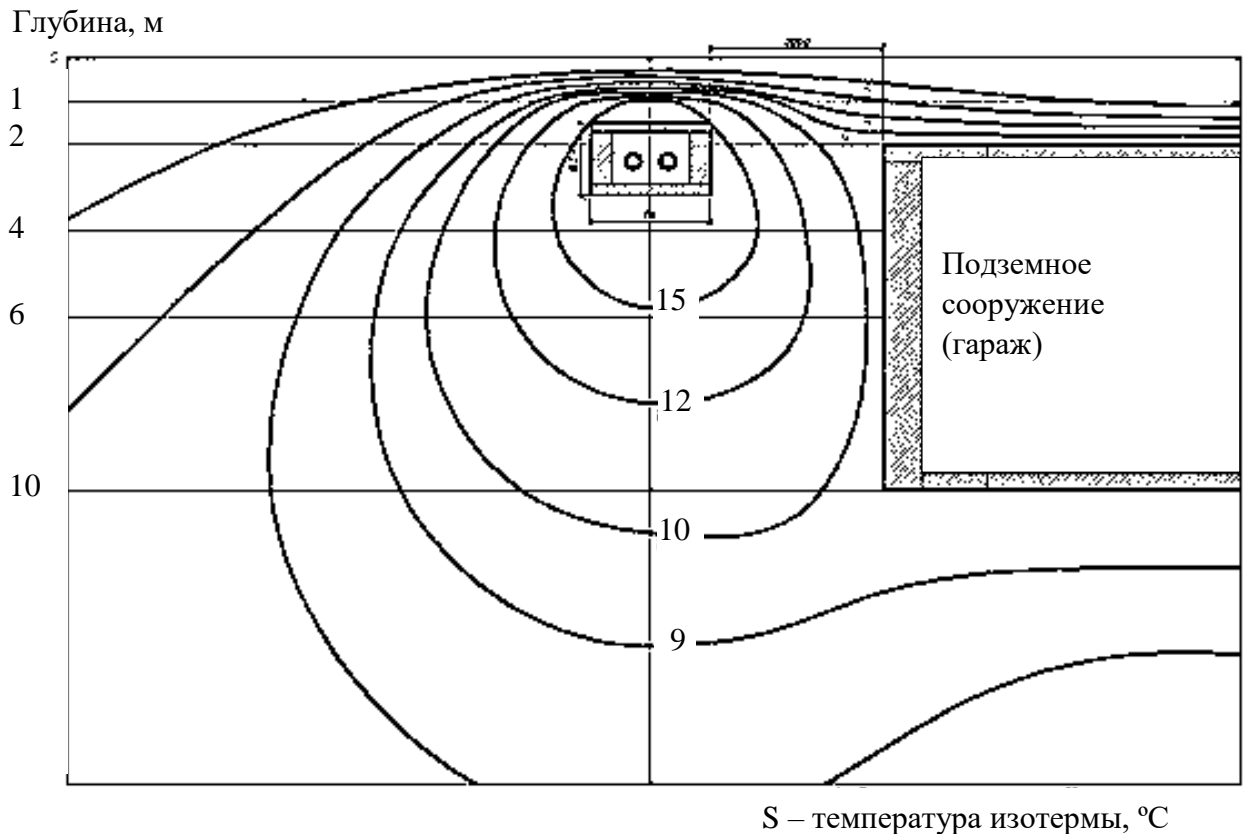


Рисунок 17 – Распределение теплового поля в грунте, сечение теплотрассы и подземного сооружения

Как видно из рисунка, ограждающая конструкция близлежащего к теплотрассе инженерного сооружения (подземного гаража) попадет в область грунта с температурой $9\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как естественная температура грунта на данной глубине $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, благодаря смежному расположению гаража и теплотрассы можно повысить температуру воздуха в гараже на $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, или сэкономить энергию, требуемую для поддержания в нем более высокой температуры, за счет меньшей разницы требуемого и естественного ее значения [23].

По мнению автора настоящей работы указанный вариант утилизации тепловых потерь имеет ограниченное применение из-за особенностей его применения.

Следующая технология использования тепловых потерь сети теплоснабжения предложена в диссертации Марченко А.В. [44]. Автор диссертации предлагает воздух, загрязненный на автомагистралях, пропускать через подземный канал теплотрассы и затем направлять его в топки котлов. Схема

транспорта загазованного воздуха автомагистралей в топку котлоагрегатов ТЭЦ через подземные каналы теплотрассы представлена на рисунок 18.

Основными преимуществами разработанных решений по мнению Марченко А.В. являются термическое обезвреживание вредных веществ, содержащихся в автотранспортных выбросах, в топках котлоагрегатов ТЭЦ или производственных котельных, снижение потребления топлива теплоэнергетическими установками вследствие утилизации в топках котлов тепловыделений теплопроводов.

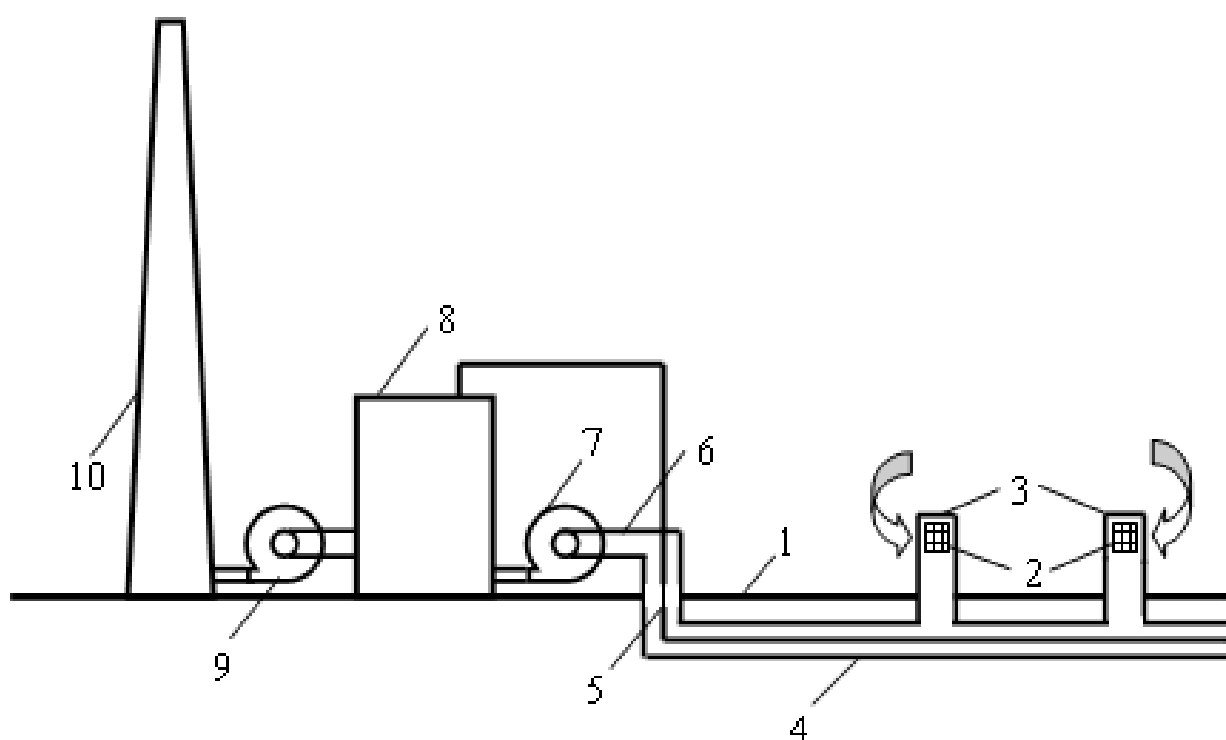


Рисунок 18 – Схема транспорта загрязненного городского воздуха в топку котлов ТЭЦ через подземные каналы теплотрассы:

1 – проезжая часть городских улиц; 2 – воздухозаборные окна; 3 – вентиляционные камеры; 4 – подземный канал теплотрассы; 5 – теплопровод; 6 – всасывающий воздуховод вентилятора; 7 – дутьевой вентилятор; 8 – котлоагрегат; 9 – дымоход; 10 – дымовая труба

С точки зрения автора настоящей диссертации такой способ утилизации тепловых потерь неизбежно вызовет их увеличение вследствие снижения температуры воздуха в канале теплотрассы и изменения режима его движения с естественной на вынужденную конвекцию.

В заключение необходимо отметить, что все вышперечисленные методы борьбы с тепловыми потерями в сетях теплоснабжения снижают, но не исключают их, что и является принципиальным отличием данных методов от метода, предлагаемого автором настоящей работы.

Описанное далее оригинальное устройство позволяет полностью возвращать тепловую энергию в систему теплоснабжения, тем самым предельно сокращая потери в окружающую среду.

1.3 Сетевые тепловые потери как источник низкопотенциальной энергии для работы трансформатора тепла

Известны и широко распространены геотермальные теплонасосные системы, предназначенные для выработки тепловой энергии. Источником низкопотенциальной энергии для этих устройств служит естественная теплота грунта [45, 46, 47]. Принцип работы такого устройства заключается в восприятии тепловой энергии грунта с помощью вертикального или горизонтального геотермального замкнутого контура (коллектора) с циркулирующим в нем теплоносителем, который передает воспринятую энергию в испаритель теплового насоса. При этом для горизонтальных коллекторов теплосъем зависит от многих параметров, таких как качество грунта, наличие грунтовых вод и т.д. Например, для климата Германии теплосъем для суглинка и влажных почв составляет 30 – 40 Вт на погонный метр [48]. Однако, продолжительность работы геотермальных тепловых насосов даже для климатических условий Германии ограничена теплым периодом года и равна 2400 часов в год. Таким образом, в местах, где возможно естественное восполнение тепловой энергии грунта путем, например, воздействия на него солнечной радиации или за счет энергии недр земли, применение данных систем довольно актуально в теплый период года.

Аналогичная геотермальная теплонаносная система легла в основу идеи устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы, для работы которого низкопотенциальным источником являются тепловые потери сети

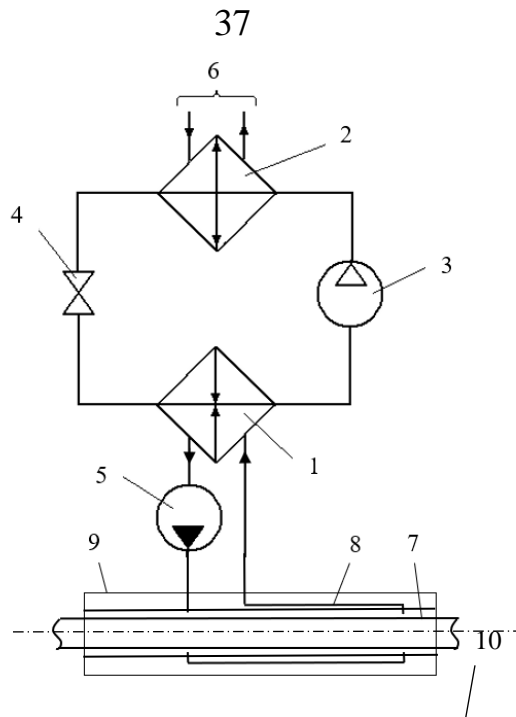
теплоснабжения [98, 99, 100, 101]. То есть тепловые потери являются внутренним источником тепловой энергии грунта.

Устройство по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы, исследованию которого посвящена настоящая диссертационная работа, предложено в качестве энергосберегающего решения в системах централизованного теплоснабжения промышленных предприятий, в условиях, когда источник и сети находятся в собственности самого предприятия, что создает наиболее благоприятные условия для реализации энергосберегающих мероприятий.

Основной целью работы устройства является утилизация неизбежных тепловых потерь в сетях теплоснабжения. При этом выработанная тепловая энергия может быть использована для нужд горячего водоснабжения или отопления рядом расположенных зданий и сооружений в течение всего года.

Устройство по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы состоит из теплоотражающего экрана, коллектора и сопряженного с ним трансформатора тепла (парокомпрессионного теплового насоса). Принципиальная схема и внешний вид устройства показаны на рисунках 19 и 20.

Коллектор, расположенный в канале теплотрассы вдоль трубопроводов тепловой сети, представляет собой систему трубопроводов, по которой осуществляется циркуляция теплоносителя через испаритель теплового насоса. Данный элемент устройства предназначен для восприятия линейных тепловых потерь от трубопроводов тепловой сети системы теплоснабжения и передачи полученной энергии в испаритель теплового насоса, который в свою очередь, позволяет повысить потенциал воспринятой тепловой энергии до требуемых параметров.



**Рисунок 19 – Принципиальная схема устройства
по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы:**

1 – испаритель; 2 – конденсатор; 3 – компрессор; 4 – дроссельное устройство;
5 – циркуляционный насос; 6 – потребитель тепловой энергии; 7 – изолированный
трубопровод тепловой сети; 8 – коллектор устройства по утилизации тепловых потерь;
9 – канал теплотрассы; 10 – теплоотражающий экран

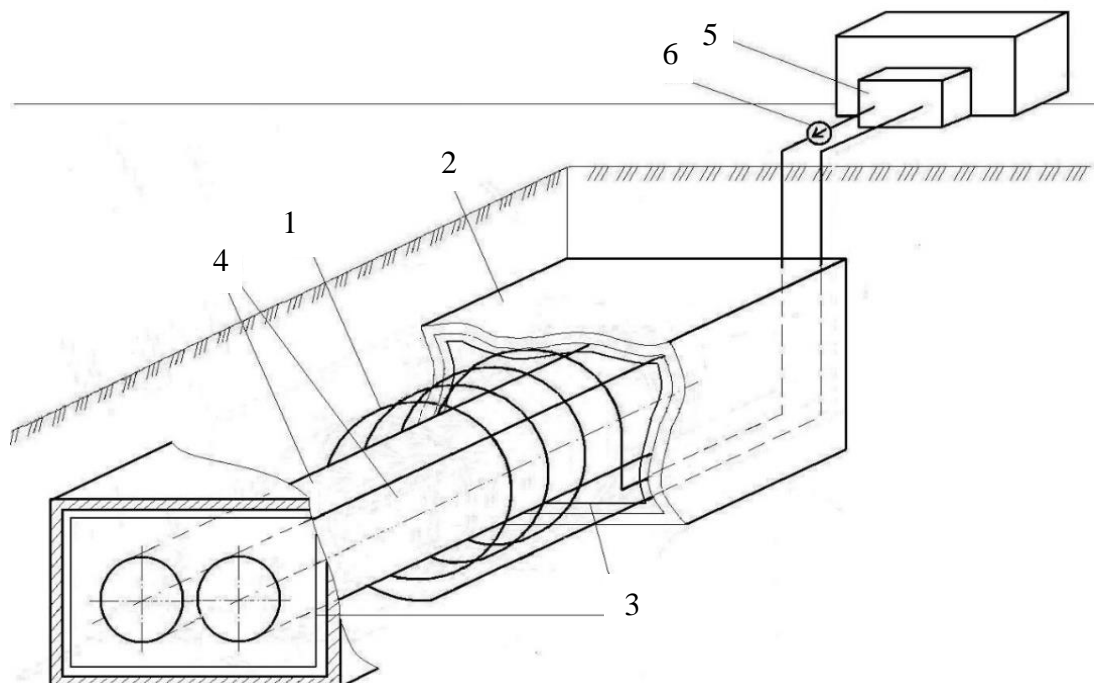


Рисунок 20 – Общий вид устройства

по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы:

1 – коллектор; 2 – канал теплотрассы; 3 – теплоотражающий экран; 4 – трубопроводы теп-
ловой сети; 5 – испаритель теплового насоса; 6 – циркуляционный насос

Необходимым условием отбора энергии от сети теплоснабжения является поддержание стабильного теплового режима работы сети, то есть недопущение увеличения тепловых потерь вследствие работы устройства. В тоже время, необходимо организовать максимально возможный и достаточный для эффективной работы теплового насоса теплосъем. С целью организации работы предлагаемого устройства, при котором отбор теплоты не будет оказывать негативное влияние на тепловой режим сети теплоснабжения, было принято решение установить теплоотражающие экраны вокруг трубопроводов тепловой сети. При этом тепловая энергия, теряющаяся с поверхности экрана в окружающую среду, может быть полностью использована для дальнейшей трансформации тепла в теплонасосной установке.

1.4 Постановка цели и задач исследования

Проведенный анализ источников информации по теме исследования и особенностей работы предлагаемого в работе устройства позволил сформулировать цель и задачи исследования.

Целью диссертации является повышение эффективности систем теплоснабжения промышленных предприятий за счет применения устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**:

- 1) Определение потенциала энергосбережения в тепловых сетях и анализ существующих методов повышения эффективности их работы.
- 2) Разработка и создание экспериментальной установки для исследования процессов переноса теплоты в тепловых сетях с теплоотражающими экранами.
- 3) Проведение экспериментального исследования для оценки влияния теплоотражающих экранов на процесс переноса теплоты в сети теплоснабжения и проверки адекватности математических моделей.
- 4) Разработка математических моделей переноса тепловой энергии в элементах сетей теплоснабжения различных конструкций и проведение

численных расчетов с применением специализированного программного обеспечения, направленных на определение доли тепловых потерь, которую допустимо утилизировать.

5) Разработка инженерной методики расчета устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы и методики оценка экономической эффективности его применения.

1.5 Выводы по первой главе

1. По результатам анализа источников информации по теме исследования установлено следующее:

– тепловые сети имеют существенный потенциал энергосбережения для разработки и применения систем утилизации тепловых ВЭР;

– в настоящее время существует три принципиальных подхода к сокращению и использованию тепловых потерь в сетях систем теплоснабжения: использование современных и перспективных теплоизоляционных материалов; применение оригинальных технических решений, направленных на изменение конструкции элементов тепловой сети; применение оригинальных технических решений, связанных с использованием теряющейся в окружающую среду тепловой энергии.

– в настоящее время отсутствует способ утилизации тепловых потерь сети теплоснабжения, позволяющий полностью исключить потери тепловой энергии в окружающую среду.

2. В работе предложено устройство по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы, предназначенное для сбора теряемой в окружающую среду тепловой энергии и ее возврата в систему теплоснабжения.

Результаты исследования, приведенного в главе 1, отражены в 13 работах [98, 99, 100, 101, 103, 106, 107, 108, 109, 115, 117, 118, 119].

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В КАНАЛЕ ТЕПЛОТРАССЫ

В настоящей главе рассмотрены основные положения, связанные с проведением экспериментального исследования процессов теплообмена в тепловой сети с применением теплоотражающих экранов. Показана схема экспериментальной установки, описаны условия проведения эксперимента и приведены результаты экспериментальных исследований.

2.1 Цель и задачи экспериментального исследования

Объектом экспериментального исследования является физическая модель сети теплоснабжения. Цель экспериментального исследования заключается в оценке эффективности теплоотражающих экранов в тепловой сети и в получении значений плотности теплового потока на наружной поверхности канала теплотрассы, которые необходимы для проверки адекватности математических моделей процессов теплообмена в тепловой сети, приведенных в главе 3 настоящей работы.

В задачи экспериментального эксперимента входят:

- разработка и создание экспериментальной установки;
- определение теплового потока с наружной поверхности канала в трех различных конфигурациях экспериментальной установки;
- математическая обработка полученных в ходе эксперимента данных;
- анализ полученных результатов.

2.2 Описание экспериментальной установки

Для исследования процессов переноса тепловой энергии в элементах тепловой сети и определения эффективности теплоотражающих экранов была разработана и создана экспериментальная установка. Поскольку в работе важным является исследование влияния теплоотражающих экранов на тепловые

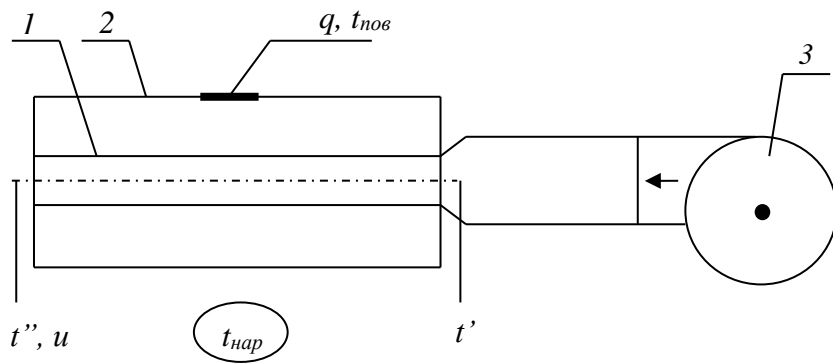
потери сети теплоснабжения, экспериментальное исследование было решено разбить на три этапа, соответствующих трем различным конфигурациям экспериментальной установки (рисунок 21), а именно:

- базовой конструкции (ЭУ №1);
- конструкции с расположенным вокруг трубопровода теплоотражающим экраном (ЭУ №2);
- конструкции с двумя теплоотражающими экранами (ЭУ №3).

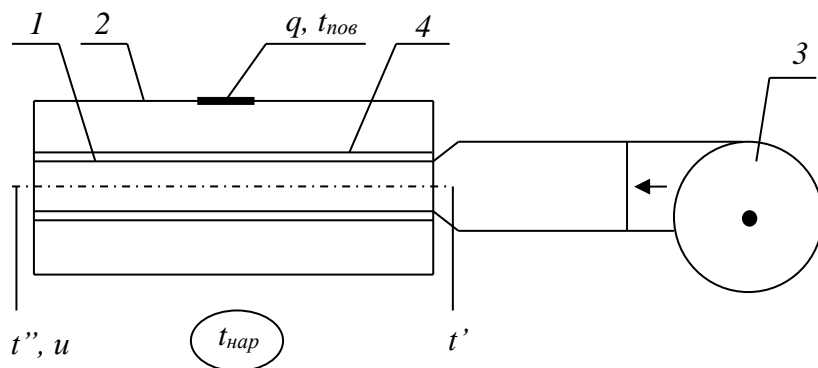
Базовая конструкция экспериментальной установки включает в себя цилиндрическую гладкостенную трубу, выполненную из полимера, канала в форме параллелепипеда прямоугольного сечения, выполненного из оргстекла и вентилятора с теплоэлектронагревателем (ТЭНом), выполняющим роль источника тепловой энергии. Для опытов, связанных с исследованием влияния на процесс теплообмена теплоотражающих экранов, базовая конструкция экспериментальной установки дополнительно оснащалась теплоотражающими экранами, выполненными из алюминиевой фольги толщиной 100 мкм. На входе в трубу (трубопровод) со стороны источника тепловой энергии установлена спрямляющая решетка (хонейкомб), предназначенная для выравнивания поля скоростей по сечению трубопровода.

В ходе эксперимента были определены тепловой поток на наружной поверхности канала, температура воздуха на входе и выходе из трубы, температура окружающего воздуха, а также скорость потока воздуха для трех различных компоновок установки.

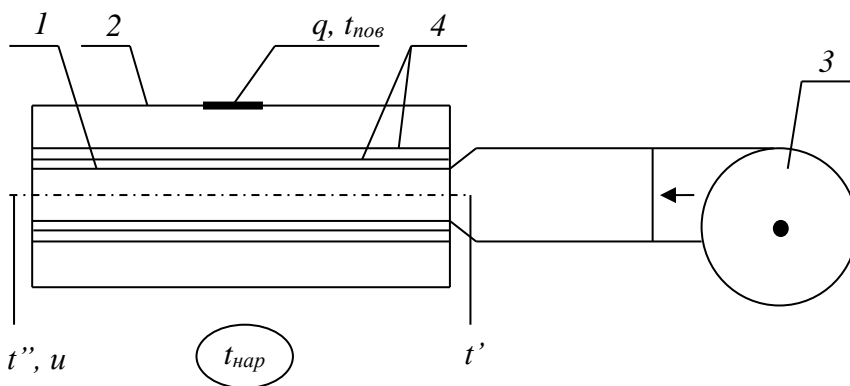
Принципиальным в эксперименте является соблюдение геометрического подобия установки и тепловой сети, позволяющие экстраполировать результаты исследований на реальную тепловую сеть. При этом теплофизические характеристики трубопровода и подвижного теплоносителя в нем не влияют на цель исследования. Система «горячий воздух – полимерная труба» как источник потерь тепловой энергии эквивалентна системе «горячая вода – изолированный трубопровод водяной тепловой сети».



а)



б)



в)

Рисунок 21 – Схемы экспериментальной установки
с различной компоновкой элементов:

1 – трубопровод; 2 – канал; 3 – вентилятор с ТЭНом; 4 – теплоотражающий экран

Характеристики элементов конструкции элементов экспериментальной установки приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Технические и геометрические характеристики материалов экспериментальной установки

Наименование	Технические характеристики				Геометрические характеристики, мм	
	Материал	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Внутренний диаметр × толщина стенки	Высота × ширина × толщина стенки
Трубопровод	Полипропилен	990	0,19	1930	50×1,8	-
Теплоотражающий экран 1	Алюминий	2670	204	920	70×0,1	-
Теплоотражающий экран 2	Алюминий	2670	204	920	100×0,1	-
Канал	Оргстекло	1100	0,196	1800	-	200×190×4

Экспериментальная установка состоит из трубопровода 1 с наружным диаметром 50 мм длиной 100 мм, помещенного в канал прямоугольного сечения, высотой 200 мм и шириной 190 по внутренней поверхности. Размер канала соответствует требованиям к размещению трубопроводов при их прокладке в непроходных каналах [28]. Расположение трубопровода внутри канала соответствует данным таблицы 4. Торцевые поверхности канала закрыты теплоизоляционным материалом.

Таблица 4 – Размещение трубопровода в непроходном канале

Наружный диаметр трубопровода, мм	Расстояние от поверхности теплоизоляционной конструкции трубопровода в свету, мм		
	до стенки канала	до перекрытия канала	до дна канала
50	70	50	100

Установка работает следующим образом. Холодный воздух посредством вентилятора забирается из окружающей среды и нагревается при помощи теплоэлектронагревателя. Нагретый воздух поступает в трубопровод и продвигаясь по его длине теряет тепловую энергию, а затем удаляется в окружающую среду. При этом воздух в канале нагревается и на наружной поверхности канала фиксируются значения плотности теплового потока.

Так же было учтено наличие неравномерности поля скоростей в трубопроводе. Поэтому датчики измерения температур, плотности теплового потока и скорости расположены после участка гидродинамической стабилизации, на котором постепенно устанавливается характерный профиль скоростей. Измерение плотности тепловых потоков было выполнено в 15 точках, по 5 точек на верхней, боковой и нижней поверхности канала соответственно. Расположение датчиков измерительных приборов показано на рисунке 22.

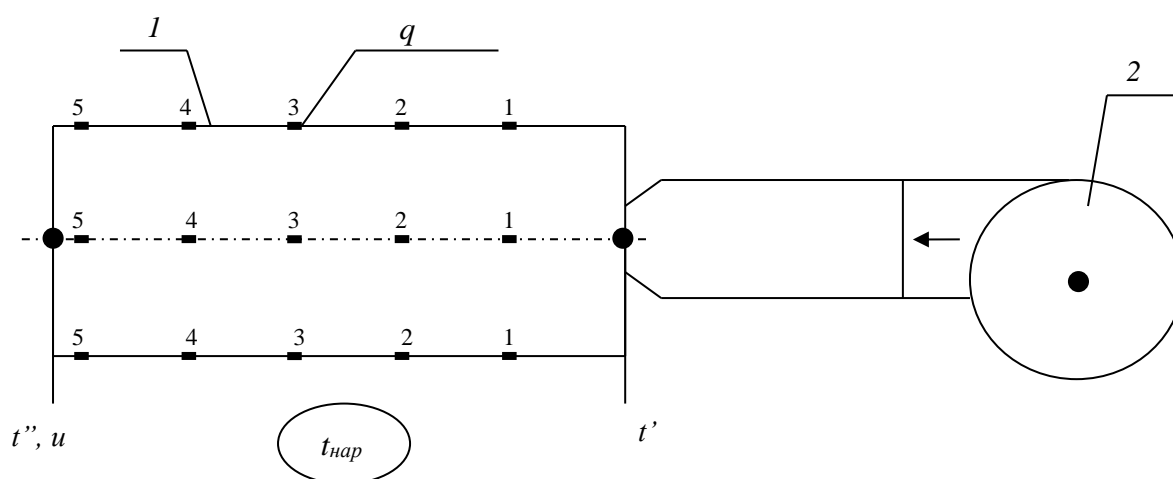


Рисунок 22 – Позиция датчиков измерительного прибора:

1 – канал; 2 – вентилятор с ТЭНом

2.3 Условия проведения эксперимента и экспериментальные данные

Экспериментальное исследование проведено при температуре окружающей среды $+9\text{ }^{\circ}\text{C}$. В ходе проведения эксперимента контролировались температуры воздуха внутри трубопровода, измерение которых производилось в начале и конце участка, при этом датчики температур располагались по оси трубы. Кроме того, определялись скорость воздуха внутри трубопровода.

Плотность теплового потока и температура в точках, указанных на рисунке 22, измерялись прибором ИТП – МГ4.03 «ПОТОК», а скорость воздуха – универсальным измерительным прибором АТЕ 9538.

Электронный измеритель плотности тепловых потоков ИТП-МГ4 «Поток» имеет следующие технические характеристики:

- Диапазон измерения плотности тепловых потоков от 2 до 500 Вт/м².
- Предел основной относительной погрешности измерения тепловых потоков составляет: в диапазоне 2...30 Вт/м² ± 7%; в диапазоне 30...500 Вт/м² ± 5%.
 - Дополнительная погрешность от измерения температуры воздуха, окружающего блок электронный, не превышает 1% на каждые 10 °С измерения температуры в диапазоне от минус 10 °С до плюс 40 °С.
 - Дополнительная погрешность от измерения температуры преобразователя теплового потока не превышает 0,83% на каждые 10 °С изменения температуры в диапазоне от 0 °С до минус 30 °С.
 - Диапазон измерения температуры от минус 30 °С до плюс 100 °С.
 - Предел основной абсолютной погрешности измерения температуры составляет ± 0,2 °С.
 - Диапазон определения термического сопротивления и сопротивления теплопередаче от 0,05 до 5 м²·К/Вт.
 - Предел основной относительной погрешности определения термического сопротивления и сопротивления теплопередаче составляет ±10%.
 - Постоянная времени измерения, мин, не более:
 - ✓ плотности теплового потока – 5,0;
 - ✓ температуры – 3,0.
 - Термическое сопротивление преобразователя теплового потока – не более 0,003 м²·К/Вт.
 - Длина соединительного кабеля 5,0 м.
 - Питание прибора осуществляется от батареи типа «Корунд» (6F22), напряжение питания $9_{-3,5}^{+0,5}$ В или от сетевого блока питания.
 - Ток, потребляемый прибором от батареи типа «Корунд» не более 12 мА.
 - Время непрерывной работы без замены батареи не менее 20 часов.

Универсальный измеритель АТЕ-9538 сочетает в себе термоанемометр, измеритель влажности, люксметр, измеритель температуры контактным методом

при помощи термопар. Технические характеристики данного прибора показаны в таблице 5.

Таблица 5 – Технические характеристики универсального измерителя АТЕ-9538

Параметр	Значение
Измерение скорости воздушного потока	
Диапазон	0,4...25,0 м/с
Разрешение	0,1 м/с
Погрешность измерения	$\pm(2\% \text{ измеренного значения} + 0,2 \text{ М/с})$
Измерение температуры воздушного потока	
Диапазон	0...50 °С
Разрешение	0,1 °С
Погрешность	$\pm 0,8 \text{ °С}$

Измерения производились после выхода установки на стационарный режим, который наступал в среднем через 53 минуты после начала работы установки. Длительность измерения температур и тепловых потоков в каждой контрольной точке составила 5 минут, включая период адаптации датчиков к температурным условиям каждой точки и время измерений. Период времени 5 минут был определен в процессе предварительных измерений.

Для подтверждения требуемой точности экспериментальных данных в каждой точке было произведено по 5 замеров плотности потока тепловой энергии. Кроме того, производился контроль замеров теплового потока посредством периодического измерения разности температур на стенке канала при помощи дифференциальной термопары «хромель – копель». Полученные данные подставлялись в уравнение Фурье и сверялись с показаниями измерителя плотности теплового потока. При этом физические свойства оргстекла, из которого выполнены стенки канала, при фиксированной толщине стабильно определяются в диапазоне 0,196 – 0,199 Вт/(м·К) и используются в качестве образца. В результате были получены экспериментальные данные, приведенные в таблице 6.

Таблица 6 – Плотности теплового потока на наружной поверхности канала

Поверхность канала	Номер замера	Плотность теплового потока, Вт/м ²														
		Базовая конструкция экспериментальной установки ЭУ №1					Конструкция экспериментальной установки с расположенным вокруг трубопровода теплоотражающим экраном ЭУ №2					Конструкция экспериментальной установки с расположенными вокруг трубопровода двумя теплоотражающими экранами ЭУ №3				
		Позиция измерительного прибора														
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Верхняя сторона канала	1	196,2	196,0	193,9	183,0	177,0	95,1	98,1	96,7	85,7	86,5	65,2	64,3	63,7	59,8	60,1
	2	205,0	198,1	191,0	181,6	175,7	99,2	99,5	98,4	88,3	89,0	66,2	63,2	62,5	61,0	60,6
	3	195,6	198,2	197,0	184,0	180,1	93,8	93,4	92,6	90,0	90,2	68,5	66,7	65,8	63,3	62,4
	4	193,8	192,6	193,0	185,0	182,2	94,5	94,4	90,5	87,1	84,3	64,0	62,1	61,4	60,9	59,9
	5	197,0	193,0	187,1	187,9	179,0	99,1	99,3	92,0	87,0	84,7	63,7	63,6	60,2	58,8	58,0
Боковая сторона канала	1	108,1	101,1	99,3	95,0	84,2	47,6	45,1	44,0	43	46,4	32,2	27,9	26,1	29,7	33,4
	2	105,9	102,3	99,8	90,5	84,0	49,9	47,9	47,6	46,7	43,5	33,0	29,9	27,0	27,3	26,0
	3	110,8	103,6	105,1	95,7	81,0	46,9	47,2	45,3	46,6	48,5	34,1	32,4	28,4	27,0	27,4
	4	103,1	99,2	98,2	99,8	83,8	43,0	42,6	44,3	44,6	46,2	30,0	27,1	26,8	25,8	25,0
	5	103,4	99,0	94,1	93,4	85,0	49,1	44,1	42,1	44,2	44,1	33,3	31,9	28,0	29,6	29,5
Нижняя сторона канала	1	64,0	61,8	56,6	65,1	53,8	17,0	12,7	12,0	14,3	13,8	10,9	14,3	13,3	13,5	11,2
	2	64,1	61,1	62,5	60,0	54,0	16,5	15,3	13,8	14,0	13,0	14,3	13,5	12,8	12,7	11,5
	3	66,8	60,3	55,5	65,8	52,2	15,2	12,4	10,9	13,0	12,4	12,2	13,3	13,3	13,2	10,5
	4	68,7	62,1	54,3	66,3	54,5	17,0	15,0	11,0	14,0	12,5	9,8	12,5	11,8	12,6	10,8
	5	61,6	60,7	57,0	62,1	51,1	17,3	12,0	12,7	15,9	13,0	10,2	11,0	10,5	13,5	10,3

2.4 Математическая обработка результатов эксперимента

Для обработки полученных в ходе эксперимента данных принято решение вести расчеты относительно средних по поверхностям (верхней, боковой и нижней) значений плотности теплового потока, измеренных датчиками, установленными на равном удалении от конца участка стабилизации. В таблице 7 приведены значения средней плотности теплового потока на наружной поверхности канала.

По полученным данным, для исследуемых вариантов установок, построены зависимости, отражающие характер изменения средней плотности теплового потока по длине канала (рисунки 23-25).

Методом наименьших квадратов получена эмпирическая зависимость средней по поверхности канала плотности потока тепловой энергии. Полученные зависимости показаны на рисунке 26. Для наглядного сравнения результатов, данные для всех вариантов экспериментальной установки сведены на одно графическое поле.

Таблица 7 – Среднее значение плотности теплового потока на наружной поверхности канала

	Номер замера	Плотность теплового потока, Вт/м ²				
		Расположение измерительного прибора				
		1	2	3	4	5
ЭУ №1	1	119,1	115,0	112,3	109,5	99,8
	2	120,2	116,0	113,3	105,7	99,4
	3	121,0	116,4	115,7	110,3	98,6
	4	117,2	113,3	110,9	112,7	101,1
	5	116,4	112,9	108,1	109,2	100,0
ЭУ №2	1	51,8	50,3	49,2	46,5	48,3
	2	53,9	52,7	51,9	48,9	47,3
	3	50,7	50,1	48,5	49,1	49,9
	4	49,4	48,7	47,5	47,6	47,3
	5	53,7	49,9	47,2	47,8	46,5
ЭУ №3	1	35,1	33,6	32,3	33,2	34,5
	2	36,6	34,1	32,3	32,1	31,0
	3	37,2	36,2	34,0	32,6	31,9
	4	33,5	32,2	31,7	31,3	30,2
	5	35,1	34,6	31,7	32,9	31,8

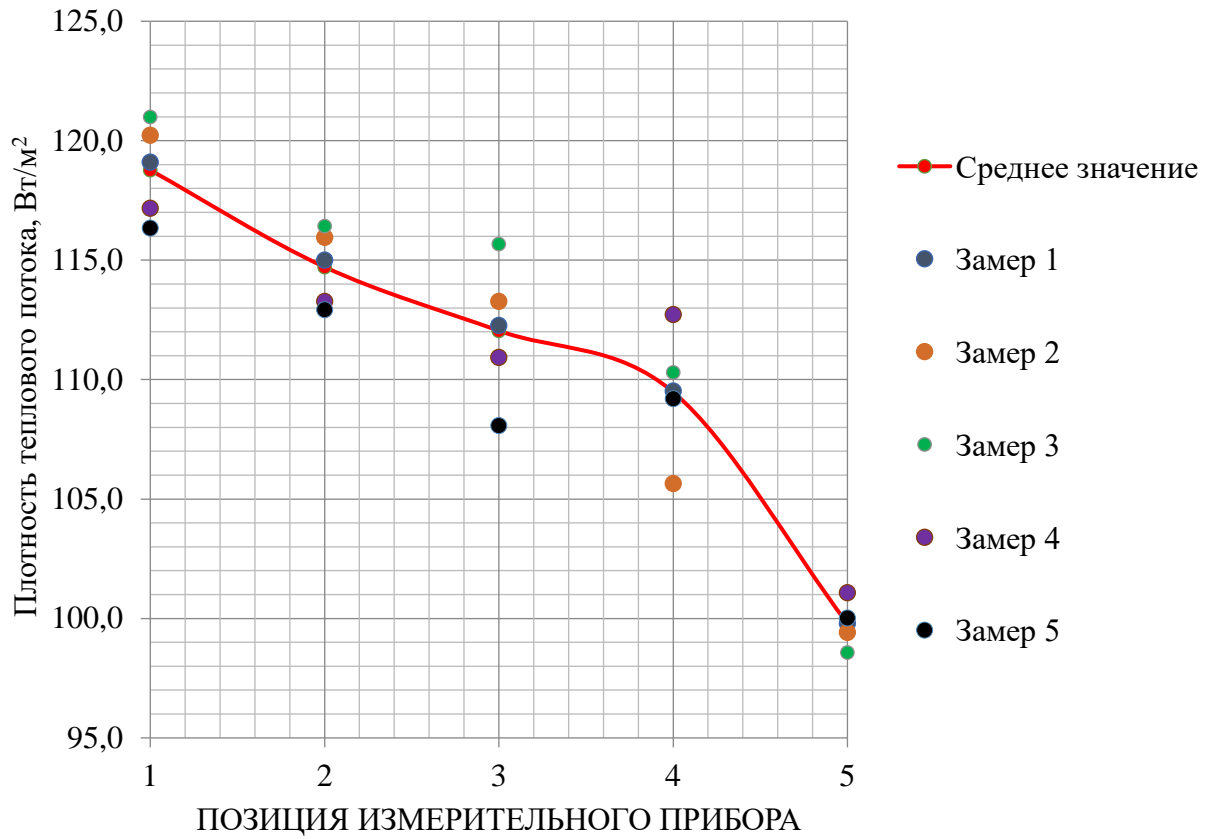


Рисунок 23 – Распределение плотности теплового потока по длине канала ЭУ №1

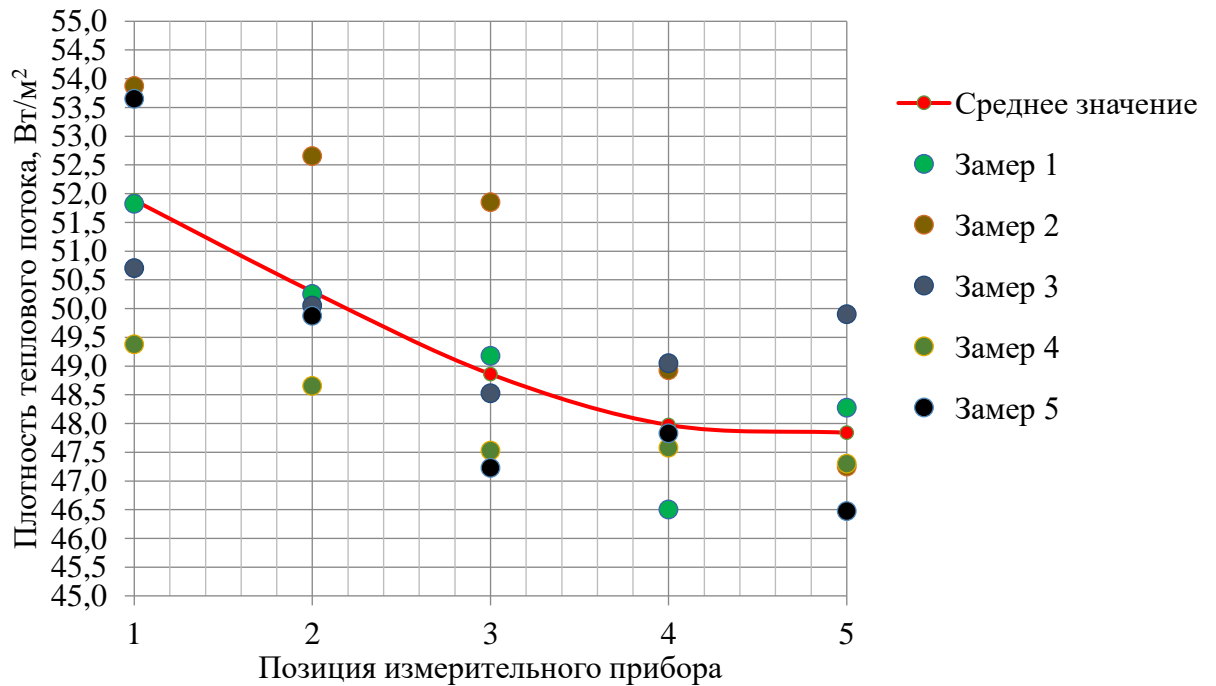


Рисунок 24 – Распределение плотности теплового потока по длине канала ЭУ №2

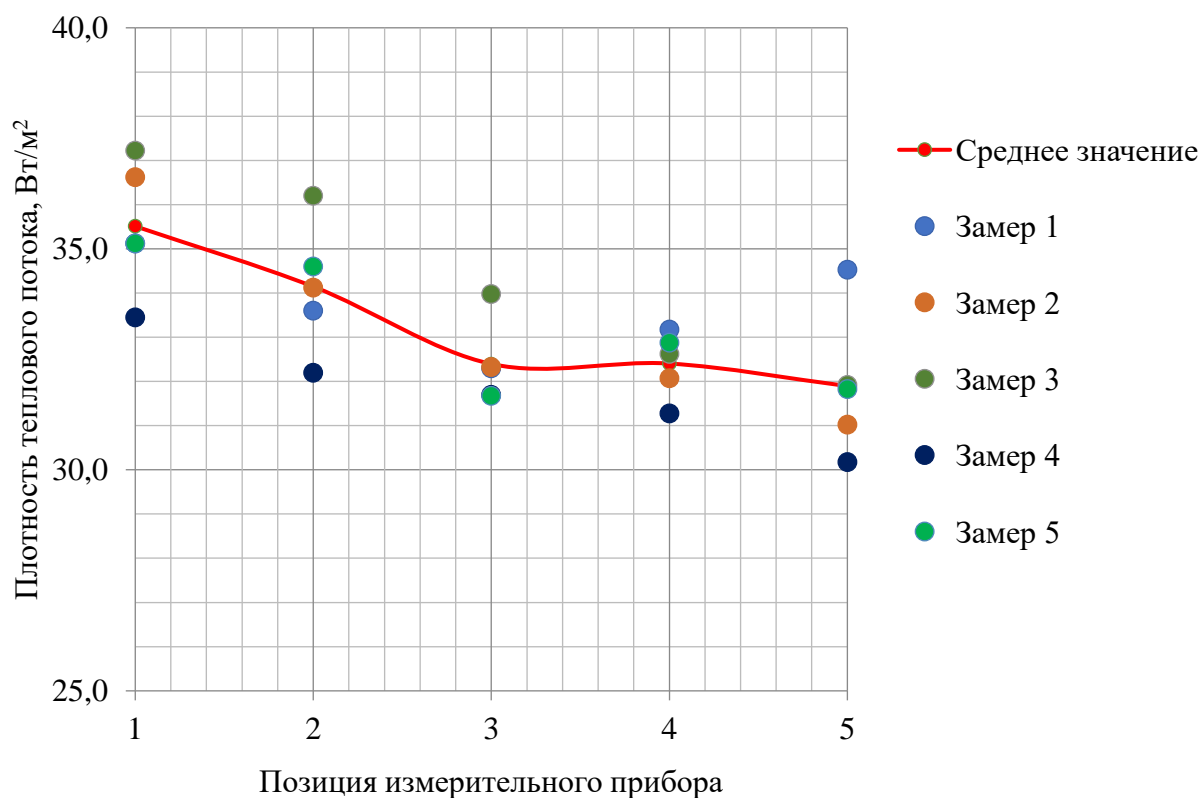


Рисунок 25 – Распределение плотности теплового потока по длине канала ЭУ №3

Для оценки способности теплоотражающего экрана снижать тепловые потери в работе предложен коэффициент эффективности теплоотражающего экрана, определяемый по формуле

$$K_э = 1 - (q_э / q_{норм}), \quad (1)$$

где $q_э$ – плотность теплового потока в системе с теплоотражающим экраном, Вт/м²;

$q_{норм}$ – плотность теплового потока в системе без теплоотражающего экрана, Вт/м².

Значения коэффициентов эффективности теплоотражающих экранов при геометрических и теплофизических параметрах экспериментальной установки показаны в таблице 8.

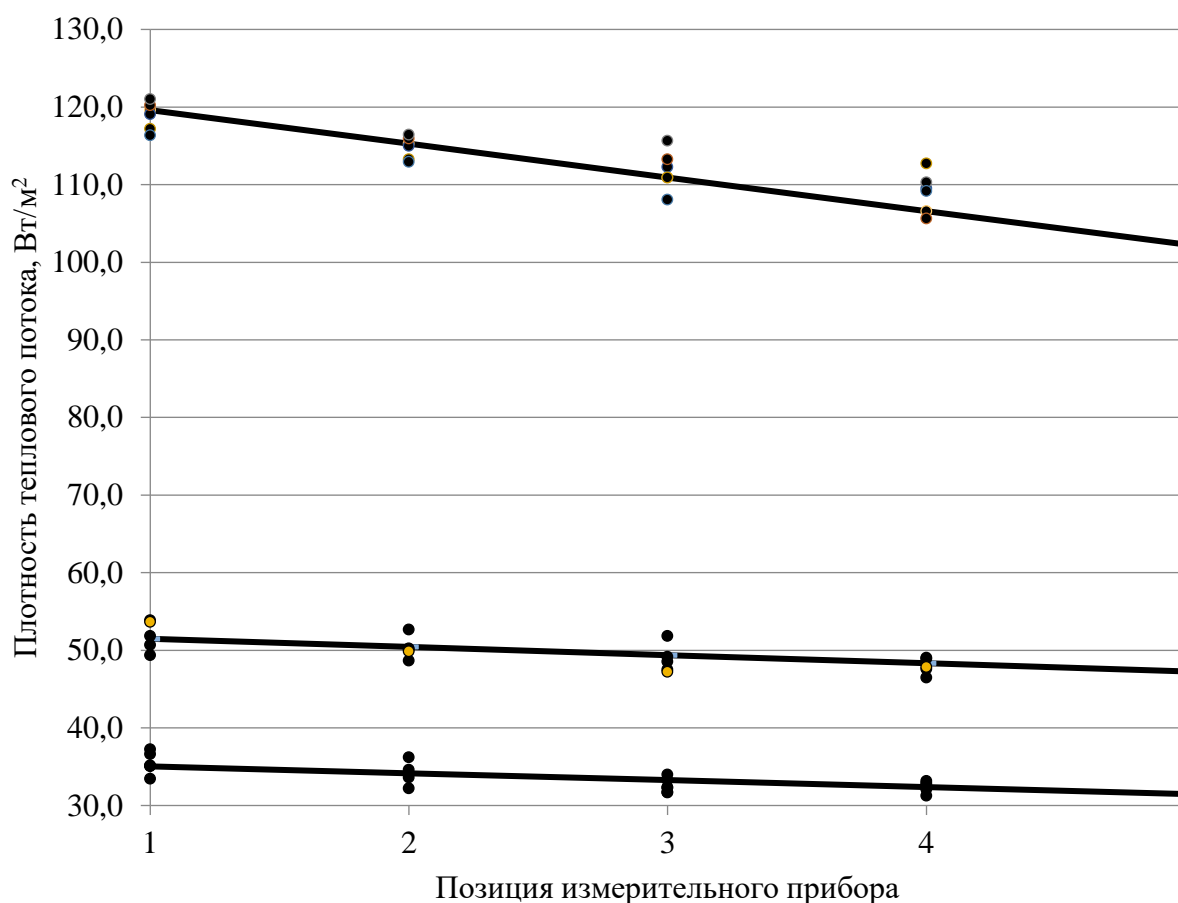


Рисунок 26 – Распределение плотности теплового потока по длине канала ЭУ №3

Таблица 8 – Экспериментальные и расчетные значения тепловых потоков

Конфигурация экспериментальной установки	Плотность теплового потока, Вт/м ²			Среднее значение плотности теплового потока, Вт/м ²	Коэффициент эффективности теплоотражающего экрана
	Верхняя поверхность канала	Боковая поверхность канала	Нижняя поверхность канала		
(ЭУ №1)	189,7	97,0	60,1	110,95	
(ЭУ №2)	92,4	45,6	13,9	49,375	0,55
(ЭУ №3)	62,6	29,2	12,1	33,275	0,7

Математическая обработка экспериментальных данных проводилась в соответствии с указанным в [49, 50, 51, 52] алгоритмом. В результате были определены:

1. Среднеарифметическое значение плотности теплового потока в каждой точке по формуле:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2)$$

где x_i – значение измеряемой величины,

n – количество измерений.

2. Погрешности отдельных измерений, т.е. отклонение от среднего значения для каждого результата измерений, характеризующее абсолютную ошибку.

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}. \quad (3)$$

3. Квадраты погрешностей отдельных измерений Δx_i^2 .

4. Дисперсия, определяемая как среднее значение квадратов отклонений от среднеарифметического значения по формуле

$$D(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (4)$$

5. Среднеквадратичное отклонение

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (5)$$

6. Границы доверительного интервала, при значении коэффициента надежности, принятым равным 0,95, по формуле

$$\Delta = t_{n\alpha} \frac{S_x}{\sqrt{n}}. \quad (6)$$

7. Относительную погрешность по формуле:

$$\gamma = \frac{\Delta}{x} \cdot 100\% \quad (7)$$

Расчет произведен для коэффициента надежности 0,95, которому соответствует коэффициент Стьюдента равный 2,776. Рассчитанные в соответствии с указанным алгоритмом показатели математической статистики приведены в таблицах 9-11.

Таблица 9 – Результаты математической обработки данных для ЭУ№1

Сторона расположения измерительного прибора	Номер замера	Показатель				
		Позиция измерительного прибора				
		1	2	3	4	5
		Среднеарифметическое значение плотности теплового потока в каждой точке, Вт/м ²				
Верхняя		197,5	195,6	192,4	184,3	178,8
Боковая		106,3	101,0	99,3	94,9	83,6
Нижняя		65,0	61,2	57,2	63,9	53,1
		Абсолютная погрешность измерений, Вт/м ²				
Верхняя	1	-1,3	0,4	1,5	-1,3	-1,8
	2	7,5	2,5	-1,4	-2,7	-3,1
	3	-1,9	2,6	4,6	-0,3	1,3
	4	-3,7	-3,0	0,6	0,7	3,4
	5	-0,5	-2,6	-5,3	3,6	0,2
Боковая	1	1,8	0,1	0,0	0,1	0,6
	2	-0,4	1,3	0,5	-4,4	0,4
	3	4,5	2,6	5,8	0,8	-2,6
	4	-3,2	-1,8	-1,1	4,9	0,2
	5	-2,9	-2,0	-5,2	-1,5	1,4
Нижняя	1	-1,0	0,6	-0,6	1,2	0,7
	2	-0,9	-0,1	5,3	-3,9	0,9
	3	1,8	-0,9	-1,7	1,9	-0,9
	4	3,7	0,9	-2,9	2,4	1,4
	5	-3,4	-0,5	-0,2	-1,8	-2,0
		Дисперсия, Вт ² /м ⁴				
Верхняя		15,15	5,79	10,76	4,50	5,23
Боковая		8,46	3,14	12,43	9,25	1,86
Нижняя		6,06	0,45	7,96	5,85	1,61
		Среднеквадратичное отклонение, Вт ² /м ⁴				
Верхняя		4,35	2,69	3,67	2,37	2,56
Боковая		3,25	1,98	3,94	3,40	1,52
Нижняя		2,75	0,75	3,15	2,70	1,42
		Границы доверительного интервала, Вт/м ²				
Верхняя		5,39	3,33	4,55	2,94	3,17
Боковая		4,03	2,46	4,88	4,21	1,89
Нижняя		3,41	0,93	3,91	3,35	1,76
		Относительная погрешность измерений, %				
Верхняя		2,7	1,7	2,4	1,6	1,8
Боковая		3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
Нижняя		5,2	1,5	6,8	5,2	3,3

Таблица 10 – Результаты математической обработки данных для ЭУ№2

Сторона расположения измерительного прибора	Номер замера	Показатель				
		Позиция измерительного прибора				
		1	2	3	4	5
		Среднеарифметическое значение плотности теплового потока в каждой точке, Вт/м ²				
Верхняя		96,3	96,9	94,0	87,6	86,9
Боковая		47,3	45,4	44,7	45,0	45,7
Нижняя		16,6	13,5	12,1	14,2	12,9
		Абсолютная погрешность измерений, Вт/м ²				
Верхняя	1	-1,2	1,2	2,7	-1,9	-0,4
	2	2,9	2,6	4,4	0,7	2,1
	3	-2,5	-3,5	-1,4	2,4	3,3
	4	-1,8	-2,5	-3,5	-0,5	-2,6
	5	2,8	2,4	-2,0	-0,6	-2,2
Боковая	1	0,3	-0,3	-0,7	-2,0	0,7
	2	2,6	2,5	2,9	1,7	-2,2
	3	-0,4	1,8	0,6	1,6	2,8
	4	-4,3	-2,8	-0,4	-0,4	0,5
	5	1,8	-1,3	-2,6	-0,8	-1,6
Нижняя	1	0,4	-0,8	-0,1	0,1	0,9
	2	-0,1	1,8	1,7	-0,2	0,1
	3	-1,4	-1,1	-1,2	-1,2	-0,5
	4	0,4	1,5	-1,1	-0,2	-0,4
	5	0,7	-1,5	0,6	1,7	0,1
		Дисперсия, Вт ² /м ⁴				
Верхняя		5,44	6,49	8,97	2,09	5,41
Боковая		5,75	4,84	3,24	2,05	3,20
Нижняя		0,56	1,18	1,18	0,88	0,25
		Среднеквадратичное отклонение, Вт ² /м ⁴				
Верхняя		2,61	2,85	3,35	1,62	2,60
Боковая		2,68	2,46	2,01	1,60	2,00
Нижняя		0,83	1,22	1,22	1,05	0,56
		Границы доверительного интервала, Вт/м ²				
Верхняя		3,23	3,53	4,15	2,01	3,22
Боковая		3,32	3,05	2,49	1,98	2,48
Нижняя		1,03	1,51	1,51	1,30	0,69
		Относительная погрешность измерений, %				
Верхняя		3,4	3,6	4,4	2,3	3,7
Боковая		7,0	6,7	5,6	4,4	5,4
Нижняя		6,2	11,2	12,5	9,1	5,3

Таблица 11 – Результаты математической обработки данных для ЭУ№3

Сторона расположения измерительного прибора	Номер замера	Показатель				
		Позиция измерительного прибора				
		1	2	3	4	5
		Среднеарифметическое значение плотности теплового потока в каждой точке, Вт/м ²				
Верхняя		65,5	63,4	63,3	60,8	60,4
Боковая		32,1	28,4	25,7	28,0	32,7
Нижняя		10,9	13,5	12,4	13,5	11,0
		Абсолютная погрешность измерений, Вт/м ²				
Верхняя	1	-0,3	0,9	0,4	-1,0	-0,3
	2	0,7	-1,2	-1,8	0,2	0,2
	3	3,0	1,3	2,5	2,5	2,0
	4	-1,5	-1,3	-1,9	0,1	-0,5
	5	-1,8	0,2	0,7	-2,0	-1,4
Боковая	1	0,1	-0,5	0,4	1,7	0,7
	2	0,9	1,5	1,3	3,0	-0,7
	3	2,0	0,0	-1,3	-1,0	1,2
	4	-2,1	-2,3	0,1	-1,2	0,4
	5	-0,8	1,5	-0,7	-2,4	-1,7
Нижняя	1	0,0	0,8	0,9	0,0	0,2
	2	1,4	0,0	0,4	0,2	0,5
	3	0,3	1,8	0,9	-0,3	-0,5
	4	-1,1	-1,0	-0,6	0,1	-0,2
	5	-0,7	-1,5	-1,4	0,0	-0,1
		Дисперсия, Вт ² /м ⁴				
Верхняя		3,01	1,13	2,75	2,26	1,27
Боковая		1,97	2,01	0,87	4,02	1,09
Нижняя		0,75	1,43	0,82	0,03	0,12
		Среднеквадратичное отклонение, Вт ² /м ⁴				
Верхняя		1,94	1,19	1,85	1,68	1,26
Боковая		1,57	1,58	1,05	2,24	1,17
Нижняя		0,97	1,34	1,01	0,19	0,38
		Границы доверительного интервала, Вт/м ²				
Верхняя		2,41	1,48	2,30	2,08	1,56
Боковая		1,95	1,96	1,30	2,78	1,45
Нижняя		1,20	1,65	1,25	0,23	0,48
		Относительная погрешность измерений, %				
Верхняя		3,7	2,3	3,6	3,4	2,6
Боковая		6,1	6,9	5,0	9,9	4,4
Нижняя		11,0	12,2	10,1	1,7	4,3

Произведенная математическая обработка полученных в ходе эксперимента данных, позволила определить относительную погрешность измерений, которая в среднем составляет 5%. Предел допускаемой основной погрешности равен относительной погрешности измерительного прибора, который в диапазоне измерения тепловых потоков от 2 до 30 Вт/м² составляет 7%, а в диапазоне от 30 до 500 Вт/м² – 5%. Таким образом, общая погрешность измерений определяется относительной погрешностью измерительного прибора, т.к. результат измерений плотности теплового потока с надежностью $\alpha = 0,95$ не выходит за допустимые пределы.

2.5 Выводы по второй главе

1. Получены экспериментальные данные о влиянии теплоотражающих экранов на процесс теплообмена в тепловых сетях системы теплоснабжения, что предполагает существенное влияние излучения на процесс теплообмена в тепловой сети. Экспериментальные данные использованы для подтверждения адекватности математической модели работы системы, включающей теплоотражающий экран и тепловую сеть.

2. Экспериментальное исследование показало, что при данных геометрических и теплофизических параметрах тепловой сети и теплоотражающего экрана один экран способен сокращать тепловой поток на 55%, два экрана – на 70%.

Результаты исследования, приведенного в главе 2, отражены в 3 работах [97, 110, 111].

ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ И УСТРОЙСТВА ПО УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В КАНАЛЕ ТЕПЛОТРАССЫ

Прогнозирование изменений в тепловом режиме работы сетей теплоснабжения от проведения энергосберегающих мероприятий целесообразно проводить на основе исследования ее математической модели. Целью данной главы является определение допустимого тепловосприятия коллектора устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы на основе разработки и исследования математических моделей процессов теплообмена в сети теплоснабжения без дополнительных элементов, с применением теплоотражающего экрана и при совместной работе сети с устройством по утилизации тепловых потерь. Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

- составлена система дифференциальных уравнений, описывающих процесс теплообмена в тепловой сети;
- описаны граничных условий;
- разработаны и реализованы численные модели для исследования сложного радиационно-конвективного теплообмена в тепловых сетях системы теплоснабжения;
- верифицированы разработанные математические модели;
- определено место расположения и конструкция теплоотражающего экрана;
- определено влияние работы устройства по утилизации тепловых потерь на тепловой режим работы однотрубной и двухтрубной тепловой сети с канальной подземной прокладкой в непроходных каналах.

Исследование позволило оценить влияние работы устройства на тепловую сеть в условиях, соответствующих условиям реальной эксплуатации и, как следствие, решить вопрос о размещении элементов предлагаемого устройства и определить их геометрические размеры.

Для решения задач сложного сопряженного радиационно-конвективного теплообмена к настоящему времени разработаны и апробированы многочисленные программные пакеты (ANSYS Fluent, Comsol Multiphysics, FlowVision и др.) [53 - 56].

В рамках настоящей работы для численного моделирования сложного сопряженного радиационно-конвективного теплообмена в элементах тепловой сети использован программно-вычислительный комплекс Comsol Multiphysics. Такой выбор обусловлен одним из преимуществ пакета Comsol Multiphysics, заключающуюся в возможности совместного решения связанных междисциплинарных задач в единой среде, а также получением достоверных результатов математического моделирования работы тепловых сетей при использовании данного программного продукта другими авторами.

3.1 Описание объектов исследования

В настоящей главе производится построение математических моделей процессов теплообмена для следующих вариантов конструктивного исполнения тепловой сети:

- без дополнительных элементов;
- с теплоотражающим экраном;
- с теплоотражающим экраном и коллектором устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы.

Объектом исследования является тепловая сеть с подземной канальной прокладкой трубопровода в непроходном канале в однострубном и двухтрубном исполнении. Рассматривается один из наиболее типичных и распространенных диаметров трубопроводов равный 200 мм. Выбор такого диаметра обусловлен тем, что диапазон диаметров до 200 мм по своей протяженности является доминирующим в Российской Федерации [18]. Изоляция трубопровода выполнена из пенополиуретана и минеральной ваты. Толщина изоляции

принята в соответствии с [25]. Глубина залегания трубопровода равна 1,6 м. Канал железобетонный лоткового типа.

3.2 Математические модели процессов теплообмена в тепловой сети

Вопросам математического описания процессов теплообмена в тепловых сетях посвящены работы Половникова В.Ю. [11, 57], Кузнецова Г.В. [58] Тарасевича Е.И. [59], Селезнева В.Е., Алешина В.В., Прялова С.Н. [60]. Данные исследования проводились с целью анализа штатного и аварийного режимов работы тепловых сетей с подземной канальной прокладкой трубопроводов, но не рассматривали применение энергосберегающих технологий.

Математическое моделирование процесса переноса теплоты в рассматриваемой системе основано на решении системы дифференциальных уравнений неразрывности, движения и энергии [61 - 64].

Уравнение неразрывности, являющееся законом сохранения массы в гидродинамике, в векторной форме имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho \mathbf{u}) = 0, \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;

t – время, с;

\mathbf{u} – вектор скорости движения жидкости, м/с.

Уравнение движения, являющееся законом сохранения количества движения, в векторной форме имеет вид

$$\rho \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}] + \mathbf{F}, \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;

\mathbf{u} – вектор скорости движения жидкости, м/с;

p – давление жидкости, Па;

\mathbf{F} – вектор объемной силы, Н/м³;

\mathbf{I} – единичный тензор;

t – время, с;

τ – тензор вязких напряжений, Па. Определяется по уравнению

$$\tau = 2\mu S - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I, \quad (3)$$

где μ – динамическая вязкость, Па·с;

S – тензор скоростей деформации, 1/с. Определяется по уравнению

$$S = \frac{1}{2}(\nabla u + (\nabla u)^T). \quad (4)$$

Уравнение энергии, являющееся законом сохранения энергии, в векторной форме имеет вид:

$$\rho \cdot C_p \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (u \cdot \nabla)T \right) + \nabla \cdot q = \tau : S - \frac{T}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \Big|_p \left(\frac{\partial p}{\partial t} + (u \cdot \nabla) \cdot p + Q \right), \quad (6)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;

C_p – изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К);

T – абсолютная температура, К;

t – время, с;

u – скорость движения жидкости, м/с;

q – тепловой поток теплопроводностью, м/с².

τ – тензор вязких напряжений, Па;

S – тензор скоростей деформации, 1/с;

Q – источник тепловой энергии, кроме вязкой диссипации, Вт/м³.

При составлении системы дифференциальных уравнений, описывающих теплообмен в рассматриваемой системе, были приняты следующие допущения:

- температура воздуха в канале и в элементах исследуемой системы по длине теплотрассы постоянна;
- температура теплоносителя в трубе постоянна;
- осевое течение воздуха в канале вдоль теплопровода отсутствует;
- скорость воздуха на поверхности трубопроводов и коллектора равна нулю;

- вязкость и средняя удельная теплоемкость воздуха не зависят от температуры;
- теплофизические свойства материалов изоляции не зависят от влажности.
- окружающая среда, в виде грунта является однородной и имеет постоянные теплофизические свойства;
- воздух в канале является несжимаемым и прозрачным;
- степень черноты поверхностей не зависит от температуры;
- степень черноты и поглощательная способность не зависит от длины волны;
- термическое сопротивление наружной оболочки тепловой изоляции пренебрежимо мало.

Необходимо отметить, что при естественной конвекции, наблюдаемой в воздушной среде канала теплотрассы, основная движущая сила обусловлена наличием поля температур, приводящим к изменению плотности воздуха, что влечет за собой появление выталкивающей силы. При этом поле температур связано с течением жидкости, поэтому уравнения движения, энергии и неразрывности связаны между собой через изменение плотности и, соответственно, решать эти уравнения необходимо совместно [66]. Это усложняет исследование и значительно увеличивает трудоемкость дальнейших численных расчетов. В связи с этим обстоятельством при изучении естественной конвекции прибегают к различным допущениям, упрощающим дальнейшие расчеты, не приводящие к значимым искажениям в понимании физики процесса.

В работе [65] говорится о том, что если скорость движения жидкости мала по сравнению со скоростью звука, то возникающие в результате движения жидкости изменения давления настолько малы, что вызываемые ими изменения плотности пренебрежимо малы. Кроме того, чтобы в уравнениях движения неравномерно нагретой жидкости условно можно было считать плотность постоянной, необходимо, чтобы имеющиеся в жидкости разности температур

были достаточно малы. В этом случае речь идет об абсолютных значениях разностей температур, а не о градиенте температуры.

В данной работе разности температур воздуха в канале являются малыми, поэтому воздух принят несжимаемым. Это упрощает основные уравнения естественной конвекции. Однако изменение плотности в уравнениях необходимо учесть. Для этого в работе принято допущение Буссинеска, согласно которому, разность плотностей, вызывающую возникновение течения в результате взаимодействия между гравитационной объемной силой и градиентом гидростатического давления, можно приближенно представить как влияние одной лишь температуры, описываемое уравнением (8), а в уравнении неразрывности изменением плотности можно пренебречь. Т.е. в условиях решаемой задачи несжимаемой жидкости переменность плотности учитывается только при вычислении объемной силы [66, 67, 68]. Таким образом, разность плотностей можно представить в виде:

$$\rho_a - \rho = \rho \cdot \beta \cdot (t - t_a), \quad (8)$$

где ρ_a, t_a – плотность и температура жидкости в равновесном состоянии;

ρ, t – плотность и температура жидкости;

β – коэффициент объемного расширения жидкости, 1/К.

Объемная сила равна

$$G = g\rho \cdot \beta \cdot (t - t_a), \quad (9)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

С учетом принятых допущений задача сводится к двумерной постановке. Основные определяющие уравнения для нахождения полей скорости и температуры в процессе теплообмена в прямоугольной декартовой системе координат с учетом принятых допущений приведены ниже.

Поле скоростей в воздушном пространстве канала теплотрассы определяется системой уравнений движения (10, 11) и неразрывности (12).

$$\rho \cdot \left(u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right); \quad (10)$$

$$\rho \cdot \left(u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) - g\rho \cdot \beta \cdot (t - t_a), \quad (11)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;

u – скорость движения жидкости, м/с.

p – давление жидкости, Па;

μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с.

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = 0. \quad (12)$$

Температурное поле в воздушном пространстве канала теплотрассы определяется решением уравнения энергии для жидкости

$$\rho \cdot C_p \cdot \left(u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (13)$$

где C_p – средняя удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К);

λ – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К).

Температурное поле в воздушном пространстве канала теплотрассы определяется решением уравнения энергии для твердого тела

$$\lambda_w \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = 0, \quad (14)$$

где λ_w – коэффициент теплопроводности твердого тела, Вт/(м·К).

Математические модели процессов теплообмена в описанных ранее вариантах тепловой сети имеют в своей основе идентичные уравнения движения (10), (11), неразрывности (12) и переноса энергии (13), (14), но разный набор элементов с соответствующими граничными условиями. В состав тепловой сети без дополнительных элементов входит трубопровод и канал. Тепловая сеть с теплоотражающим экраном состоит из трубопровода, теплоотражающего экрана и канала. Тепловая сеть с теплоотражающим экраном и коллектором устройства включает в себя трубопровод, теплоотражающий экран, канал и коллектор.

Зададим граничные условия (ГУ) для системы уравнений (10) – (14) на границах канала теплотрассы (рисунок 27) с координатами $x = 0$, $y = 0$, $x = A$, $y = B$.

Ниже приведен перечень граничных условий для всех моделей:

- Г1 – граничное условие 3-го рода, описывающее теплообмен на внутренней поверхности трубопроводов, через которую подводится теплота;
- Г2 – граничное условие 3-го рода, описывающее теплообмен на поверхности изолированного трубопровода;
- Г3 – граничное условие 3-го рода, описывающее теплообмен на поверхности теплоотражающего экрана;
- Г4 – граничное условие 3-го рода, описывающее теплообмен на внутренней поверхности канала;
- Г5 – граничное условие 4-го рода, описывающее теплообмен на границе контакта внешней стороны канала с прилегающим грунтом;
- Г6 – граничное условие 3-го рода, описывающее теплообмен на внешней поверхности коллектора;
- Г7 – граничное условие 3-го рода, описывающее теплообмен у внутренней поверхности коллектора, через которую отводится теплота.

Таким образом, первая математическая модель, описывающая теплообмен в тепловой сети без дополнительных элементов (М1), имеет границы Г1, Г2, Г4, Г5. Вторая математическая модель, описывающая теплообмен в тепловой сети с теплоотражающим экраном (М2), имеет границы Г1, Г2, Г3, Г4, Г5. Третья математическая модель, описывающая теплообмен в тепловой сети при ее совместной работе с устройством по утилизации тепловых потерь в канале тепло-трассы (М3), имеет границы Г1, Г2, Г3, Г4, Г5, Г6, Г7.

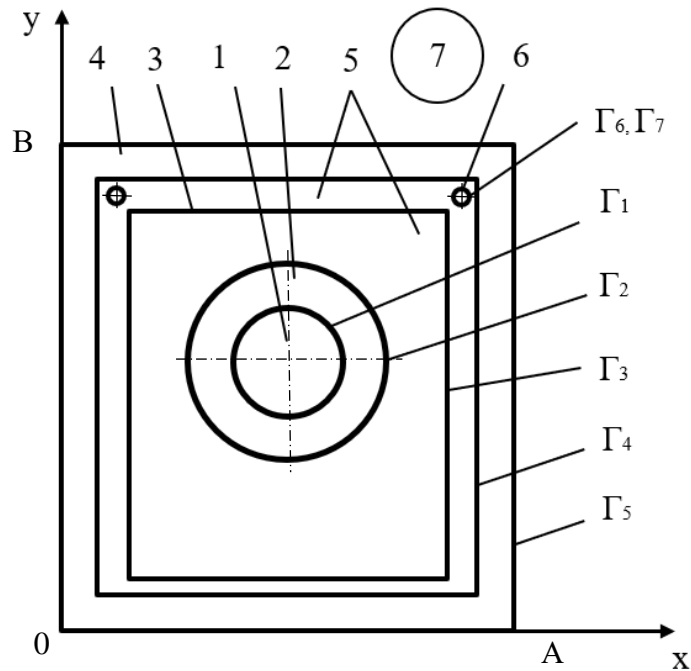


Рисунок 27 – Модель рассматриваемой системы с указанием граничных условий:

- 1 – теплоноситель; 2 – изолированный трубопровод; 3 – теплоотражающий экран;
4 – канал; 5 – воздух канала теплотрассы; 6 – коллектор; 7 – окружающая среда

Граничные условия 3-го рода, описывающие процесс теплоотдачи на поверхности твердых тел при взаимодействии с воздухом канала теплотрассы с учетом теплообмена излучением ($\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_6$) в общем случае имеют вид:

$$-\lambda_w \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) = \alpha_\varepsilon (T_w - T_{\text{возд}}) + \varepsilon_w \cdot (e_b(T) - G), \quad (15)$$

где T_w – температура стенки, °С;

$T_{\text{возд}}$ – температура воздуха в канале, °С.

α_ε – коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху в канале, Вт/(м²·К);

ε_w – степень черноты стенки;

$e_b(T)$ – плотность потока собственного излучения, Вт/м²;

G – суммарная поверхностная плотность потока излучения, падающего на поверхность, Вт/м².

Граничные условия 3-го рода, описывающее процесс теплоотдачи на внутренней поверхности трубопроводов и коллектора (Γ_1, Γ_7) в общем случае имеют вид:

$$-\lambda_w \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) = \alpha_{mn} (T_w - T_{mn}), \quad (16)$$

где T_{mn} – температура теплоносителя, °С;

α_{mn} – коэффициент теплоотдачи от стенки к теплоносителю, Вт/(м²·К).

Граничное условие 4-го рода описывающее условие теплообмена между наружной поверхностью канала и грунтом имеют вид:

$$-\lambda_{\text{бет}} \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) = -\lambda_{\text{гр}} \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right), \quad (17)$$

где $\lambda_{\text{бет}}$ – коэффициент теплопроводности железобетона, Вт/(м·К);

$\lambda_{\text{гр}}$ – коэффициент теплопроводности грунта, Вт/(м·К).

Для расчета теплообмена излучением использовались следующие математические соотношения, определяющие эффективный и результирующий тепловой поток излучения с поверхности твердых тел [69, 70, 71]:

$$J = \rho_d \cdot G + \varepsilon_w \cdot e_b(T), \quad (18)$$

$$q_{\text{рез}} = (1 - \rho_d) \cdot G - \varepsilon_w \cdot e_b(T), \quad (19)$$

где J – эффективный тепловой поток излучения, Вт/м²;

ρ_d – коэффициент диффузного отражения.

Зависимость плотности потока собственного излучения абсолютно черного тела от температуры определяется по уравнению Стефана-Больцмана:

$$e_b(T) = \int_0^{\infty} e(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4, \quad (20)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴).

Суммарная поверхностная плотность потока излучения, падающего на поверхность равна

$$G = G_m + G_{\text{amb}} + G_{\text{ext}}, \quad (21)$$

где G_m – падающее излучение с других поверхностей системы, Вт/м²;

G_{ext} – падающее излучение с внешних источников, Вт/м²;

G_{amb} – плотность потока излучения окружающей среды, Вт/м².

Все поверхности рассматриваемой системы являются диффузно серыми, то есть могут диффузно излучать и диффузно отражать падающее излучение. Интенсивность излучения таких поверхностей одинакова по всем направлениям. При этом зависимость излучательных и поглощательных свойств поверхностей от длины волны не учитывается. Это условие справедливо, поскольку в работе рассмотрен достаточно ограниченный спектральный диапазон, в пределах которого изменением коэффициентов излучения и отражения можно пренебречь.

Граничное условие диффузно-излучающей и отражающей поверхности при моделировании теплообмена излучением с поверхности на поверхность в прозрачной среде задано на наружных поверхностях трубопровода и коллектора, на внутренней поверхности канала теплотрассы, на всех поверхностях теплоотражающих экранов. При этом эффективный и результирующий тепловые потоки излучением рассчитываются по уравнениям (18) и (19). С учетом отсутствия внешних источников излучения и излучения окружающей среды данные уравнения принимают следующий вид:

$$J = (1 - \varepsilon_w) \cdot G_m + \varepsilon_e e_b(T), \quad (22)$$

$$-n \cdot q_{\text{рез}} = \varepsilon_w \cdot (G_m - e_b(T)). \quad (23)$$

3.3 Верификация математических моделей

Для верификации математических моделей и обоснованности принятых при их разработке допущений было выполнено сравнение результатов данных экспериментального исследования с результатами численных расчетов, выполненных в программно-вычислительном комплексе Comsol Multiphysics [72, 73].

Экспериментальное исследование, описанное в главе 2 настоящей диссертационной работы, проводилось на трех конфигурациях экспериментальной установки: без экрана (ЭУ №1), оснащенной одним теплоотражающим

экраном (ЭУ №2) и оснащенной двумя теплоотражающими экранами, расположенными вокруг трубопровода (ЭУ №3).

Численное моделирование процессов теплообмена в экспериментальной установке позволяет оценивать достоверность численных расчетов процессов сопряженного теплообмена с участием теплоотражающих экранов.

Граничные условия определены экспериментально. Физические характеристики материалов экспериментальной установки показаны в таблице 12 [74-76].

Таблица 12 – Теплофизические свойства материалов экспериментальной установки

Наименование	Технические характеристики				Степень черноты
	Материал	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/м·К	Теплоемкость, Дж/кг·К	
Трубопровод	Полипропилен	990	0,19	1930	0,9
Теплоотражающий экран	Алюминий	2670	204	920	0,15
Канал	Оргстекло	1100	0,196	1800	0,92

На рисунке 28 показана принципиальная схема расчетной области для рассматриваемых вариантов экспериментальной установки с указанием основных размеров.

Из рисунка 29 видно, что полученное температурное поле и поле скоростей являются достаточно типичными [24]. В этих условиях теплый воздух от трубопровода поступает к верхней стенке канала и, остывая около боковых стенок, движется вниз. На рисунках 30 и 31 показаны поля температур и скоростей в системах, включающих один и два теплоотражающих экрана соответственно. При этом очевидным является тот факт, что наличие экранирующего устройства вокруг данного трубопровода снижает как температуру воздуха в канале, так и его подвижность, причем, чем больше стоит экранов, тем этот эффект более выражен.

Экспериментальные и расчетные значения тепловых потоков представлены в таблице 13 и на рисунке 32.

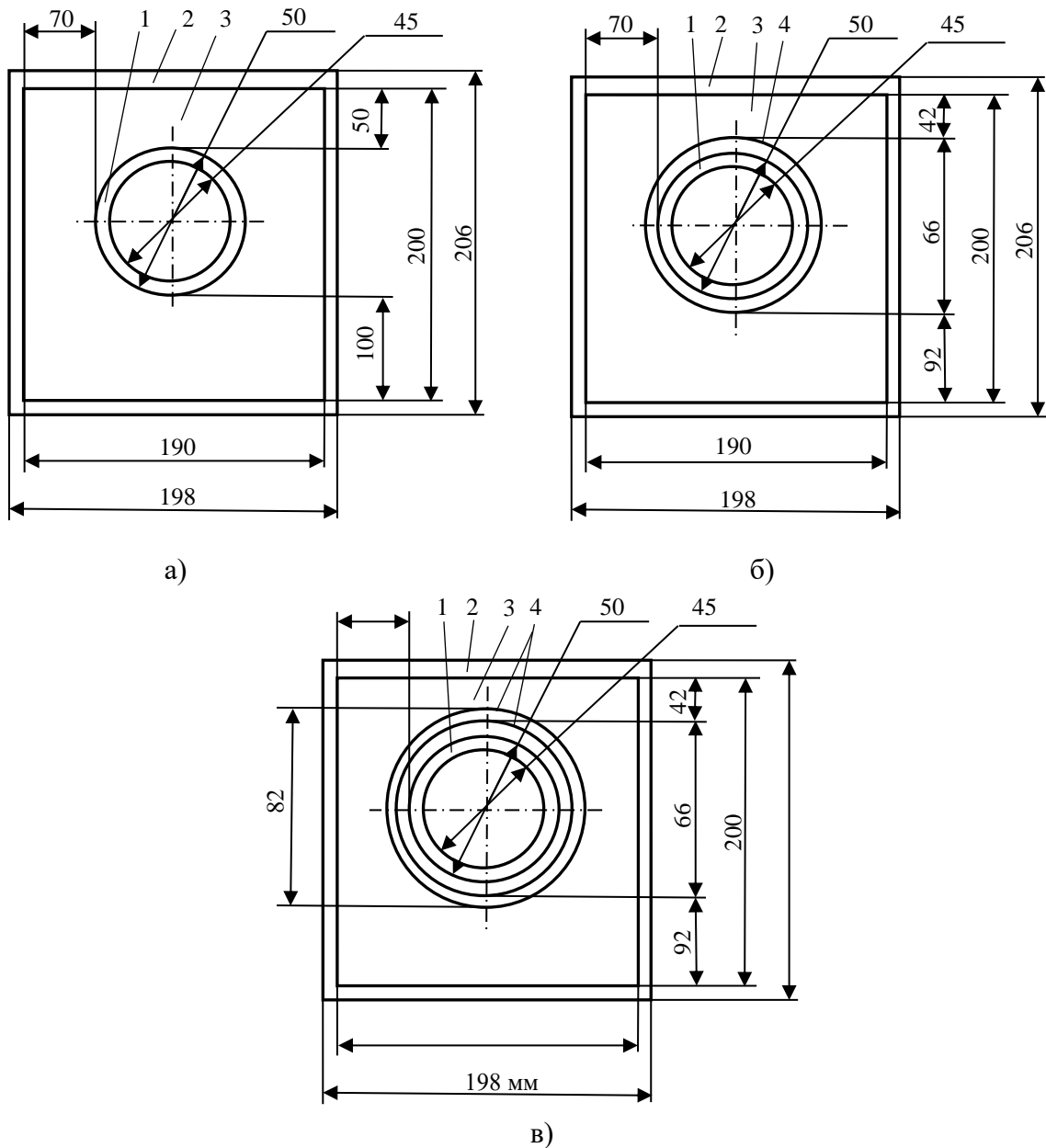
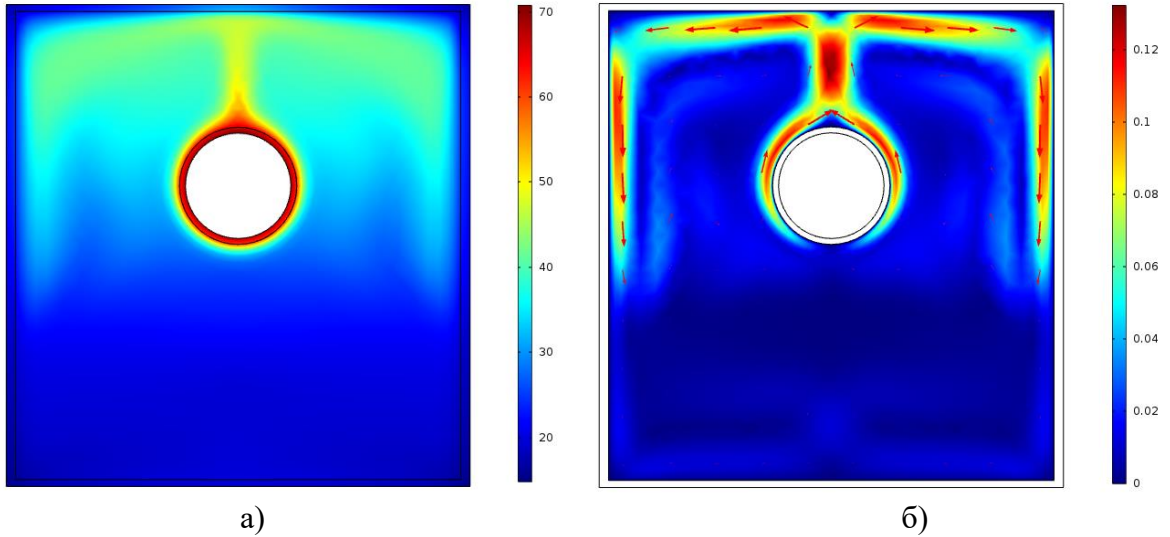


Рисунок 28 – Схемы расчетной области экспериментальной установки:

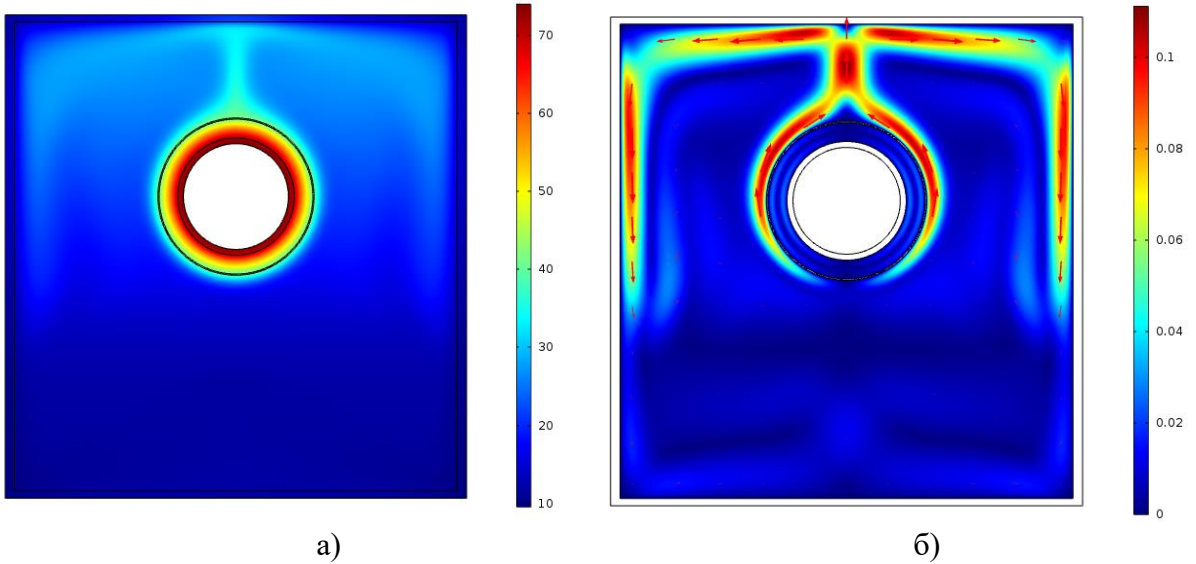
а) базовая экспериментальная установка; б) экспериментальная установка с одним теплоотражающим экраном; в) экспериментальная установка с двумя теплоотражающими экраном:

1 – полимерный трубопровод; 2 – канал из оргстекла; 3 – воздух канала;
4 – теплоотражающий экран

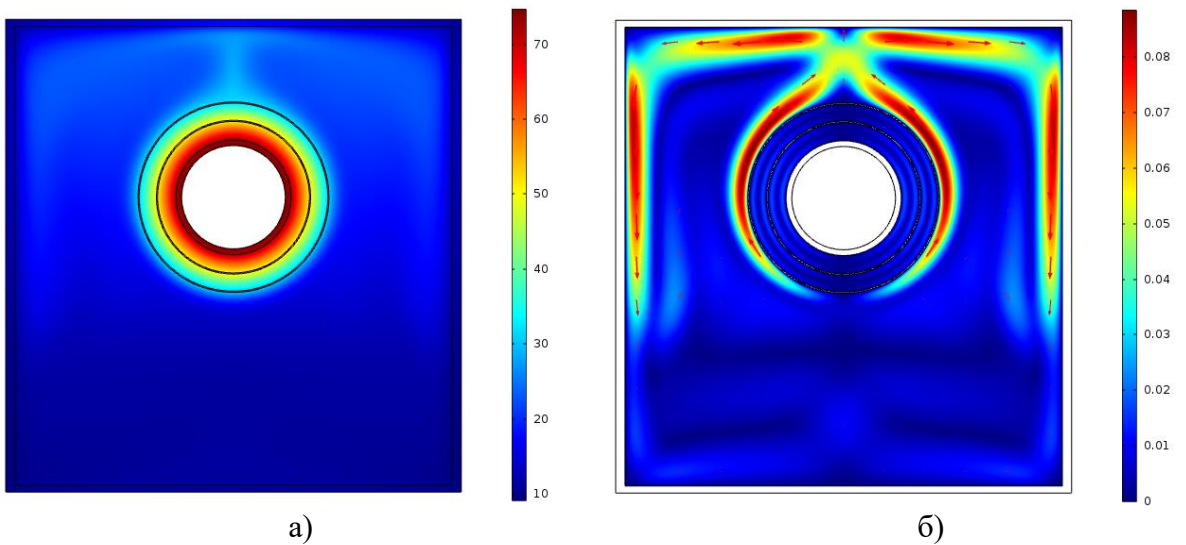
На рисунке 29 показаны поле температур и поле скоростей в элементах физической модели однетрубной тепловой сети (ЭУ №1).



а) б)
Рисунок 29 – Температурное поле (а) и поле скоростей (б)
экспериментальной установки №1



а) б)
Рисунок 30 – Температурное поле а) и поле скоростей
б) экспериментальной установки №2



а) б)
Рисунок 31 – Температурное поле а) и поле скоростей
б) экспериментальной установки №3

Таблица 13 – Экспериментальные и расчетные значения тепловых потоков

Конфигурация экспериментальной установки	Метод	Плотность теплового потока, Вт/м ²			Среднее значение плотности теплового потока, Вт/м ²	Относительная погрешность численного расчета, %
		Верхняя поверхность канала	Боковая поверхность канала	Нижняя поверхность канала		
Экспериментальная установка №1 (ЭУ №1)	Эксперимент	189,7	97,0	60,1	110,95	0,02
	Численный расчет	191,3	96,5	59,4		
Экспериментальная установка №2 (ЭУ №2)	Эксперимент	92,4	45,6	13,9	49,375	5,32
	Численный расчет	93,4	41,6	10,4		
Экспериментальная установка №3 (ЭУ №3)	Эксперимент	62,6	29,2	12,1	33,275	1,50
	Численный расчет	61,2	31,8	6,3		



Рисунок 32 – Экспериментальные и расчетные значения тепловых потоков

Таким образом, установка теплоотражающих экранов при геометрических и теплофизических характеристиках данной физической модели тепловой сети позволяет повысить температуру на поверхности трубопровода, значительно уменьшить радиационный тепловой поток и сократить удельные линейные тепловые потери сети теплоснабжения на 55,5 % (на основании эксперимента), на 57,9% (на основании численного расчета) при установке одного экрана, и на 70% (на основании эксперимента) и на 70,5% (на основании численного расчета) при установке двойного экрана.

Обоснованность и достоверность результатов численных расчетов подтверждается сходимостью решений, путем использования более мелкой расчетной сетки и, соответственно, увеличением числа степеней свободы и выполнения условий баланса энергии.

Относительное отклонение результатов расчета определяется по формуле

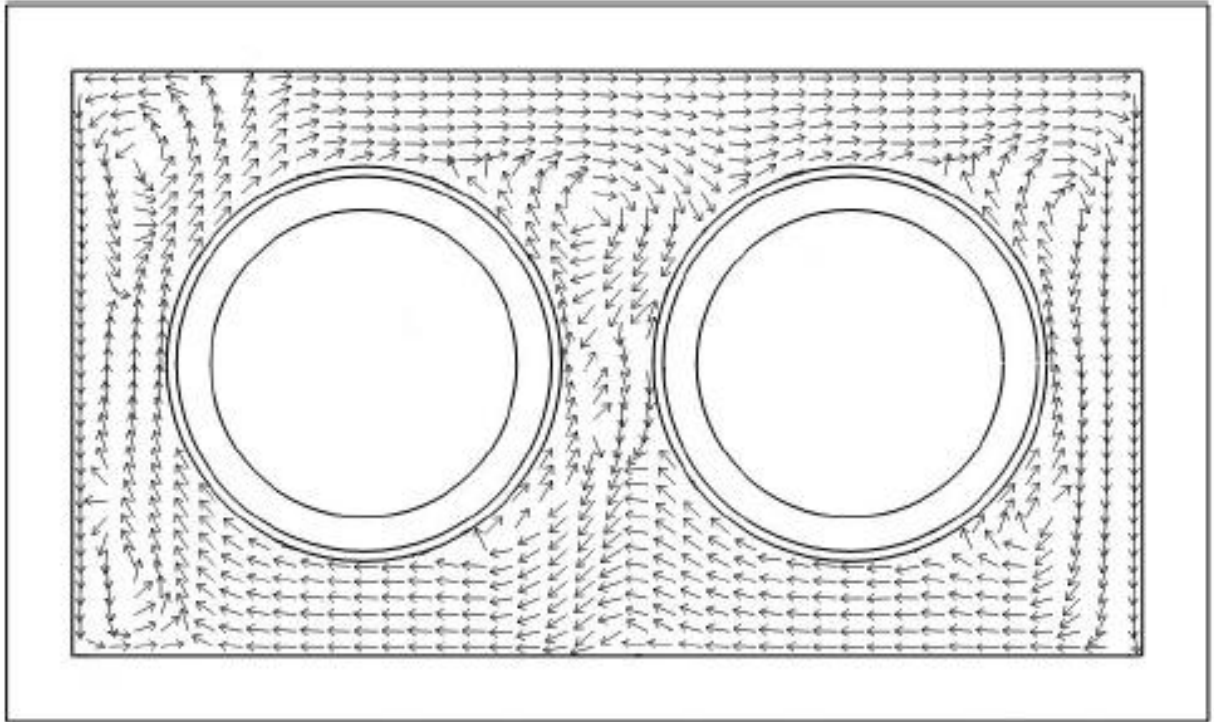
$$\delta = \frac{|q_{\text{эксп}} - q_{\text{расч}}|}{q_{\text{эксп}}} \cdot 100\%, \quad (24)$$

где $q_{\text{эксп}}$ – среднее значение плотности теплового потока, полученное экспериментально, Вт/м²;

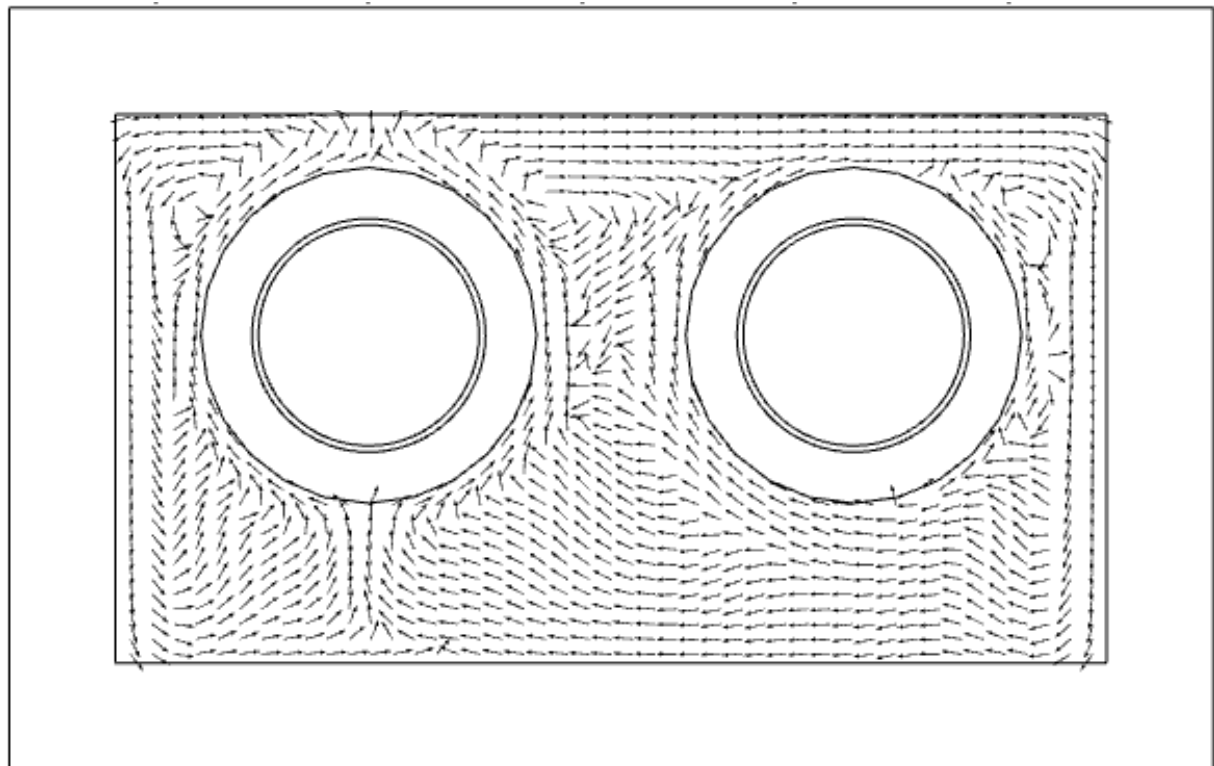
$q_{\text{расч}}$ – среднее значение плотности теплового потока, полученное в результате численного расчета, Вт/м².

Относительное отклонение результатов моделирования по сравнению с экспериментальными данными не превышают 5,4%. Ошибка не выходит за допустимые пределы и свидетельствует об адекватности принятых при построении математической модели допущений.

Кроме того, достоверность проведенного исследования подтверждается схожестью отдельных результатов исследования с результатами, полученными Половниковым В.Ю. в работе [57]. Распределение скоростей в канале в настоящей работе подобно полученному в [57] (рисунок 33).



а)



б)

Рисунок 33 – Поле скоростей в канале теплотрассы

а) работа Половникова В.Ю. б) настоящая диссертационная работа

3.4 Численное моделирование процессов теплообмена в тепловой сети

С целью определения максимально возможного тепловосприятия коллектора устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы необходимо произведен выбор места расположения и конфигурации теплоотражающего экрана и оценить влияние работы устройства по утилизации тепловых потерь на тепловой режим работы однотрубной и двухтрубной тепловой сети с канальной подземной прокладкой в непроходных каналах. Для достижения поставленной цели в настоящем разделе произведено численное моделирование процессов теплообмена в тепловой сети.

Согласно разделу 3.1 настоящей работы объектами дальнейшего исследования являются однотрубная и двухтрубная тепловая сеть с подземной канальной прокладкой трубопровода в непроходном канале.

Поскольку в настоящей работе трубопровод тепловой сети рассматривается только как источник тепловой энергии, то в случае двухтрубной тепловой сети взаимным влиянием прямого и обратного трубопровода, ввиду его незначимости для настоящего исследования, допустимо пренебречь. Таким образом, разработанные математические модели можно экстраполировать на двухтрубную тепловую сеть.

Численное моделирование произведено для температурных графиков работы системы теплоснабжения 150/70 и 95/70. Расчеты велись для температур теплоносителя, соответствующих расчетной температуре воздуха. При этом температура окружающего грунта во всех вариантах численного анализа принималась равной средней температуре грунта за отопительный период для условий г. Иваново.

Основные теплофизические характеристики материалов тепловой сети определены по [74 - 76] и приведены в таблице 14.

Для анализа влияния отбора энергии коллектором устройства на тепловой режим работы сети теплоснабжения был произведен ряд численных расчетов при наличии теплоотражающего экрана и коллектора. При этом

тепловосприятие коллектора устройства определялось изменением температуры теплоносителя, циркулирующего в нем.

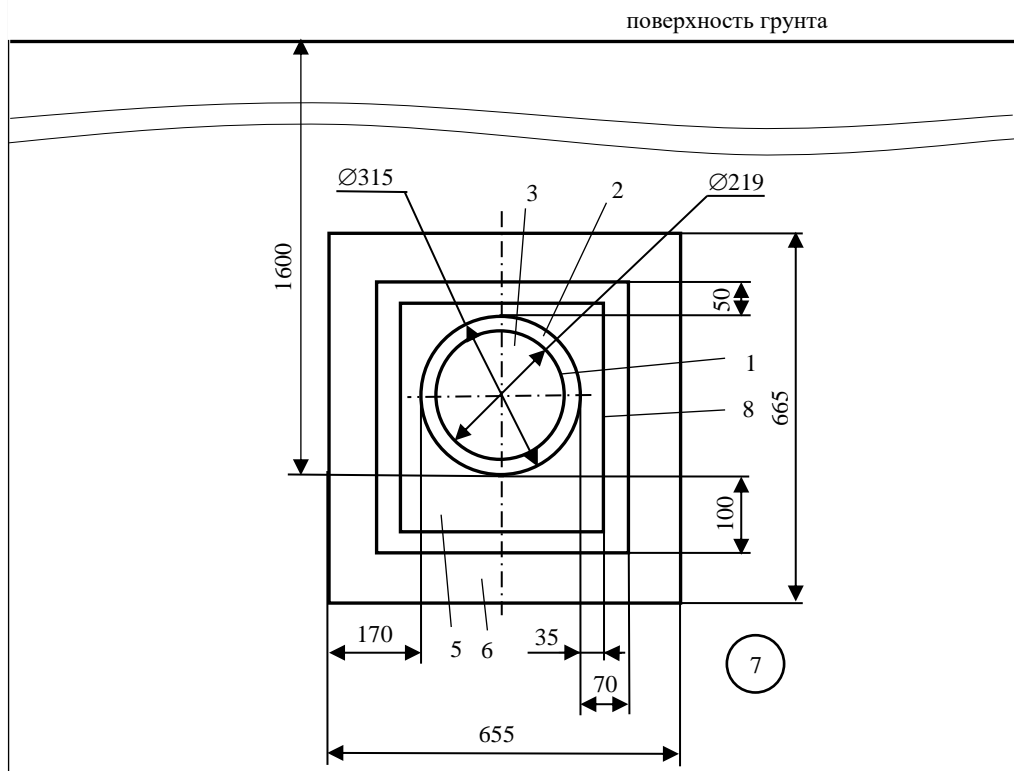
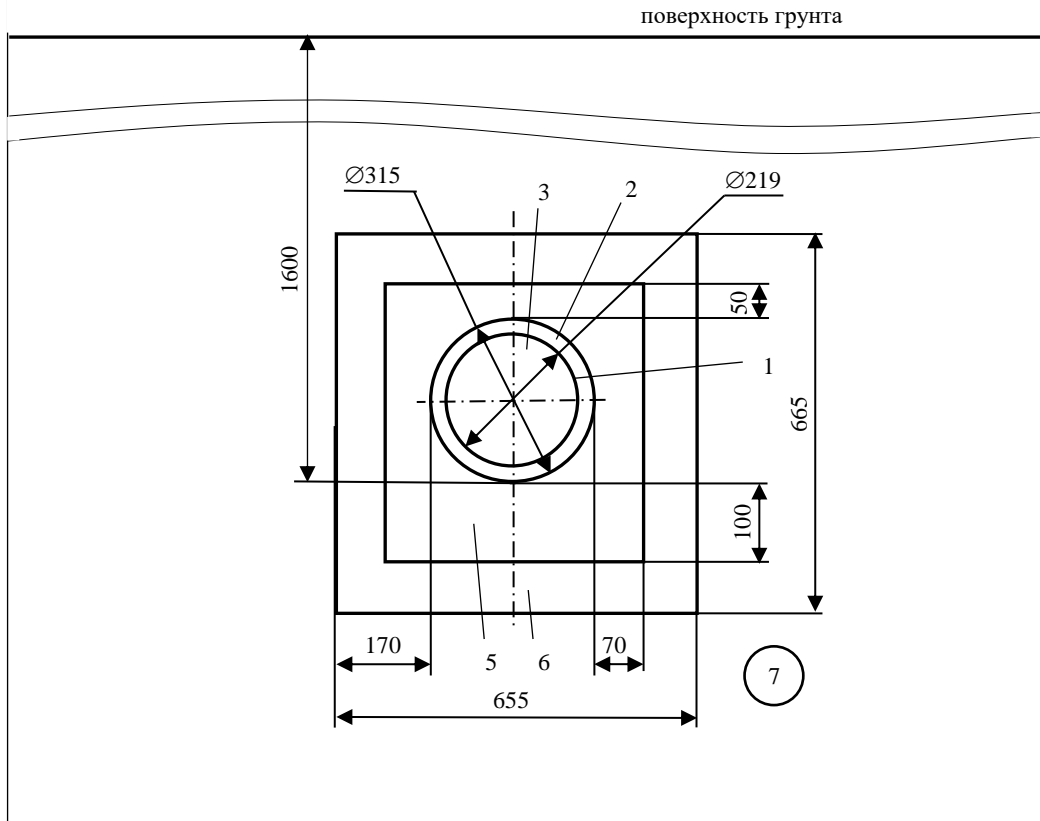
Таблица 14 – **Теплофизические характеристики элементов тепловой сети**

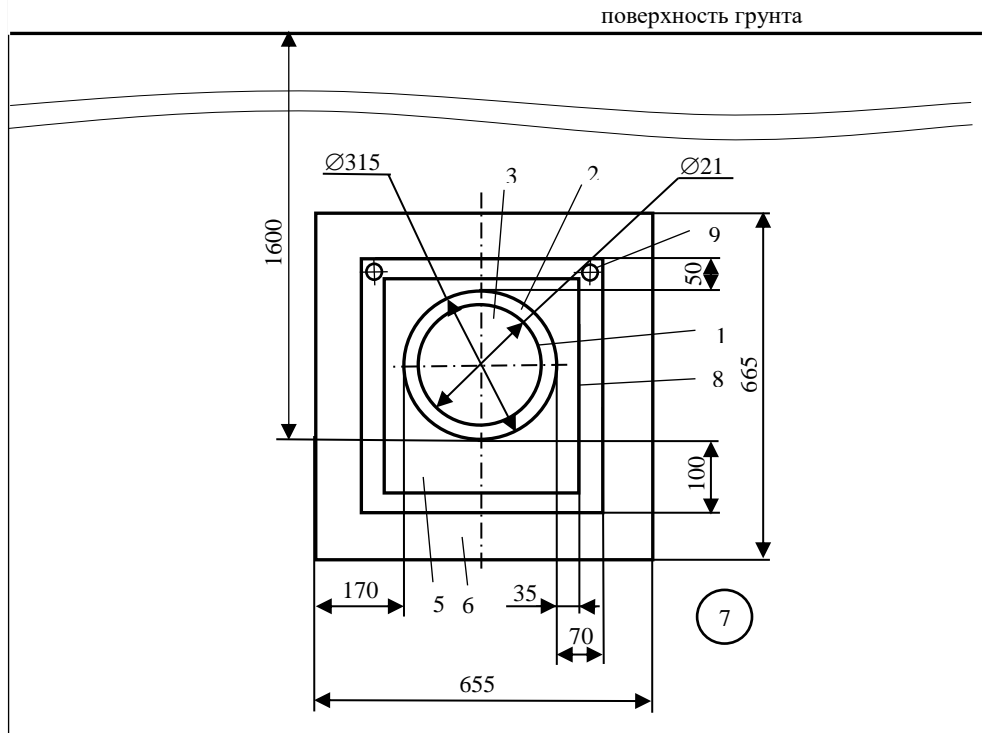
Наименование	Материал	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Степень черноты
Трубопровод, коллектор	Сталь	7800	44,5	450	0,96
Теплоотражающий экран	Алюминий	2670	204	920	0,15
Тепловая изоляция	Пенополиуретан (с полиэтиленовой оболочкой)	70	0,035	1470	0,8
Канал	Железобетон	2300	1,8	880	0,9

При выборе места расположения коллектора и конфигурации теплоотражающего экрана необходимо учесть деформацию трубопровода, вызванную его линейным температурным расширением. С учетом данных особенностей было решено расположить экран у внутренней стенки канала, что позволит трубопроводу деформироваться, не нарушая целостности экрана. При этом коллектор целесообразно разместить в зазоре между экраном и стенкой канала.

Итак, исследование процессов теплообмена в однетрубной и двухтрубной тепловой сети произведено при геометрических характеристиках, отраженных на схемах расчетных областей однетрубной (рисунок 33) и двухтрубной (рисунок 34) тепловых сетей без дополнительных элементов, тепловой сети с теплоотражающим экраном, тепловой сети с теплоотражающим экраном и коллектором устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы.

Стоит отметить, что область расчета в задачах теплообмена в грунте не может быть бесконечной, поэтому для данного типа задач границы расчетной области, на которых задаются граничные условия, находятся на значительном удалении от тепловой сети. Для компактности рисунков 34 и 35 объем грунта вокруг тепловой сети на них изображен принципиально.



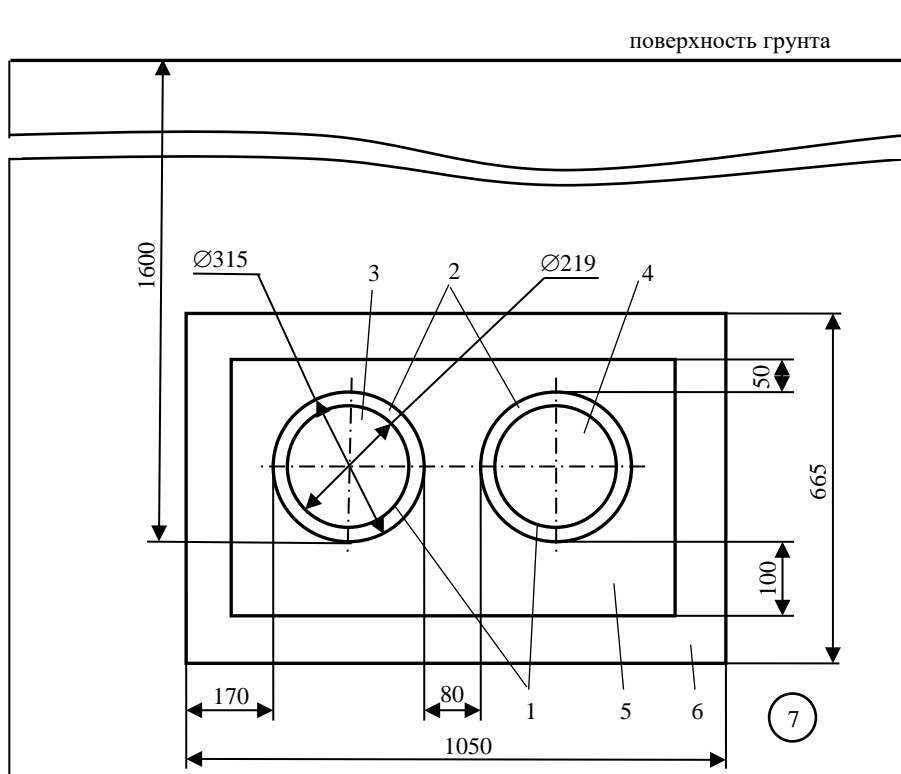


в)

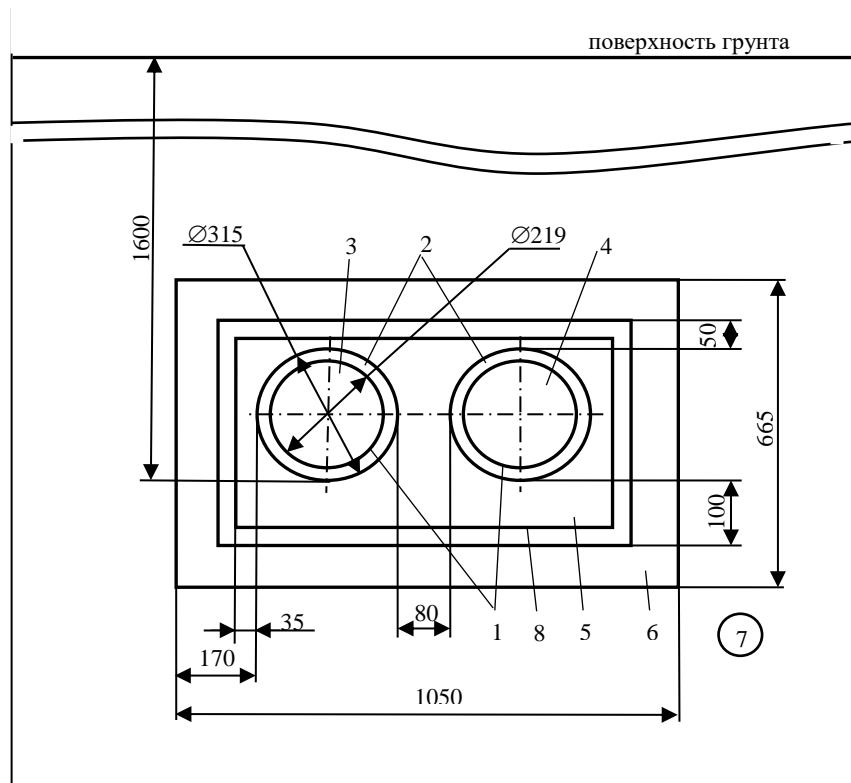
Рисунок 34 – Схема расчетной области однотрубной тепловой сети

а) без дополнительных элементов; б) с теплоотражающим экраном; в) с теплоотражающим экраном и коллектором:

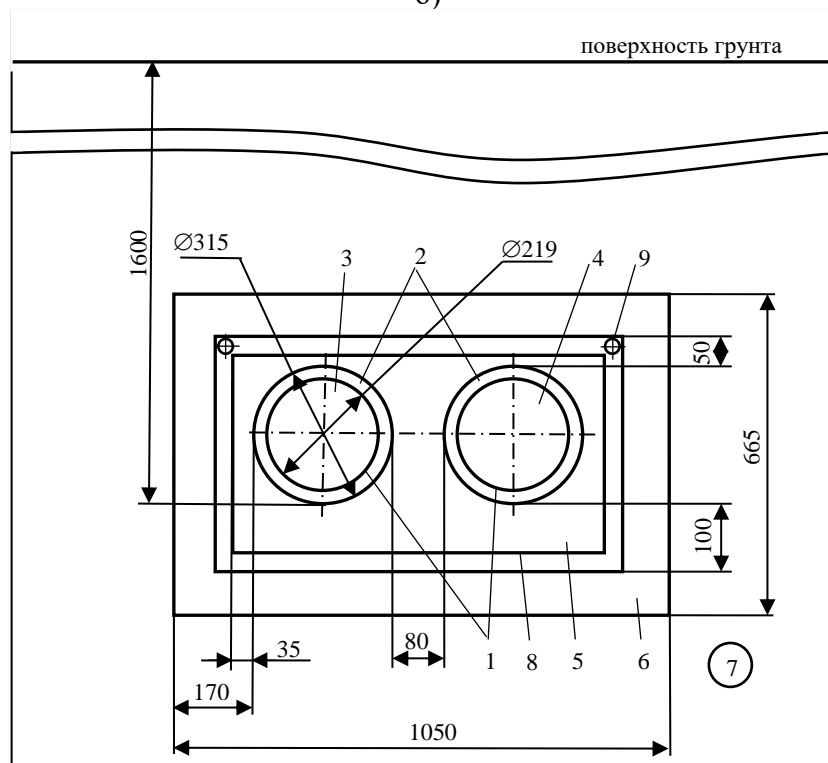
- 1 – стальной трубопровод; 2 – теплоизоляция трубопроводов;
 3 – теплоноситель подающего трубопровода; 4 – теплоноситель обратного трубопровода;
 5 – воздух канала теплотрассы; 6 – железобетонный канал; 7 – грунт;
 8 – теплоотражающий экран; 9 – коллектор



а)



б)



в)

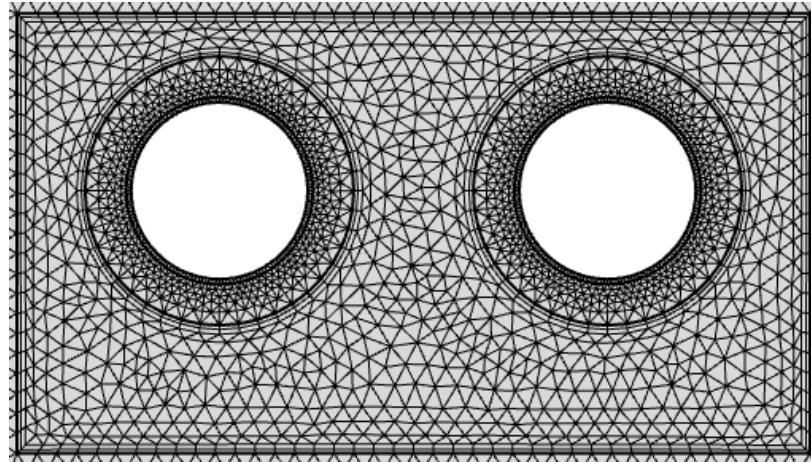
Рисунок 35 – Схема расчетной области двухтрубной тепловой сети:

а) без дополнительных элементов; б) с теплоотражающим экраном;

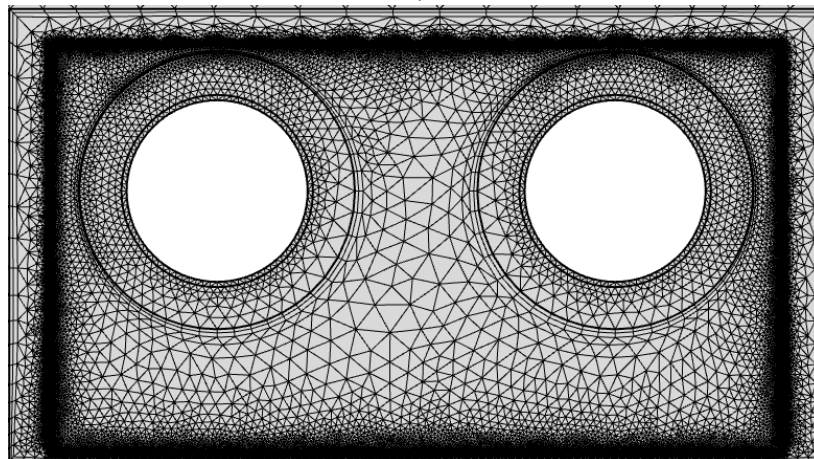
в) с теплоотражающим экраном и коллектором:

1 – стальной трубопровод; 2 – тепловая изоляция трубопроводов; 3 – теплоноситель подающего трубопровода; 4 – теплоноситель обратного трубопровода; 5 – воздух канала теплотрассы; 6 – железобетонный канал; 7 – грунт; 8 – теплоотражающий экран; 9 – коллектор

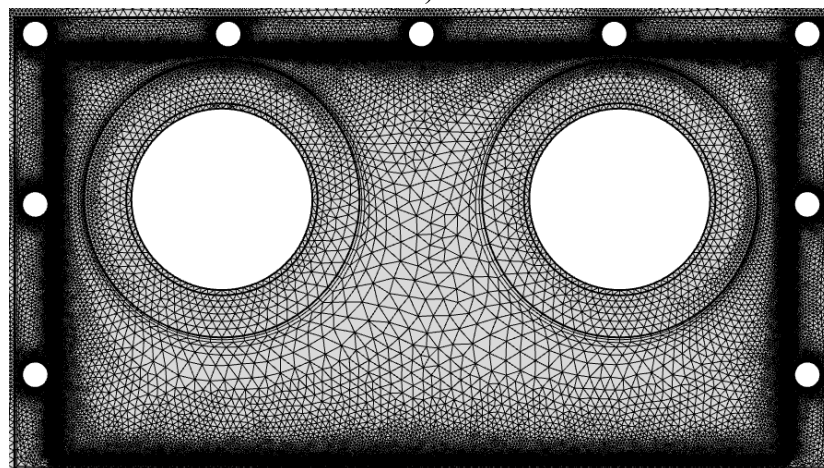
При помощи встроенного сеточного редактора Mesh на данные геометрические модели была наложена расчетная сетка (physics-controlled mesh). Пример расчетной сетки системы с теплоотражающим экраном показана на рисунке 36.



а)



б)



в)

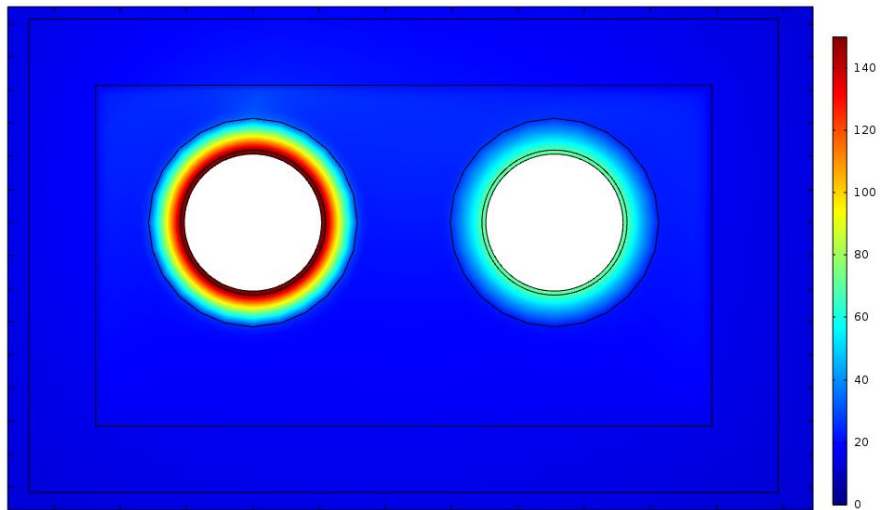
Рисунок 36 – Расчетная сетка двухтрубной тепловой сети а) без дополнительных элементов; б) с теплоотражающим экраном; в) с теплоотражающим экраном и коллектором

После построения расчетной сетки были выполнены настройки граничных условий, отражающие условия теплообмена на поверхностях тел. Температуры сред в рассматриваемых системах показанные в таблице 15 заданы в соответствии с условиями функционирования тепловой сети при работе по температурным графикам 150/70 и 95/70 при расчетной температуре наружного воздуха и температуре наружного воздуха начала и конца отопительного периода. Температура грунта принята равной средней за отопительный период температуре грунта в г. Иваново на глубине 1,6 м [77].

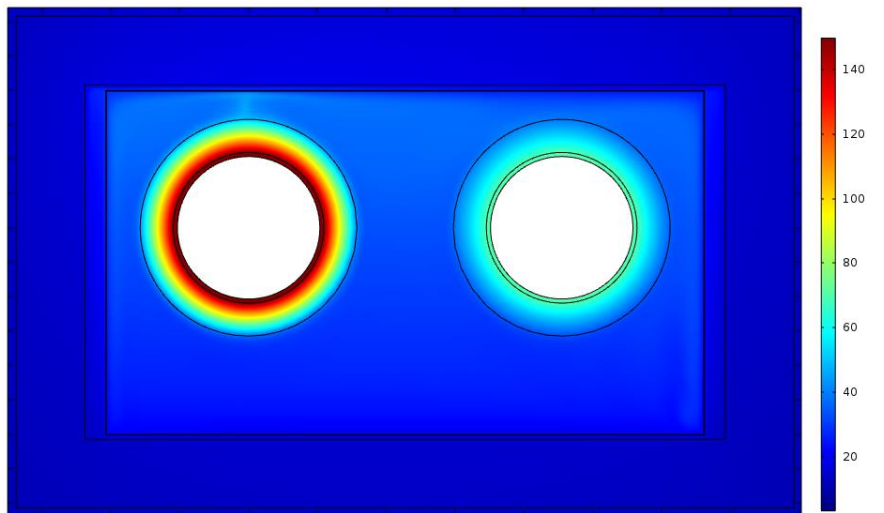
Таблица 15 – Температуры теплоносителя на внутренних границах геометрической модели

Температурный график работы	Температура наружного воздуха	Температура в подающей линии тепловой сети, К	Температура в обратной линии тепловой сети, К	Температура окружающего грунта, К
150/70	Начала и конца отопительного периода	329	310	276,5
	Расчетная	423	343	276,5
95/70	Начала и конца отопительного периода	316	310	276,5
	Расчетная	368	343	276,5

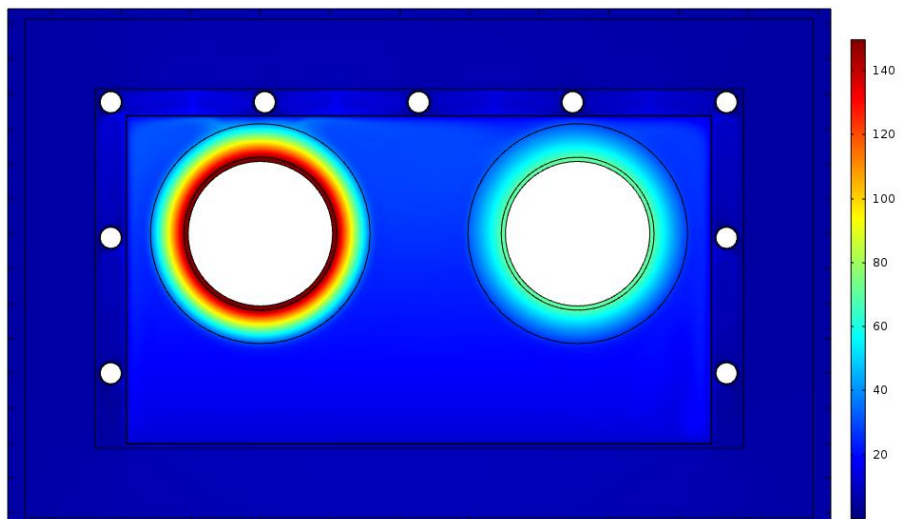
В результате расчета были получены значения удельных линейных потерь тепловой энергии в одно- и двухтрубной тепловой сети без дополнительных элементов, тепловой сети с теплоотражающим экраном и тепловой сети при ее совместной работе с устройством по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы. Рисунки 37 и 38 позволяют оценить изменение поля температур и скоростей в описанных ранее вариантах исполнения сети теплоснабжения на примере двухтрубной тепловой сети, работающей по температурному графику 150/70 при расчетной температуре наружного воздуха.



а)

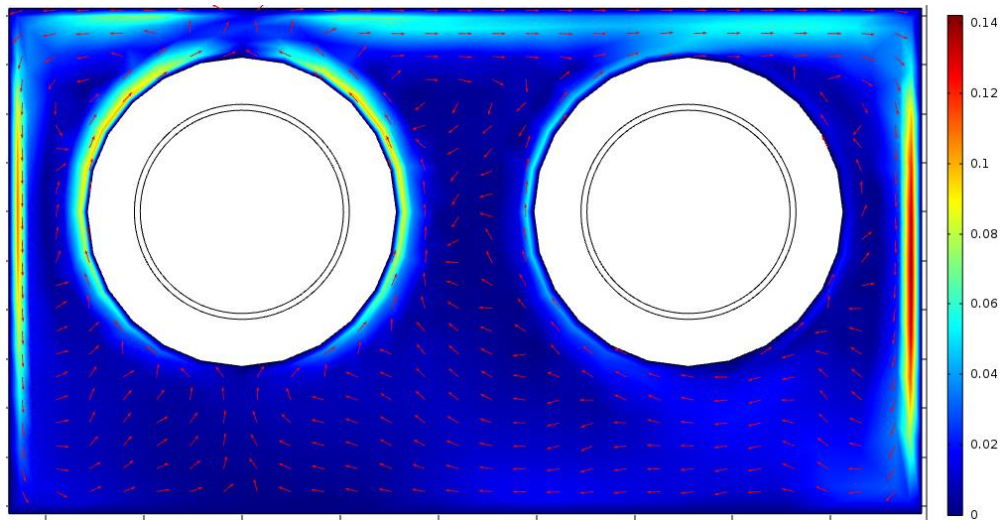


б)

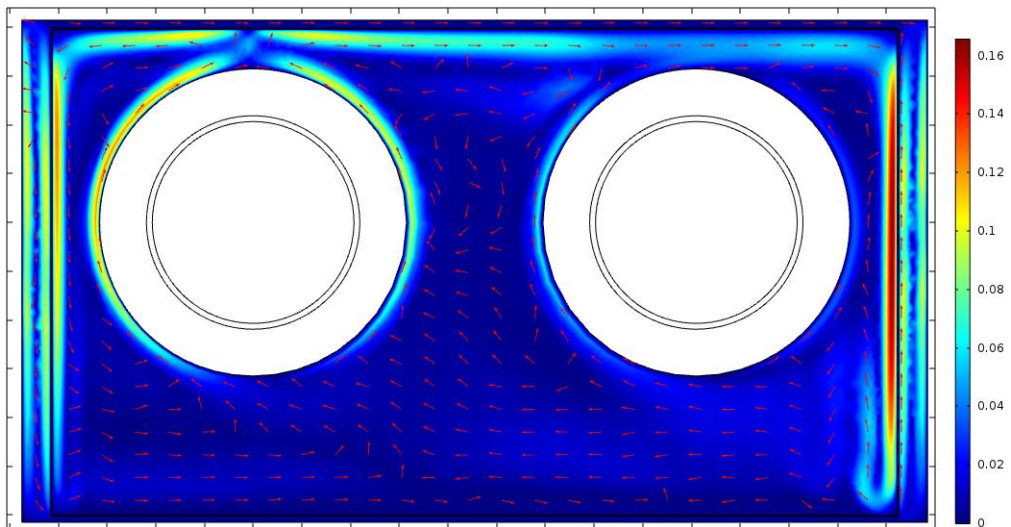


в)

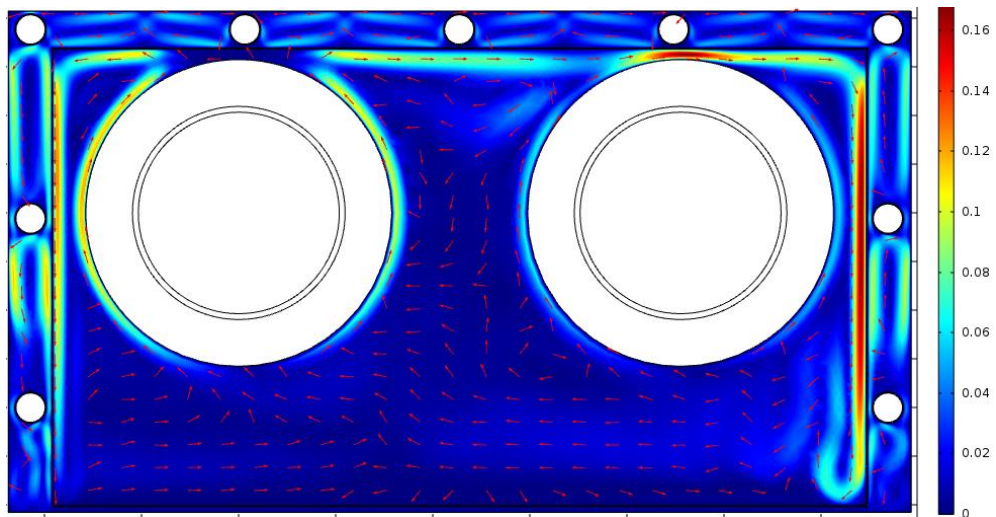
Рисунок 37 – Температурное поле в двухтрубной тепловой сети
а) без дополнительных элементов; б) с теплоотражающим экраном;
в) с теплоотражающим экраном и коллектором



а)



б)



в)

Рисунок 38 – Поле скоростей в двухтрубной тепловой сети
а) без дополнительных элементов; б) с теплоотражающим экраном;
в) с теплоотражающим экраном и коллектором

3.5 Оценка влияния работы устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы на тепловой режим работы тепловой сети

На основании результатов математического моделирования процессов теплообмена в рассматриваемых системах (М1, М2, М3) были построены зависимости, показанные на рисунках 39-42, отражающие влияние тепловосприятости коллектора на величины линейной плотности теплового потока с поверхности трубопроводов и линейных потерь с поверхности канала в грунт для двух систем: без теплоотражающего экрана (красные линии) и с теплоотражающим экраном (синие линии) для одно- и двухтрубных тепловых сетей.

Важно отметить, что тепловосприятость коллектора устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы рассматривается в работе как количество собранной им тепловой энергии с одного метра длины трубопроводов тепловой сети в единицу времени. При этом длина самого коллектора является величиной искомой, нахождение которой направлена предложенная в работе оригинальная инженерная методика.

Полученные зависимости показывают, что отбор тепловой энергии коллектором из канала теплотрассы в размере первоначальных тепловых потерь для всех вариантов тепловой сети и условий ее работы вызывает увеличение линейной плотности теплового потока с поверхности трубопроводов в среднем на 10-14%. Это свидетельствует о недопустимости организации отбора тепловой энергии от сети теплоснабжения подобным образом.

Для ограничения отбора теплоты в устройстве предусмотрен теплоотражающий экран, способный сократить радиационную составляющую теплового потока с поверхности трубопроводов.

Анализ работы теплоотражающего экрана в условиях тепловой сети без коллектора показал (таблица 15), что при установке теплоотражающего экрана у внутренней поверхности канала теплотрассы во всех вариантах расчета коэффициент его эффективности варьируется в диапазоне от 0,14 до 0,19.

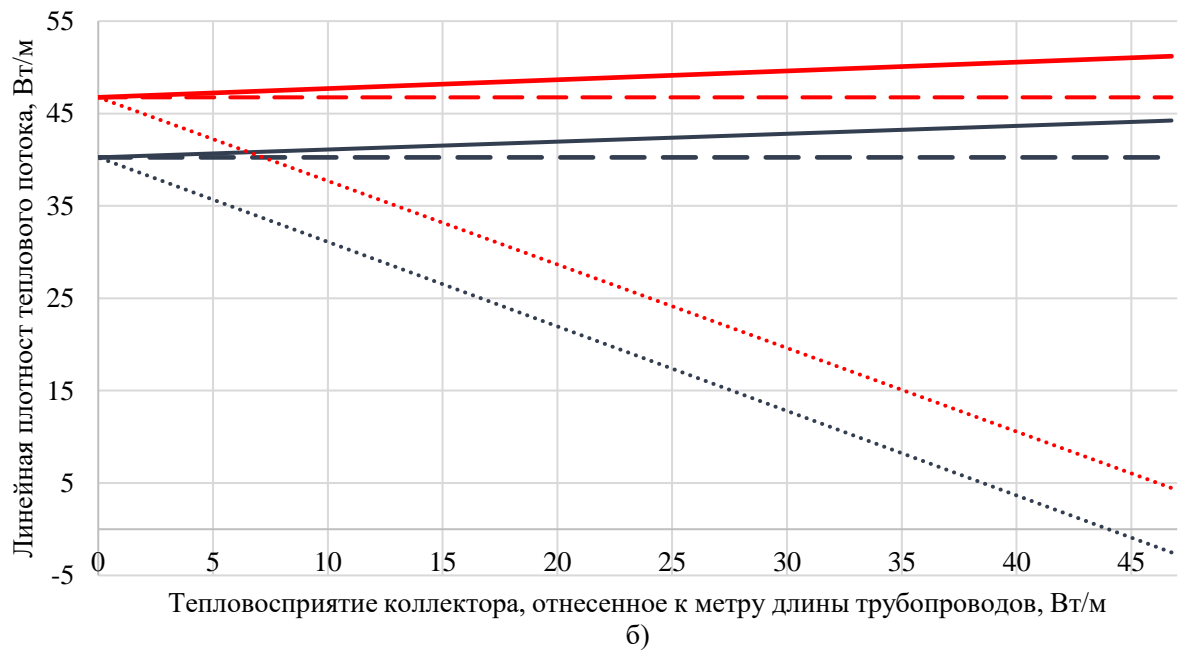
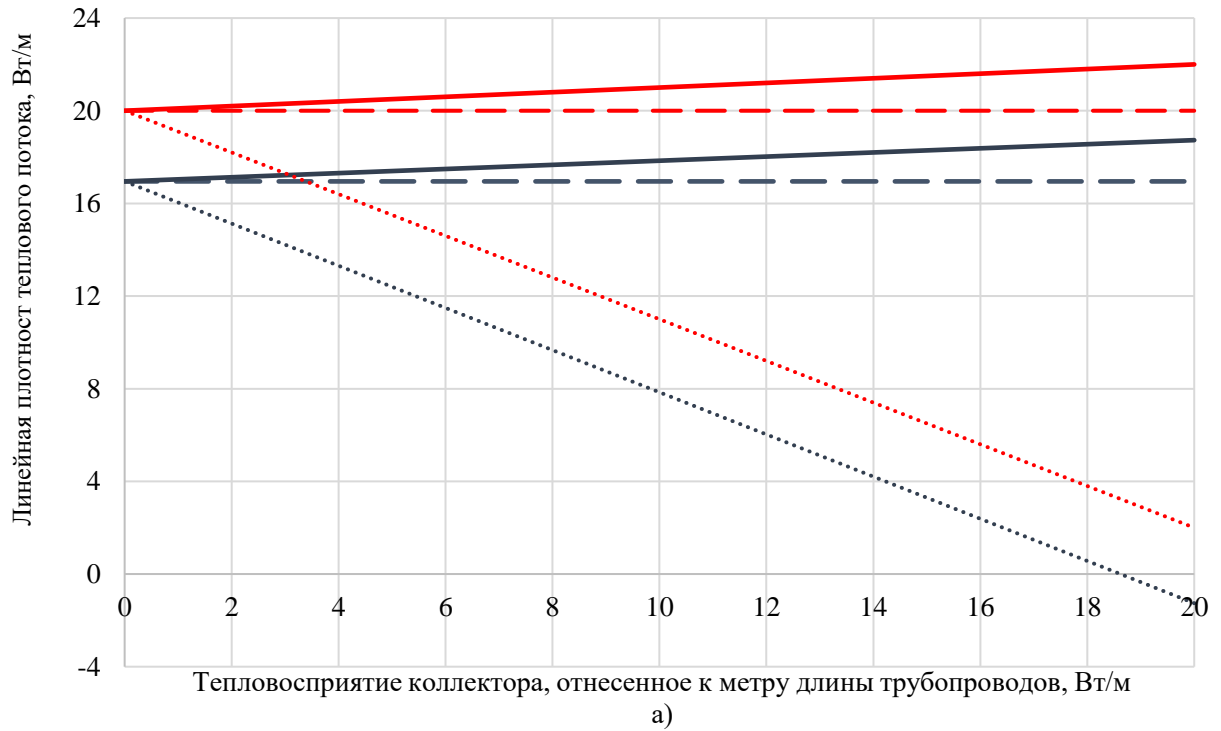


Рисунок 39 – Влияние тепловосприятия коллектора на тепловой поток с поверхности изоляции и с поверхности канала в однотрубной тепловой сети с температурным графиком работы 95/70

а) температура начала и конца отопительного периода,

б) расчетная температура наружного воздуха

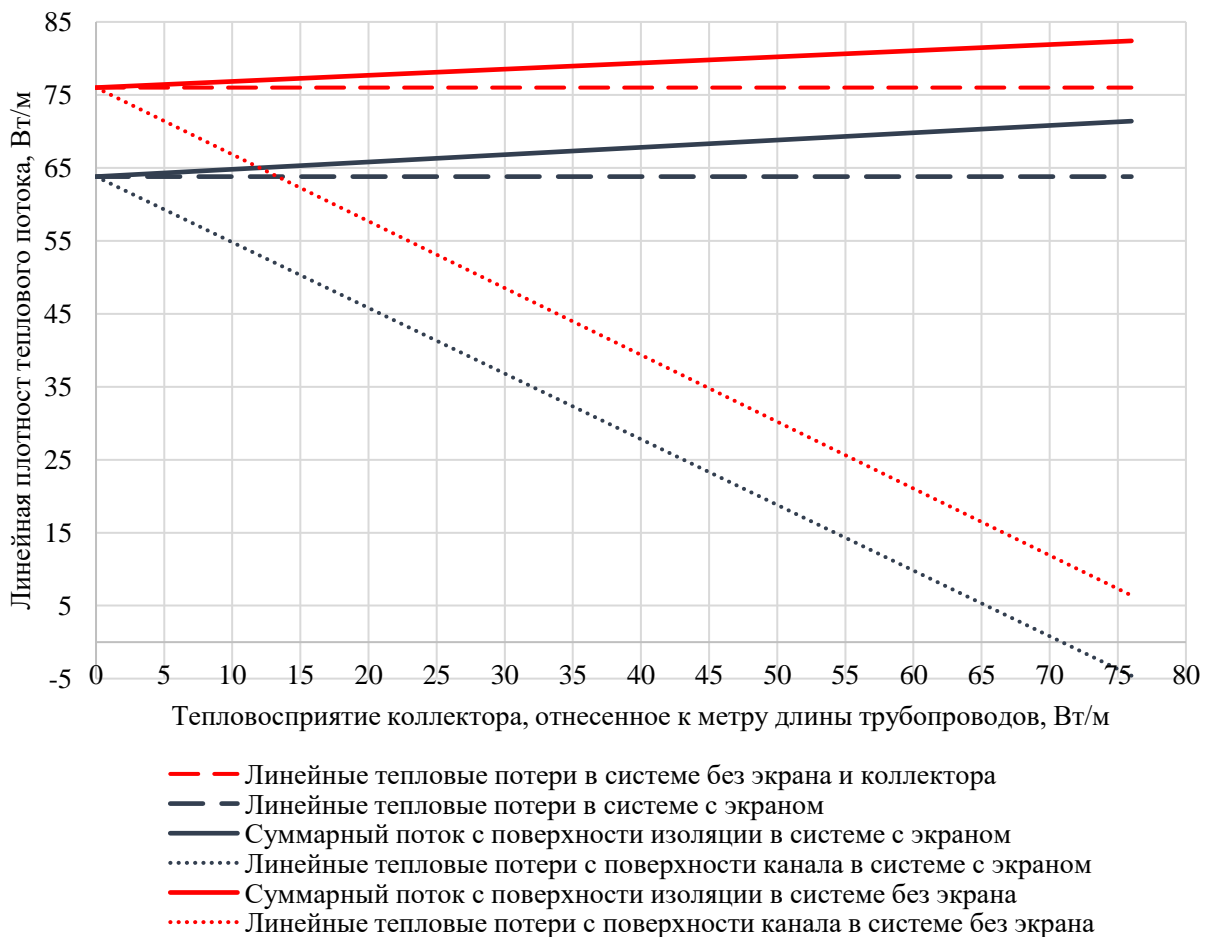
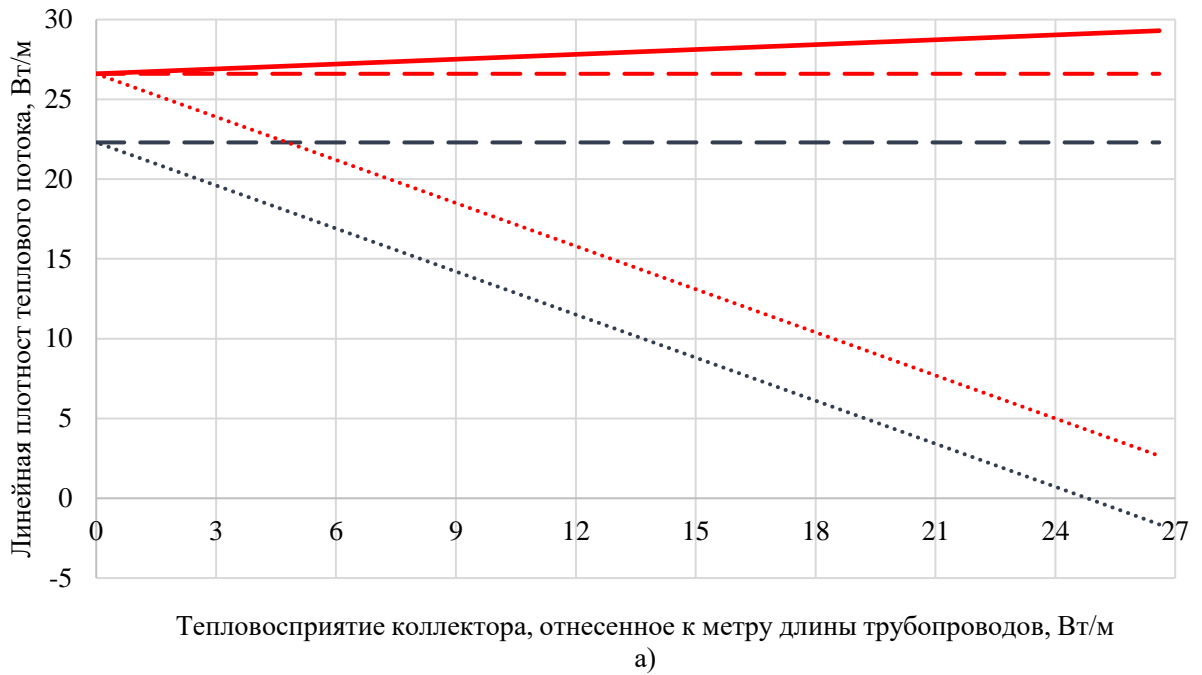
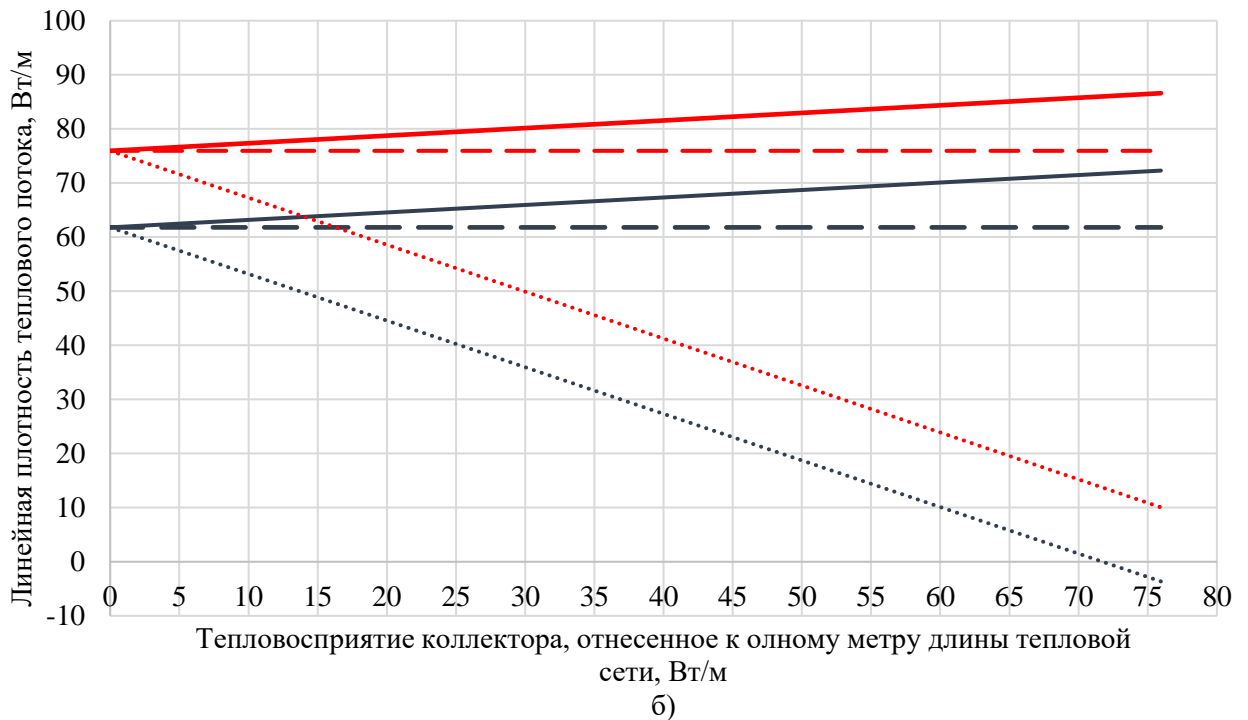
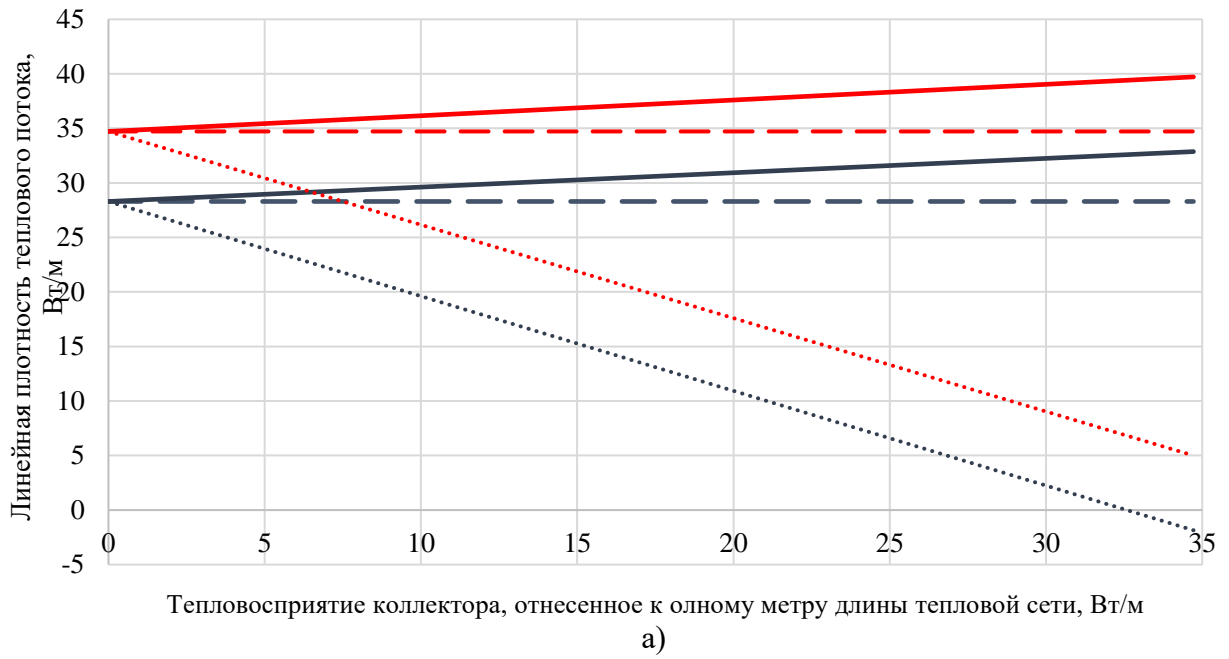


Рисунок 40 – Влияние тепловосприятости коллектора на тепловой поток с поверхности изоляции и с поверхности канала в однотрубной тепловой сети с температурным графиком работы 150/70

а) температура начала и конца отопительного периода,
 б) расчетная температура наружного воздуха

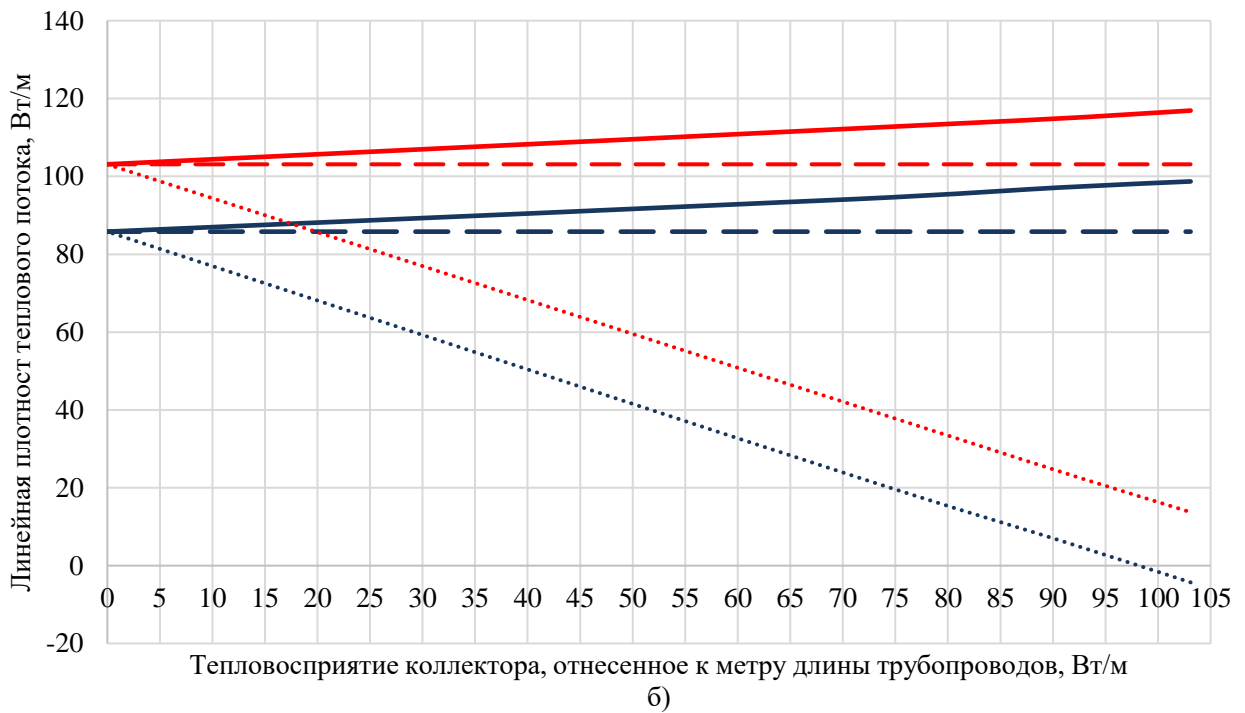
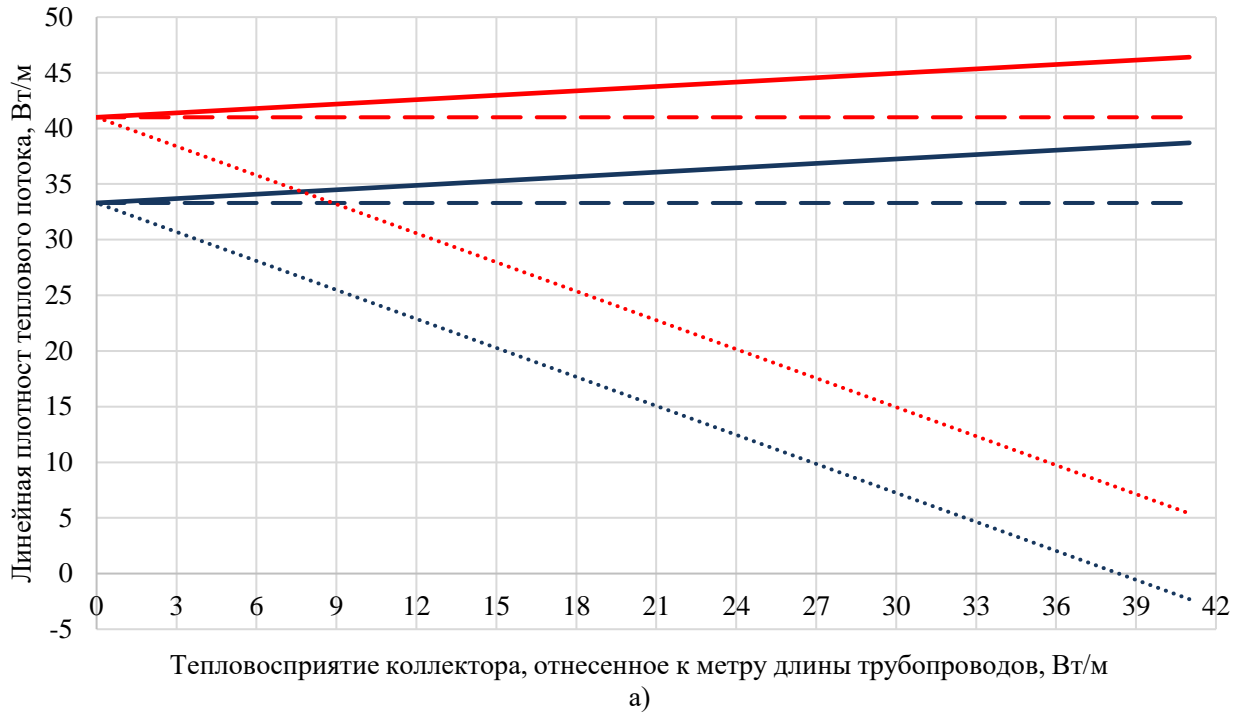


- Без экрана и коллектора
- С квадратным экраном
- Суммарный поток с поверхности изоляции в системе с экраном
- Линейные потери с канала в системе с экраном
- Суммарный тепловой поток в системе без экрана
- Линейные тепловые потери в системе без

Рисунок 41 – Влияние тепловосприятости коллектора на тепловой поток с поверхности изоляции и с поверхности канала в двухтрубной тепловой сети с температурным графиком работы 95/70

а) температура начала и конца отопительного периода,

б) расчетная температура наружного воздуха



- Линейные тепловые потери в системе без экрана и коллектора
- Линейные тепловые потери в системе с экраном
- Суммарный поток с поверхности изоляции в системе с экраном
- Линейные тепловые потери с поверхности канала в системе с экраном
- Суммарный поток с поверхности изоляции в системе без экрана
- Линейные тепловые потери с поверхности канала в системе без экрана

Рисунок 42 – Влияние тепловосприятия коллектора на тепловой поток с поверхности изоляции и с поверхности канала в двухтрубной тепловой сети с температурным графиком работы 150/70

- а) температура начала и конца отопительного периода,
- б) расчетная температура наружного воздуха

Таблица 15 – Эффективность работы теплоотражающего экрана в условиях тепловой сети

Температурный график работы	Вид тепловой сети	Температура наружного воздуха, °С	Удельные линейные тепловые потери, Вт/м		Коэффициент эффективности теплоотражающего экрана
			Тепловая сеть без экрана	Тепловая сеть с экраном	
150/70	Однотрубная	Начала и конца отопительного периода	26,6	22,3	0,16
		Расчетная	76	63,8	0,16
	Двухтрубная	Начала и конца отопительного периода	41	33,3	0,19
		Расчетная	103,1	85,8	0,17
95/70	Однотрубная	Начала и конца отопительного периода	20	16,95	0,15
		Расчетная	46,8	40,3	0,14
	Двухтрубная	Начала и конца отопительного периода	34,7	28,3	0,18
		Расчетная	76	61,8	0,19

Результаты численных расчетов совместной работы сети, экрана и коллектора (рисунки 38...41) показали, что применение теплоотражающего экрана, расположенного у внутренней поверхности канала теплотрассы между коллектором и трубопроводами, при величине тепловосприятости коллектора, равной первоначальным линейным тепловым потерям, дает принципиально иной результат.

В этом случае линейная плотность теплового потока с поверхности трубопроводов становится на 4% меньше первоначального значения, что говорит о сохранении теплового режима работы сети. При этом, тепловая энергия, в размере 4% от первоначальных потерь, необходимая для достижения требуемого тепловосприятости коллектора, компенсируется энергией окружающего грунта. Однако такой режим совместной работы сети и предлагаемого устройства недопустим, поскольку он неизбежно вызовет охлаждение и, возможно, промерзание грунта в месте расположения устройства. Необходимо отметить, что результаты аналогичных исследований, проведенных для других

диаметров трубопроводов тепловых сетей, а именно, 50 и 400 мм, идентичны приведенным в данном разделе, что говорит о возможности экстраполяции полученных результатов на тепловые сети различных диаметров трубопроводов.

Таким образом, тепловосприятие коллектора, которое будет допустимым с точки зрения сохранности теплового режима сети, и в тоже время достаточным для работы устройства по утилизации тепловых потерь, определяется нулевым отбором энергии из окружающего грунта. По результатам анализа математического моделирования допустимое тепловосприятие коллектора находится в диапазоне от 93% до 95,2% от первоначальных тепловых потерь (таблица 16).

Таблица 16 – Допустимое тепловосприятие коллектора устройства по утилизации тепловых потерь

Температурный график работы	Вид тепловой сети	Температура наружного воздуха, °С	Удельные линейные тепловые потери, Вт/м		Допустимое тепловосприятие, Вт/м	Допустимое тепловосприятие, %
			Тепловая сеть без экрана	Тепловая сеть с экраном		
150/70	Одно-трубная	Начала и конца отопительного периода	26,6	22,3	24,8	93,3
		Расчетная	76	63,8	70,9	93
	Двух-трубная	Начала и конца отопительного периода	41	33,3	38,4	94
		Расчетная	103,1	85,8	98,1	95,2
95/70	Одно-трубная	Начала и конца отопительного периода	20	16,95	18,6	93
		Расчетная	46,8	40,3	44,0	94,1
	Двух-трубная	Начала и конца отопительного периода	34,7	28,3	32,6	93,4
		Расчетная	76	61,8	71,7	94,3

Для дальнейшей разработки инженерной методики расчета допустимое тепловосприятие коллектора устройства с учетом трехпроцентного запаса принято равным 90%.

3.6 Исследование эффективности работы теплоотражающего экрана

Освещенные в работе исследования показали, что теплоотражающий экран, работая в разных обстоятельствах, обладает различной эффективностью. Данное обстоятельство требует выявления факторов, оказывающих наибольшее влияние на эффективность работы экрана. Круг анализируемых факторов сводится к температуре теплоносителя, месту расположения экрана, его степени черноты теплоотражающего экрана и термическому сопротивлению трубопроводов тепловой сети.

Результаты предшествующих исследований показали, что температура теплоносителя, изменяющаяся в диапазоне существующих температурных графиков работы систем теплоснабжения, не оказывает существенного влияния на работу экрана.

Для анализа влияния места расположения теплоотражающего экрана в работе рассмотрено два варианта его размещения: вокруг трубопровода в непосредственной близости от него и у внутренней поверхности стенок канала теплотрассы. В этих случаях, теплоотражающий экран, находящийся на расстоянии 8 мм от стенки, наряду с лучистым тепловым потоком будет снижать и его конвективную составляющую.

Для решения поставленной цели произведено математическое моделирование работы тепловой сети в традиционном исполнении и с расположенным в канале теплотрассы теплоотражающим экраном. Объектом исследования стала однетрубная тепловая сеть с подземной канальной прокладкой трубопровода в непроходном канале. Для расчета приняты следующие параметры: расчетная температура наружного воздуха принята равной минус 29°C [27], температура грунта – 2,2°C [77], температура теплоносителя в соответствии с температурным графиком 95/70 принята равной 95°C.

Анализ результатов численного моделирования, приведенных в таблице 17, показал, что при данных теплофизических и геометрических

параметрах тепловой сети способность теплоотражающего экрана сокращать линейные потери тепловой энергии рассматриваемых конфигураций различна.

Таблица 17 – Данные математического моделирования

Параметр	Однотрубная тепловая сеть	Однотрубная тепловая сеть с экраном вокруг трубопровода	Однотрубная тепловая сеть с экраном около стенок канала
Средний тепловой поток на поверхности трубопровода, Вт/м ²	60,2	48,1	54,0
Удельные линейные тепловые потери, Вт/м	23,6	18,9	21,2
Коэффициент эффективности теплоотражающего экрана	-	0,2	0,1

Очевидно, что экран, расположенный вокруг трубопровода, имеет большую эффективность. Рисунки 43 и 44 дают возможность оценить влияние степени черноты экрана и коэффициента теплопроводности изоляции трубопровода на эффективность работы теплоотражающего экрана и сделать вывод о существенной значимости последнего.

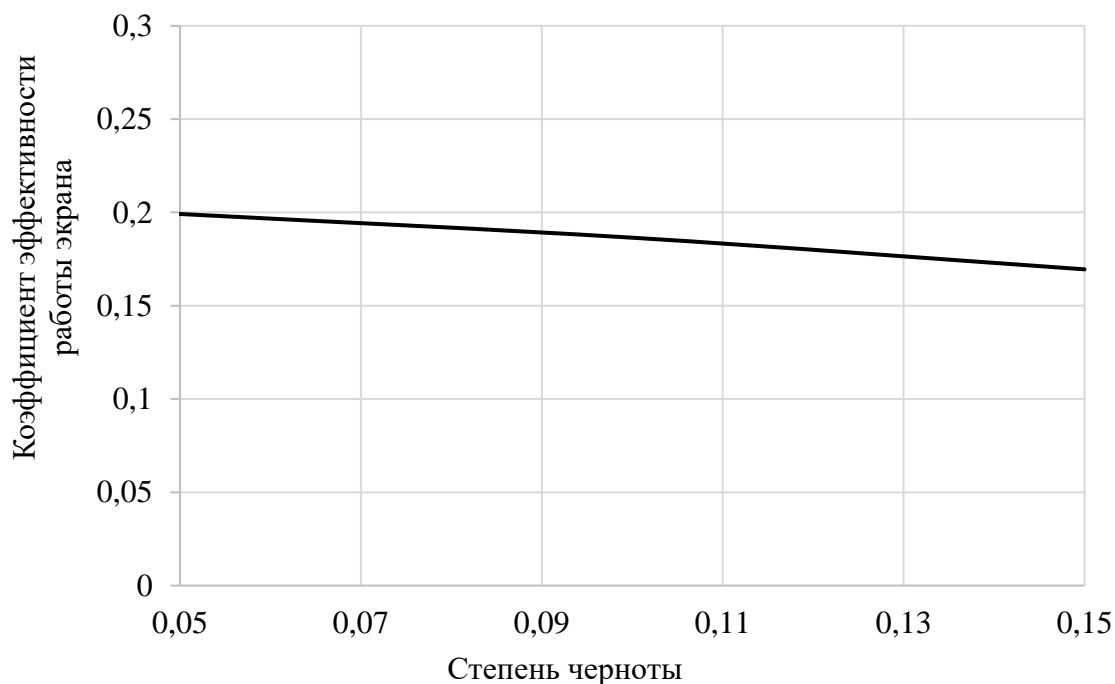


Рисунок 43 – Зависимость эффективности работы теплоотражающего экрана от его степени черноты

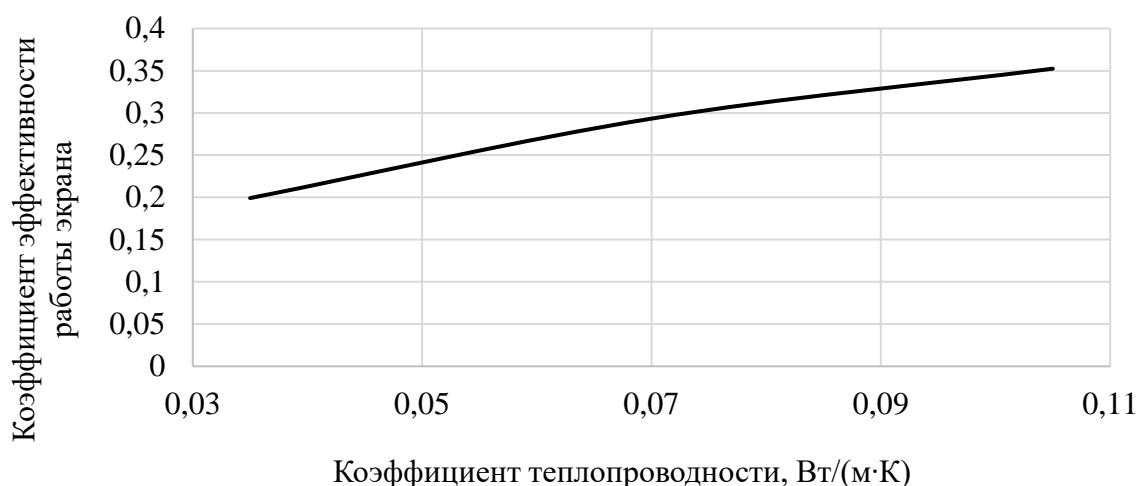


Рисунок 44 – Зависимость эффективности работы теплоотражающего экрана от коэффициента теплопроводности изоляции трубопроводов

3.7 Выводы по третьей главе

1. Построены математические модели, позволяющие определять тепловые потери при работе сети теплоснабжения, а также оценивать влияние теплоотражающего экрана и устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы на работу тепловой сети.

2. Определено допустимое тепловосприятие коллектора устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы.

3. Полученные результаты математического моделирования показали, что 90% от первоначальных тепловых потерь сети теплоснабжения допустимо утилизировать с помощью предлагаемого автором устройства. Результаты моделирования могут быть использованы при определении геометрических параметров и режима работы коллектора устройства по утилизации.

Результаты исследования, приведенного в главе 3, отражены в 7 работах [96, 104, 105, 112, 113, 116, 120].

ГЛАВА 4. ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

В настоящей главе рассмотрены основные положения, связанные с практическим применением устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы. Излагаются вопросы определения расчетных параметров работы устройства и приводится оригинальная инженерная методика его расчета. Рассмотрены вопросы регулирования работы устройства и определения его экономической эффективности. Проведен анализ условий практического применения результатов исследования.

4.1 Методика расчета устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы

Разработанная методика расчета устройства для утилизации потерь в канале теплотрассы направлена на определение технических характеристик элементов устройства при заданной эффективности теплового насоса. К основным техническим характеристикам следует относить поверхность теплообмена коллектора, приведенную к одному метру трубопровода сети теплоснабжения, тепловые нагрузки на испаритель и конденсатор теплового насоса, мощность компрессора. Для реализации методики необходимы следующие исходные данные: диаметр трубопровода, глубина залегания непроходного канала, температура наружного воздуха, температура грунта, теплопроводность грунта и коллектора, температурный график работы тепловой сети, вид рабочего агента трансформатора тепла и требуемые параметры получаемой в конденсаторе трансформатора тепла тепловой энергии.

Изложенная в настоящей главе методика разработана на базе балансовых соотношений, приведенных в нормативных документах [30, 78], методик расчета теплообменных аппаратов [79, 80, 81, 82] и методики расчета трансформаторов тепла [83, 84]. Разработанная методика лежит в основе зарегистрированной автором программы ЭВМ под названием «Утилизация тепловых потерь в канале теплотрассы» [102]. Программа может применяться в рамках

реализации мероприятий по повышению энергетической эффективности сетей систем теплоснабжения для закрытой, двухтрубной системы с подземной канальной прокладкой трубопроводов в непроходных каналах.

4.1.1 Определение расчетной температуры теплоносителя в коллекторе устройства

За расчетную температуру теплоносителя в коллекторе в работе принята средняя минимальная температура теплоносителя в коллекторе устройства, которую необходимо обеспечить для восприятия тепловых потерь при расчетной температуре наружного воздуха. Данный параметр решено определять исходя из заданной эффективности теплового насоса, входящего в состав устройства, и требуемого потенциала полученной тепловой энергии.

Работа предлагаемого устройства направлена на получение тепловой энергии для обеспечения работы систем горячего водоснабжения и низкотемпературных систем панельно-лучистого отопления, воздушного отопления и систем кондиционирования воздуха, системы снеготаяния и т.п. Работа традиционных систем теплоснабжения предполагает поддержание температуры конденсации рабочего агента в тепловом насосе на уровне 65 °С. В низкотемпературных системах, таких как «теплые полы» и системы снеготаяния, температура теплоносителя в течение отопительного периода переменна. При этом максимальная температура теплоносителя в таких системах может достигать 40 °С.

Эффективность работы теплового насоса напрямую зависит от высоты теплоподъема (разница между температурами конденсации и кипения рабочего агента в цикле работы пароконденсационного трансформатора тепла). Поэтому температуру в коллекторе можно определить, зная желаемый коэффициент трансформации и необходимую температуру конденсации рабочего агента.

Для определения температуры теплоносителя в коллекторе были построены зависимости, основанные на связи температуры конденсации и

температуры кипения рабочего агента (рисунки 45...47), позволяющие по требуемой температуре нагреваемого в тепловом насосе теплоносителя и желаемом коэффициенте трансформации, определить температуру теплоносителя в коллекторе устройства. Зависимости построены для рабочих агентов, наиболее представленных на рынке теплонасосного и холодильного оборудования: R134a, R406a и R407c [85, 86, 87]. При этом средняя разница температур в испарителе и конденсаторе в соответствии с [88, 89, 90] была принята равной 5°C.

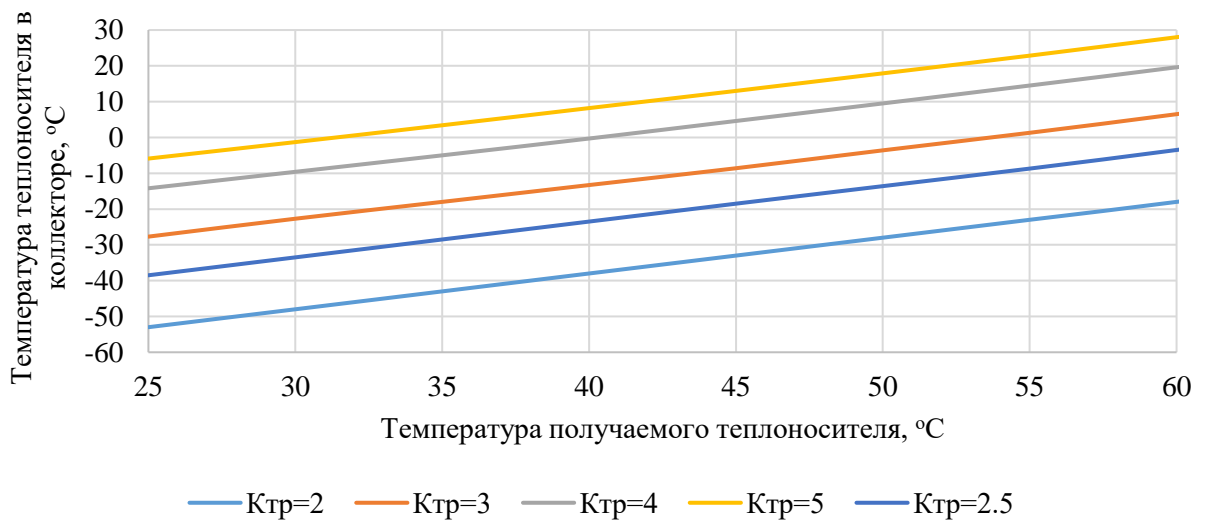


Рисунок 45 – Зависимость температуры теплоносителя в коллекторе от температуры получаемого теплоносителя при разных значениях коэффициента трансформации $K_{тр}$ (рабочий агент фреон R134a)

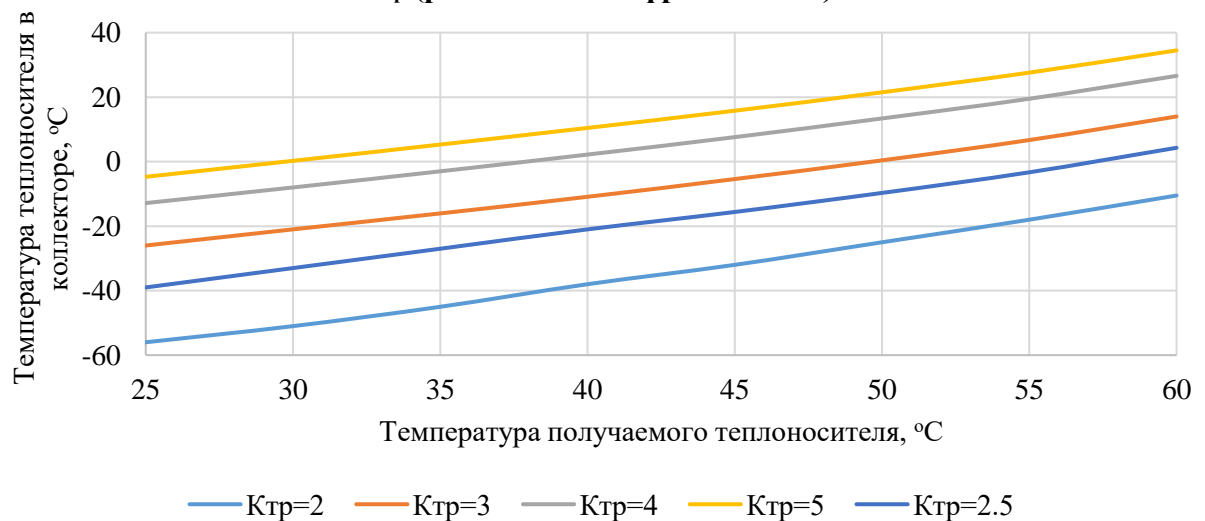


Рисунок 46 – Зависимость температуры теплоносителя в коллекторе от температуры получаемого теплоносителя при разных значениях коэффициента трансформации $K_{тр}$ (рабочий агент фреон R410a)

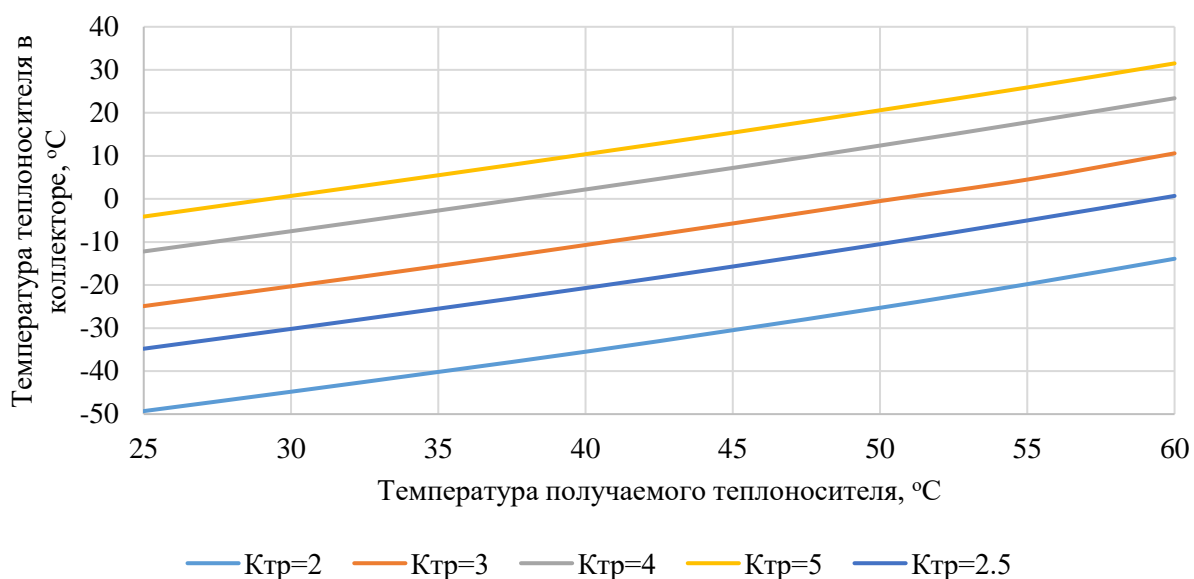


Рисунок 47 – Зависимость температуры теплоносителя в коллекторе от температуры получаемого теплоносителя при разных значениях коэффициента трансформации $K_{тр}$ (рабочий агент фреон R407c)

Полученная графическим путем температура может быть использована при дальнейшем расчете геометрических параметров коллектора устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы.

Необходимым условием работы коллектора является разница температур грунта и теплоносителя в коллекторе (при меньшем значении последнего), причем чем больше эта разница, тем интенсивнее происходит теплообмен и, соответственно, требуется меньшая площадь теплообмена. Важно отметить также, что при принятии коэффициента трансформации необходимо учитывать, что его высокие значения приводят к увеличению температуры теплоносителя в коллекторе, что не всегда допустимо. Поэтому эффективной работы устройства можно добиться только при невысоком потенциале производимой тепловым насосом энергии.

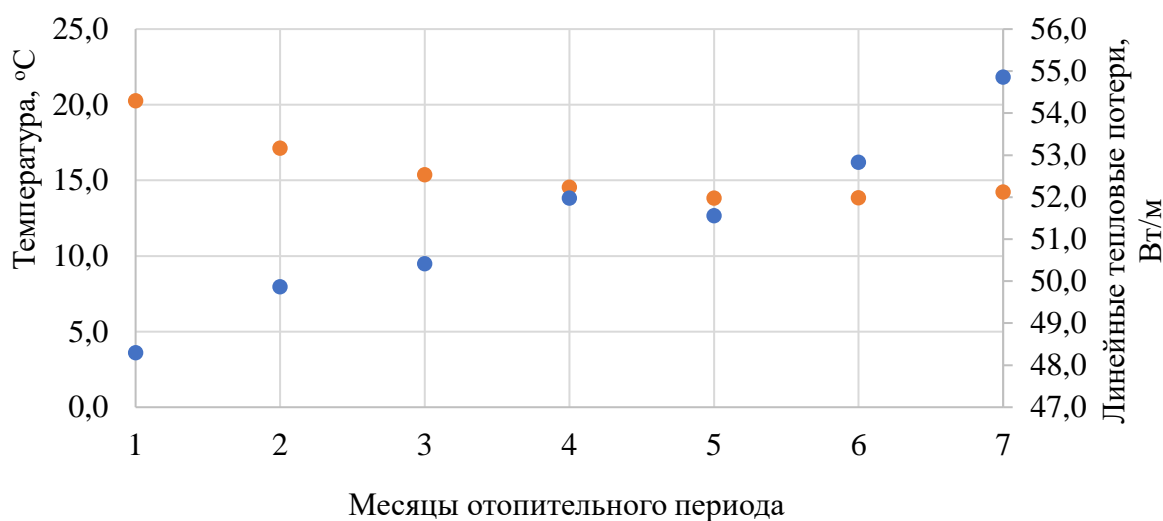
Таким образом, при низких значениях расчетной температуры теплоносителя в коллекторе его требуемая площадь будет меньше, что потребует меньших капитальных затрат, но неминуемо приведет к росту эксплуатационных затрат. И наоборот, при более высоких значениях расчетной температуры высота теплоподъема теплового насоса будет меньше, что увеличит

коэффициент трансформации и уменьшит текущие затрат на эксплуатацию устройства, но, с другой стороны, это приведет к росту капитальных затрат за счет увеличения материалоемкости устройства.

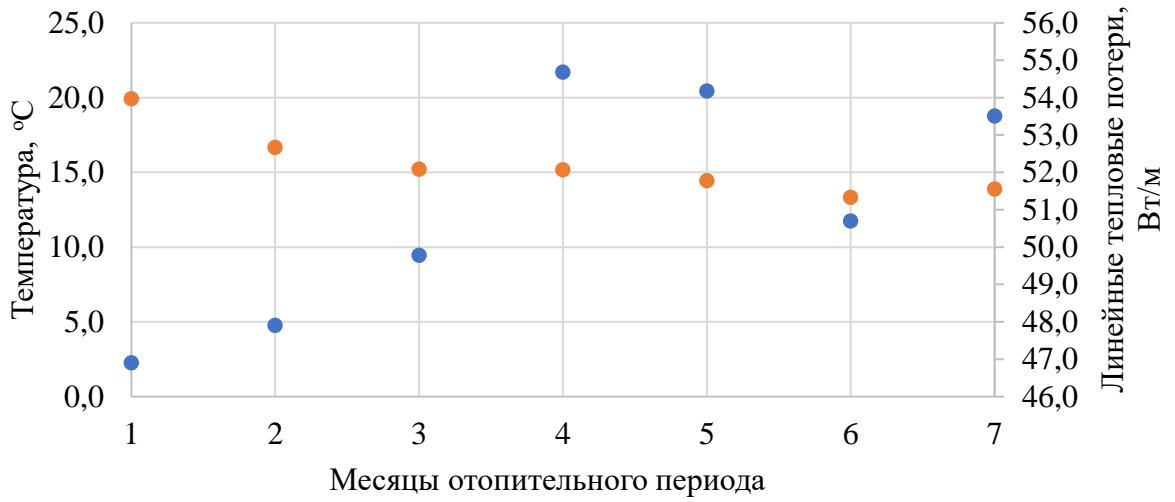
Резюмируя сказанное, можно отметить, что выбор расчетной температуры есть вопрос оптимизационный, требующий технико-экономического анализа.

4.1.2 Определение расчетных условий

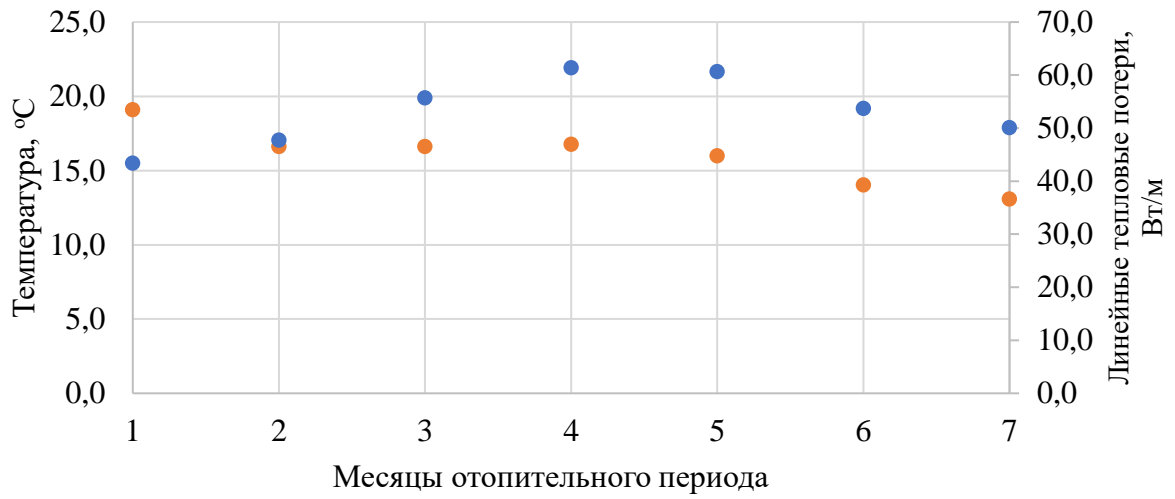
Для определения расчетного периода был произведен анализ теплофизических параметров тепловой сети с диаметром трубопровода 200 мм в течение отопительного периода (с октября по апрель), работающей по температурным графикам 95/70, 105/70, 130/70 и 150/70 для климатических условий г. Иваново. На рисунке 48 показано полученное расчетным путем изменение температуры воздуха и линейных тепловых потерь в течение отопительного периода для температурных графиков 95/70, 105/70, 130/70, 150/70. Красные точки отражают температуры воздуха в канале, а синие – линейные тепловые потери тепловой сети. Нумерация месяцев соответствует началу и окончанию отопительного периода, т.е. 1 – октябрь, 2 – ноябрь, 3 – декабрь, 4 – январь, 5 – февраль, 6 – март, 7 – апрель.



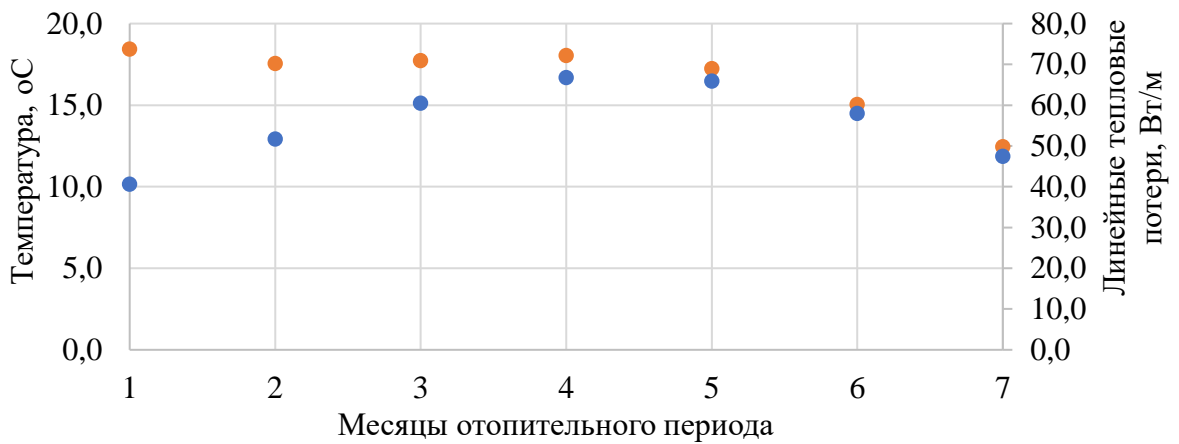
а)



б)



в)



г)

Рисунок 48 – **Изменение температуры воздуха и линейных тепловых потерь в течение отопительного периода для температурного графика 95/70 (а), 105/70 (б), 130/70 (в), 150/70 (г)**
 1 – октябрь, 2 – ноябрь, 3 – декабрь, 4 – январь, 5 – февраль, 6 – март, 7 – апрель

Анализ полученных данных показал, что максимальное значение тепловых потерь для большинства температурных графиков наблюдается в январе. При этом температура воздуха в канале плавно снижается на 6 °С в течение всего отопительного периода и имеет минимальное значение в апреле. С учетом этого за расчетный период при определении площади поверхности коллектора принят период с максимальным значением линейных тепловых потерь, т.е. январь.

4.1.3 Определение поверхности теплообмена коллектора устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы

Опорными для расчета поверхности теплообмена коллектора являются значения потерь тепловой энергии в сети, поэтому начало расчета связано с определением температуры теплоносителя сети теплоснабжения при заданных теплофизических параметрах окружающей тепловую сеть среды.

Расчет площади поверхности коллектора производится по следующему алгоритму:

1. Определение температур теплоносителя в подающем и обратном трубопроводе.

Температура теплоносителя сети теплоснабжения в подающем трубопроводе определяется по формуле [24]:

$$\tau_{01} = t_{\text{вр}} + \Delta t'_0 \cdot \bar{Q}_o^{0,8} + (\delta \tau'_0 - 0,5 \cdot \theta') \cdot \bar{Q}_o, \quad (25)$$

где $t_{\text{вр}}$ – расчетная температура воздуха внутри помещения, °С;

\bar{Q}_o – относительный расход теплоты на отопление;

$\Delta t'_0$ – температурный напор отопительного прибора при расчетном режиме, °С;

$\delta \tau'_0$ – температурный перепад между температурой сетевой воды в подающем и обратном трубопроводе, °С;

θ' – расчетный перепад температур в местной системе отопления, °С

Относительный расход теплоты на отопление определяется по формуле:

$$\bar{Q}_o = \frac{Q_o}{Q'_o} = \frac{t_{вр} - t_n}{t_{вр} - t_{нр}}, \quad (26)$$

где $t_{нр}$ – расчетная температура наружного воздуха для проектирования систем отопления, °C [27];

t_n – температура наружного воздуха, °C;

Температурный напор отопительного прибора при расчетном режиме:

$$\Delta t'_o = \frac{\tau'_{03} + \tau'_{02}}{2} - t_{вр}, \quad (27)$$

где τ'_{02} – температура сетевой воды в обратном трубопроводе при расчетной температуре наружного воздуха $t_{нр}$, °C;

τ'_{03} – температура воды в подающем трубопроводе после элеватора или смешительного насоса при расчетной температуре наружного воздуха $t_{нр}$, °C;

Температурный перепад между температурой сетевой воды в подающем и обратном трубопроводе определяется по формуле:

$$\delta \tau'_o = \tau'_{01} - \tau'_{02} \quad (28)$$

где τ'_{01} – температура сетевой воды в подающем трубопроводе при расчетной температуре наружного воздуха $t_{нр}$, °C;

Расчетный перепад температур в местной системе отопления:

$$\theta' = \tau'_{03} - \tau'_{02}, \quad (29)$$

Температура сетевой воды в обратном трубопроводе:

$$\tau_{02} = t_{вр} + \Delta t'_o \cdot \bar{Q}_o^{-0,8} - 0,5 \cdot \theta' \cdot \bar{Q}_o = \tau_{01} - \delta \tau'_o \cdot \bar{Q}_o \quad (30)$$

2. Определение температуры воздуха внутри непроходного канала:

$$t_{кан} = \frac{\frac{\tau_{01}}{R_{из1}^L + R_{н1}^L} + \frac{\tau_{02}}{R_{из2}^L + R_{н2}^L} + \frac{t_{гр}}{R_{кан}^{пов} + R_{гр}^к}}{\frac{1}{R_{из1}^L + R_{н1}^L} + \frac{1}{R_{из2}^L + R_{н2}^L} + \frac{1}{R_{кан}^{пов} + R_{гр}^к}}, \quad (31)$$

где $R_{из1}^L, R_{из2}^L$ – термические сопротивления изоляции подающего и обратного трубопроводов, $м \cdot ^\circ C / Вт$;

$R_{н1}^L, R_{н2}^L$ – термические сопротивления теплоотдаче от поверхности изоляции подающего и обратного трубопроводов, $м \cdot ^\circ C / Вт$;

$R_{гр}^K$ – термическое сопротивление грунта $м \cdot ^\circ C / Вт$;

$R_{кан}^{пов}$ – термическое сопротивление теплоотдаче от воздуха к поверхности канала, $м \cdot ^\circ C / Вт$;

$t_{гр}$ – среднемесячная температура грунта на глубине залегания непроходного канала, $^\circ C$.

Согласно [30] термическим сопротивлением стенок канала пренебрегаем и относим их к термическому сопротивлению грунта.

Толщина изоляции подающего и обратного трубопроводов принята одинаковой. Тогда, термическое сопротивления изоляции подающего и обратного трубопроводов:

$$R_{из1}^L = R_{из2}^L = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{из}} \cdot \ln \frac{D}{d}, \quad (32)$$

где d – наружный диаметр подающего и обратного трубопроводов, $м$ [25, 26];

$\lambda_{из}$ – теплопроводность изоляции в конструкции, $Вт / (м \cdot ^\circ C)$ [29];

D – диаметр изоляции по полиэтиленовой оболочке [25, 26];

$\delta_{из}$ – толщина изоляции подающего и обратного трубопроводов, $м$ [26, 25];

Термическое сопротивления теплоотдаче от поверхности изоляции подающего и обратного трубопроводов:

$$R_{н1}^L = R_{н2}^L = \frac{1}{2\pi \cdot \alpha_k \cdot D}, \quad (33)$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи в канале, $Вт / (м^2 \cdot ^\circ C)$;

Термическое сопротивление грунта:

$$R_{гр}^k = \frac{\ln \left[3,5 \cdot \frac{H}{h} \cdot \left(\frac{h}{b} \right)^{0,25} \right]}{\left(5,7 + 0,5 \frac{b}{h} \right) \cdot \lambda_{гр}}, \quad (34)$$

где b, h – высота и ширина канала, м [28];

H – глубина заложения непроходного канала, расстояние от оси трубы до поверхности земли, м;

$\lambda_{гр}$ – теплопроводность грунта, Вт/(м·°С).

Размеры канала регламентированы [28] и определяются относительно диаметра трубопровода. В таблице 18 показаны геометрические параметры размещения трубопровода в непроходном канале.

Таблица 18 – Размещение трубопровода в непроходном канале

Наружный диаметр трубопровода, мм	Расстояние от поверхности теплоизоляционной конструкции трубопровода в свету, мм			
	до стенки канала	до поверхности тепло-изоляционной конструкции смежного трубопровода	до перекрытия канала	до дна канала
При использовании навесной изоляции				
25-80	70	100	50	100
100-250	80	140	50	150
300-350	100	160	70	150
400	100	200	70	180
500-700	110	200	100	180
800	120	250	100	200
900-1400	120	250	100	300
При использовании предизолированных трубопроводов				
25-150	250	150	100	250
150-300	250	250	100	250
350-1400	300	250	100	300

Высота канала рассчитывается по формуле:

$$h = D + y + z, \quad (35)$$

где y – расстояние от поверхности теплоизоляционной конструкции трубопроводов до перекрытия канала [28];

z – расстояние от поверхности теплоизоляционной конструкции трубопроводов до дна канала [28].

Ширина канала равна

$$b = 2D + 2m + n, \quad (36)$$

где m – расстояние от поверхности теплоизоляционной конструкции трубопроводов до стенки канала;

n – расстояние от поверхности теплоизоляционной конструкции трубопроводов до поверхности теплоизоляционной конструкции смежного трубопровода.

Термическое сопротивление теплоотдаче от воздуха к поверхности канала, $\text{м}^2\text{К}/\text{Вт}$, определяется следующим образом:

$$R_{\text{кан}}^{\text{пов}} = \frac{1}{\pi \cdot \alpha_{\text{к}} \cdot \frac{2 \cdot b \cdot h}{b+h}}. \quad (37)$$

3. Определение удельных линейных потерь тепловой энергии от трубопроводов тепловой сети, $\text{Вт}/\text{м}$:

$$q_1 = \frac{t_{\text{вк}} - t_{\text{гр}}}{K \cdot (R_{\text{кан}}^{\text{пов}} + R_{\text{гр}}^{\text{к}})} \quad (38)$$

где K – коэффициент дополнительных потерь [30].

4. Определение площади поверхности коллектора.

При совместной работе тепловой сети и устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы согласно результатам математического моделирования, приведенным в главе 3, 90% тепловых потерь поглощается коллектором. Греющим теплоносителем при расчете площади поверхности коллектора является воздух, расположенный между внутренней поверхностью канала и теплоотражающим экраном T_{f1} . Температура греющего теплоносителя принята равной средней за отопительный период температуре грунта.

Расчетная температура теплоносителя внутри горизонтального коллектора T_{f2} принимается в соответствии с разделом 4.1.1.

Средняя разность температур теплоносителей

$$\Delta\bar{T} = T_{f1} - T_{f2}. \quad (39)$$

Температура стенки со стороны горячего теплоносителя

$$T_{w1} = T_{f1} - \frac{\Delta\bar{T}}{2}. \quad (40)$$

Температура стенки со стороны холодного теплоносителя

$$T_{w2} = T_{w1} - (1 \div 3^\circ\text{C}). \quad (41)$$

Критерий Релея определяется по формуле

$$Ra = \frac{g \cdot d_{\text{нар}}^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot Pr, \quad (42)$$

где g – ускорение свободного падения $9,81 \text{ м/с}^2$;

$d_{\text{нар}}$ – наружный диаметр коллектора, м;

ν – кинематический коэффициент вязкости воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$;

β – коэффициент объемного расширения, $1/\text{К}$;

ΔT – разность температур стенки и жидкости, $^\circ\text{C}$

$$\Delta T = (T_{f1} - T_{w1}); \quad (43)$$

Pr – критерий Прандтля;

$$\beta = \frac{1}{273 + T_0}, \quad (44)$$

где T_0 – определяющая температура, $^\circ\text{C}$

$$T_0 = \frac{(T_{f1} + T_{w1})}{2}. \quad (45)$$

Далее по определяющей температуре необходимо найти теплофизические свойства теплоносителя, определить режим течения в зависимости от значения критерия Релея (таблица 19), и рассчитать критерий Нуссельта.

Таблица 19 – Коэффициенты C и n для определения коэффициента Нуссельта

Ra	C	n	Режим течения по Михееву М.А.
$<10^{-3}$	0,5	0	Пленочный
$10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8	Переходный от пленочного к ламинарному
$5 \cdot 10^2 \cdot 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4	Ламинарный и переходный к турбулентному
$2 \cdot 10^7 \cdot 10^{13}$	0,135	1/3	Турбулентный

Безразмерный коэффициент теплоотдачи определяется по формуле

$$Nu = C \cdot Ra^n. \quad (46)$$

Коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке коллектора за счет конвекции определяется по формуле

$$\alpha_k = \frac{\lambda_f \cdot Nu}{d_{нар}}, \quad (47)$$

где λ_f – коэффициент теплопроводности жидкости, определяемый по T_{fl} , Вт/(м·К).

Температура на поверхности теплоотражающего экрана принята равной температуре воздуха в канале. Это допустимо, поскольку материал теплоотражающего экрана вследствие высокого значения коэффициента теплопроводности и малой теплоемкости обладает малой инерционностью.

Коэффициент теплоотдачи от экрана к стенке коллектора за счет излучения определяется по формуле

$$\alpha_{л} = C_o \cdot \varepsilon_{пр} \cdot \frac{\left(\left(\frac{T_{экр} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{w1} + 273}{100} \right)^4 \right)}{T_{экр} - T_{w1}}, \quad (48)$$

где $T_{экр}$ – температура на поверхности экрана, °С;

T_{w1} – температура стенки коллектора, °С;

$C_o = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

$\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{экр}} + \frac{1}{\varepsilon_k} - 1} \quad (49)$$

где $\varepsilon_{\text{экр}}$ – степень черноты экрана;

$\varepsilon_{\text{к}}$ – степень черноты коллектора.

Полный коэффициент теплоотдачи при сложном радиационно-конвективном теплообмене равен сумме коэффициента конвективной теплоотдачи и коэффициента радиационной теплоотдачи

$$\alpha_1 = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{р}}. \quad (50)$$

Определение критерия Рейнольдса производим по формуле, задавшись скоростью теплоносителя внутри коллектора $\omega = 0,5-3$ м/с,

$$\text{Re} = \frac{\omega_2 \cdot d_{\text{вн}}}{\nu_2}, \quad (51)$$

где $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубок коллектора, м;

ν – кинематический коэффициент вязкости воды, м²/с.

Кинематический коэффициент вязкости теплоносителя определяем по $T_0 = T_{\text{т2}}$.

Критерий Нуссельта вынужденной конвекции

$$\text{Nu} = 0,021 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,43} \cdot \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_w} \right)^{0,25}, \quad (52)$$

где Pr и Pr_w – критерий Прандтля при определяющей температуре T_0 и при температуре поверхности стенки.

Теплообменом излучения внутри коллектора пренебрегаем. Коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемому теплоносителю посредством конвекции определится по уравнению

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_{\text{ф}} \cdot \text{Nu}}{d_{\text{вн}}} \quad (53)$$

Коэффициент теплопередачи равен

$$\kappa = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot \kappa_p} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda_w}} \quad (54)$$

где δ – толщина стенки коллектора, м

$$\delta = \frac{d_{\text{нар}} + d_{\text{вн}}}{2}, \quad (55)$$

λ_w – коэффициент теплопроводности материала коллектора, Вт/(м · К);

κ_p – коэффициент оребрения со стороны нагреваемого теплоносителя.

Далее необходимо уточнить температуры стенок

$$T_{w1\text{пол}} = T_{f1} - \frac{q_k}{\alpha_1}; \quad (56)$$

$$T_{w2\text{пол}} = T_{f2} - \frac{q_k}{\alpha_2}, \quad (57)$$

где q_k – тепловосприятие коллектора, отнесенное к одному метру длины трубопроводов тепловой сети, Вт/м

$$q_k = \kappa \cdot (T_{f1} - T_{f2}) = 0,9 \cdot q_1. \quad (58)$$

Расхождение температур составляют

$$\Delta_1 = \frac{(T_{w1} - T_{w1\text{пол}})}{T_{w1\text{пол}}} \cdot 100\%; \quad (59)$$

$$\Delta_2 = \frac{(T_{w2} - T_{w2\text{пол}})}{T_{w2\text{пол}}} \cdot 100\% \quad (60)$$

Если расхождение составляет более 5%, то задаются новыми температурами стенок $T_{w1} = T_{w1\text{пол}}$ и $T_{w2} = T_{w2\text{пол}}$ и повторяют расчет. Когда расхождение соответствует вышеописанным условиям, окончательно принимают полученный коэффициент теплопередачи.

Площадь поверхности коллектора, отнесенная к одному метру длины трубопроводов тепловой сети

$$F = \frac{0,9 \cdot q_1 \cdot \pi \cdot D}{\kappa \cdot (T_{f1} - T_{f2})}. \quad (61)$$

Число трубок коллектора, отнесенное к 1 метру трубопроводов тепловой сети, определяется по формуле

$$n = \frac{F}{\pi \cdot d_{\text{нар}}}. \quad (62)$$

Длина коллектора равна

$$L = \frac{Q_o}{\eta_1}, \quad (63)$$

где Q_o – полная нагрузка на испаритель, Вт.

4.1.4 Определение параметров работы теплового насоса

Исходя из теплового баланса трансформатора тепла полная нагрузка на испаритель определяется по формуле

$$Q_o = Q_k - L, \quad (64)$$

где Q_k – полная нагрузка на конденсатор, Вт;

L – полная работа сжатия в компрессоре, Вт.

Полная работа сжатия находится исходя из известной полной нагрузки на конденсатор и заданного в разделе 4.1.1 коэффициента трансформации

$$L = \frac{Q_k}{K_{тр}}, \quad (65)$$

где $K_{тр}$ – коэффициент трансформации теплового насоса.

Последующие действия связаны с выбором теплового насоса.

4.2 Регулирование работы устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы

Эксплуатация устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы предполагается так же при режимах, отличных от расчетных. Необходимость регулирования работы устройства связана с изменением величины тепловых потерь, обусловленных изменением как температуры теплоносителя в сети теплоснабжения, так и температуры окружающего тепловую сеть грунта. По причине условия сохранности теплового режима сети регулирование работы устройства необходимо производить по испарителю качественным методом, т.е. за счет изменения температуры теплоносителя в коллекторе устройства, воздействовать на которую предполагается изменением параметров работы теплового насоса.

Расчетному режиму работы устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы соответствует режим работы тепловой сети с максимальными значениями тепловых потерь. При этом в коллекторе устройства должна поддерживаться расчетная температура его теплоносителя, определенная в п. 4.1.1. Поддержание температуры теплоносителя производится за счет отвода от него теплоты в испарителе при соответствующей температуре кипения рабочего агента. В переходном режиме работы теплового насоса, наблюдаемом при уменьшении тепловых потерь сети теплоснабжения, температура теплоносителя в коллекторе увеличивается, за счет увеличения температуры кипения в испарителе. Воздействие на температуру кипения производится путем изменения давления кипения. При этом регулирование работы теплового насоса осуществляется с помощью автоматических устройств изменением расхода рабочего агента.

Факторами, влияющими на значения температуры теплоносителя в коллекторе, являются значения расчетной температуры наружного воздуха, температуры теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах сети теплоснабжения, температура окружающего тепловую сеть грунта и расчетная температура теплоносителя в коллекторе. Определение температуры теплоносителя в переходном режиме осуществляется по следующему алгоритму:

1. Определение относительной отопительной нагрузки и температур теплоносителя в подающем и обратном трубопроводе производится по формулам (25) – (30).

2. Определение относительных тепловых потерь в тепловых сетях

$$\bar{Q}_{\text{пот}} = \frac{Q_{\text{пот}}}{Q'_{\text{пот}}} = \frac{0,5 \cdot (\tau_{01} + \tau_{02}) - t_{\text{г}}}{0,5 \cdot (\tau'_{01} + \tau'_{02}) - t'_{\text{г}}}, \quad (66)$$

где $Q_{\text{пот}}$ – тепловые потери в сети теплоснабжения при текущей температуре наружного воздуха, Вт/м;

$Q'_{\text{пот}}$ – тепловые потери в сети теплоснабжения при расчетной температуре наружного воздуха, Вт/м;

t_r – текущая температура грунта, зависящая от месяца отопительного периода и глубины прокладки тепловой сети, °С;

t'_r – расчетная температура грунта, °С.

3. Определение температуры теплоносителя в коллекторе

$$t_{\text{кол}} = t_r - (t'_r - t'_{\text{кол}}) \cdot \bar{Q}_{\text{пот}}, \quad (67)$$

где $t'_{\text{кол}}$ – расчетная температура теплоносителя в коллекторе устройства, °С, определяемая в разделе 4.1.1 настоящей главы.

На основе данного алгоритма для условий Центральной России, на примере г. Иваново, построена номограмма (рисунок 49), позволяющая определить температуру теплоносителя в коллекторе устройства в зависимости от температуры наружного воздуха для различных температурных графиков работы тепловой сети, вне зависимости от диаметра трубопроводов для всех месяцев отопительного периода.

4.3 Методика определения экономических показателей эффективности реконструкции тепловых сетей на базе предлагаемого устройства

В настоящем разделе представлена разработанная методика определения технико-экономических показателей работы рассматриваемого устройства, предназначенная для определения условий его работы.

Данное исследование позволит разработать практические рекомендации по эффективному применению устройства. Такая постановка задачи возникла в связи с необходимостью разрешить противоречия между очевидными достоинствами систем на основе тепловых насосов и современными условиями их применения, заключающимися кроме всего прочего в росте тарифов на тепловую и электрическую энергию.

Проведенное исследование условий работы устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы основано на методиках изложенных в [91, 92].

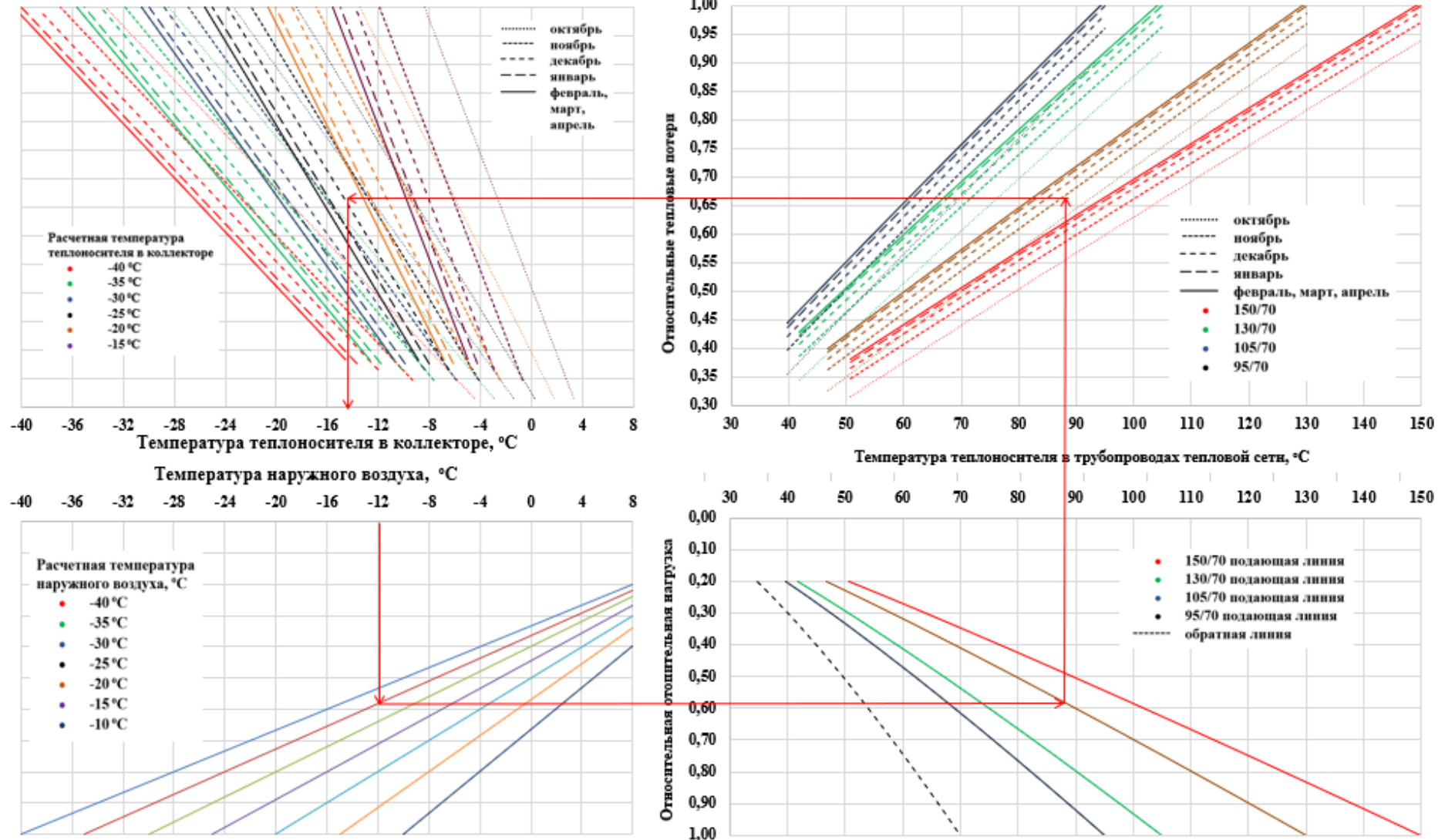


Рисунок 49 – Номограмма для определения температуры теплоносителя в коллекторе устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы для климатических условий Центральной России (г. Иваново)

В работе исследовано влияние ряда факторов на показатели экономической эффективности устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы. К таким факторам относятся:

- удельные стоимость оборудования (стоимость одного киловатта полезной мощности предлагаемого устройства), руб/кВт;
- общие капитальные затраты, руб;
- ежегодный экономический эффект, относящийся к единице мощности устройства, руб/(кВт·год);
- общий ежегодный экономический эффект, руб/год;
- коэффициент трансформации теплового насоса, входящего в состав устройства;
- тариф на электрическую энергию, руб/(кВт·ч);
- тариф на тепловую энергию, руб/Гкал;
- ставка дисконтирования (в случае дисконтированного срока окупаемости).

Для предварительной оценки экономической эффективности необходимы и достаточными приняты простой и дисконтированный срок окупаемости.

Методика представлена в виде графических зависимостей, с помощью которых можно принять технико-экономическое решение, учитывая различные начальные условия. Алгоритм заключается в последовательном графическом определении ежегодного экономического эффекта, простого и дисконтированного срока окупаемости по приведенным ниже зависимостям, соблюдая предложенную последовательность действий:

1. Определение ежегодного удельного экономического эффекта от реконструкции тепловых сетей на базе устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы.

Графические зависимости, показанные на рисунке 50 дают возможность определить удельный ежегодный экономический эффект (на 1кВт теплопроизводительности устройства) от применения предлагаемого устройства исходя из актуальных тарифов на тепловую и электрическую энергию,

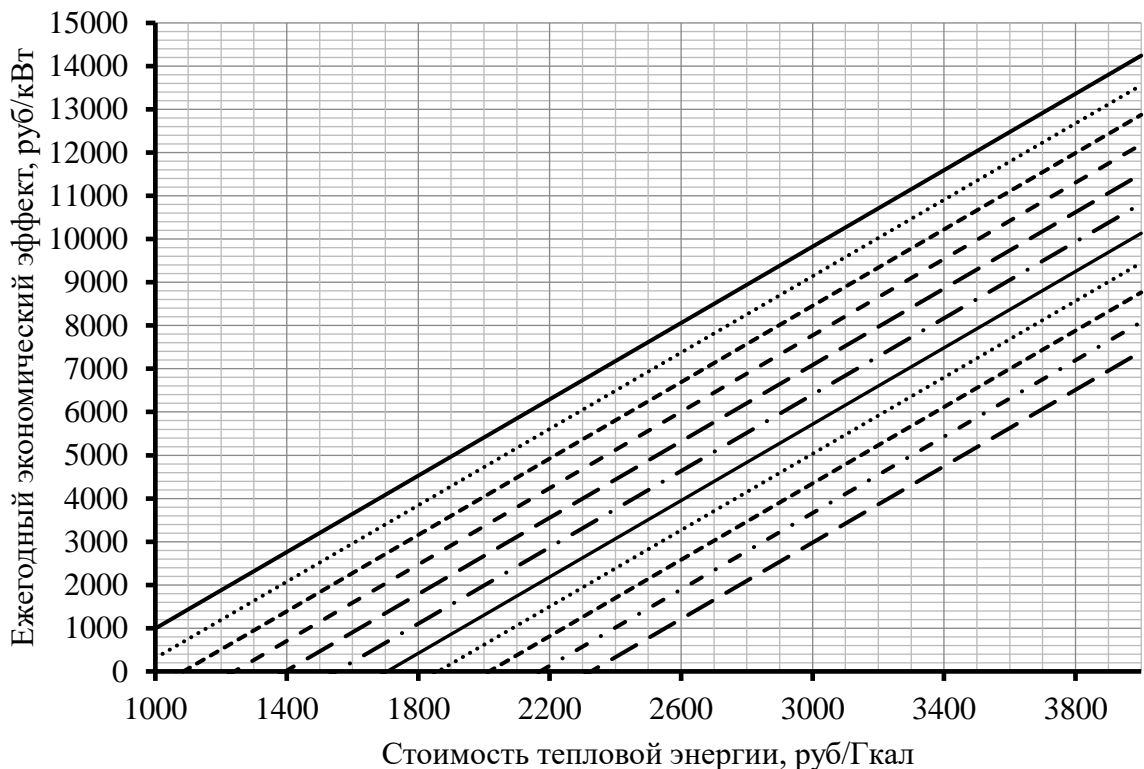
изменяемых в диапазоне, соответственно от 1000 до 4000 руб/Гкал и от 2 до 6 руб/(кВт·ч). Поскольку количество потребляемой электроэнергии напрямую зависит от коэффициента трансформации, зависимости построены при его средних значениях, т.е. равного 3 и 4 (рисунок 50).

Для определения общего ежегодного экономического эффекта необходимо полученное значение удельного экономического эффекта умножить на необходимую теплопроизводительность устройства.

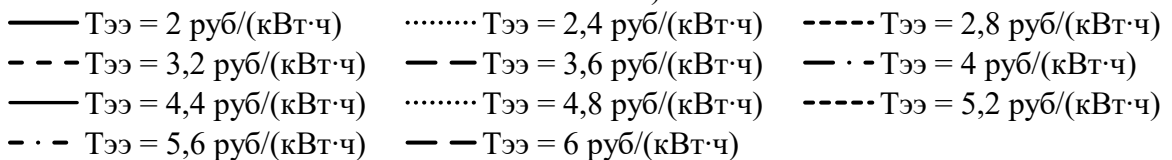
2. Определение простого срока окупаемости.

Пользуясь полученным значением удельного ежегодного экономического эффекта, найденным в пункте 1, и зная удельные капитальные затраты на 1 кВт мощности устройства, по зависимости, представленной на рисунке 51, производится определение простого срока окупаемости.

3. Зависимость дисконтированного срока окупаемости от простого срока окупаемости.



а)



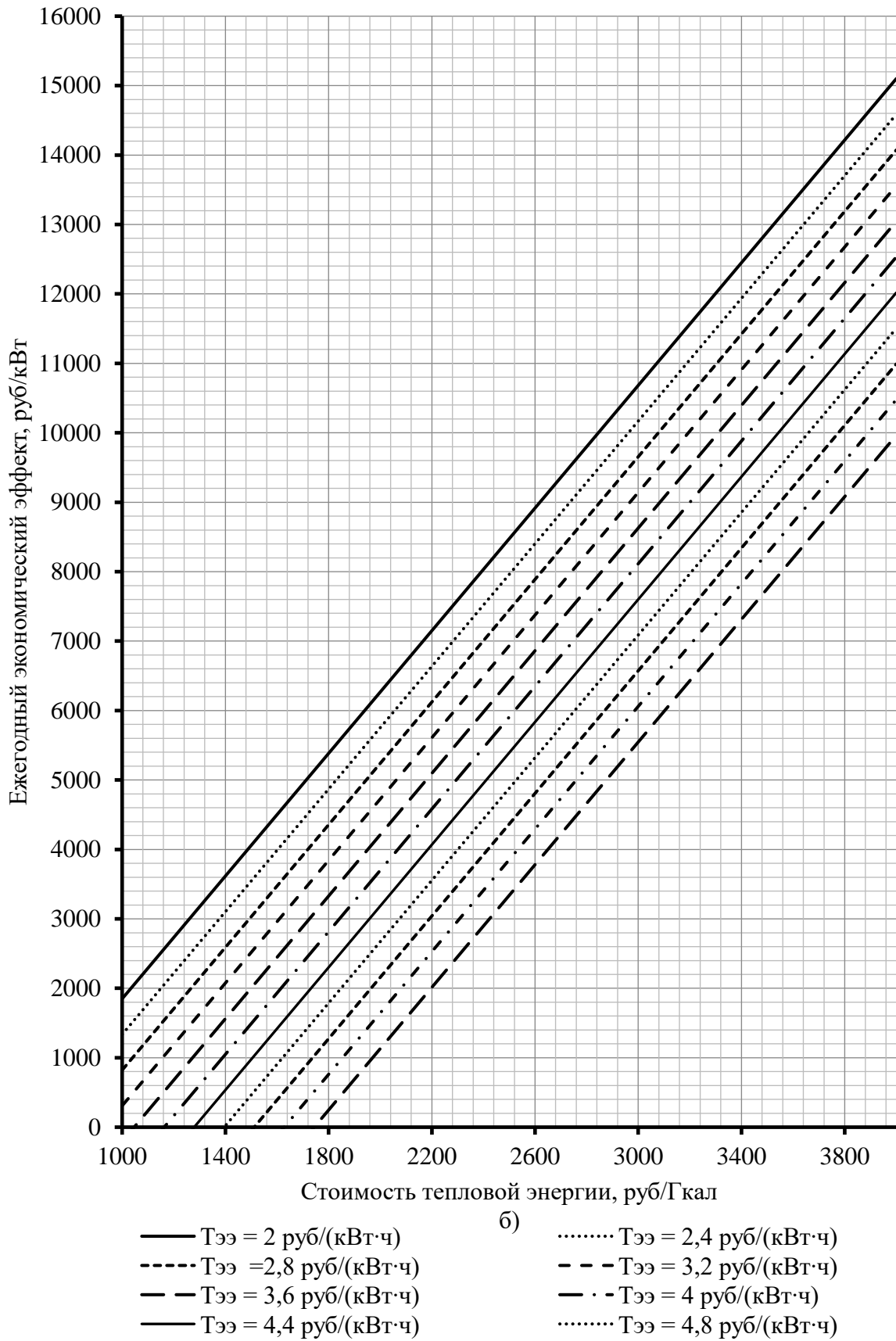


Рисунок 50 – Зависимость ежегодного экономического эффекта, относящегося к 1 кВт мощности устройства, от тарифа на тепловую энергию при различных значениях тарифа на электрическую энергию ((а) $K_{тр} = 3$, (б) $K_{тр} = 4$)

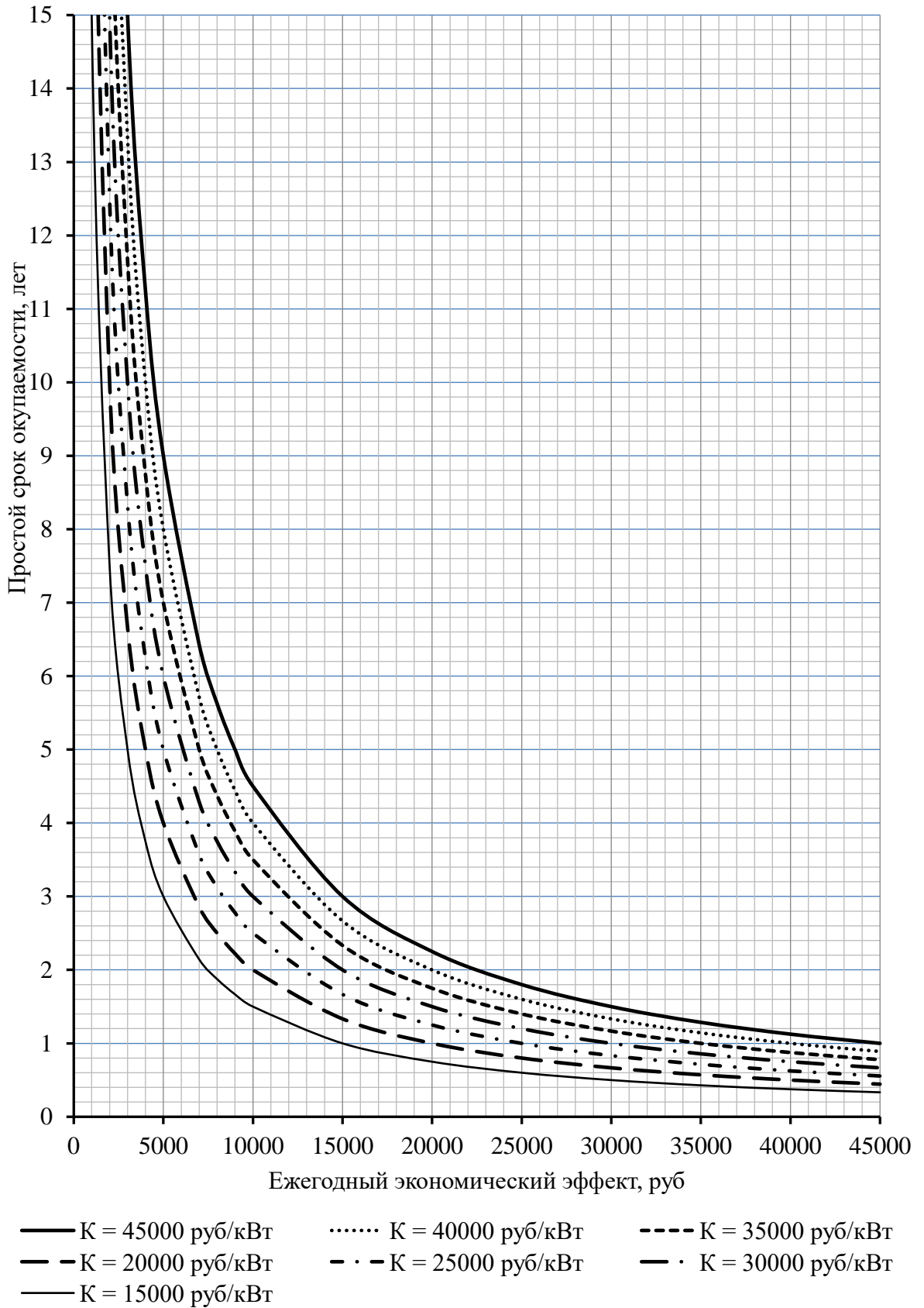


Рисунок 51 – Зависимость простого срока окупаемости от ежегодного экономического эффекта, относящегося к 1 кВт мощности устройства, при различных значениях удельной стоимости оборудования

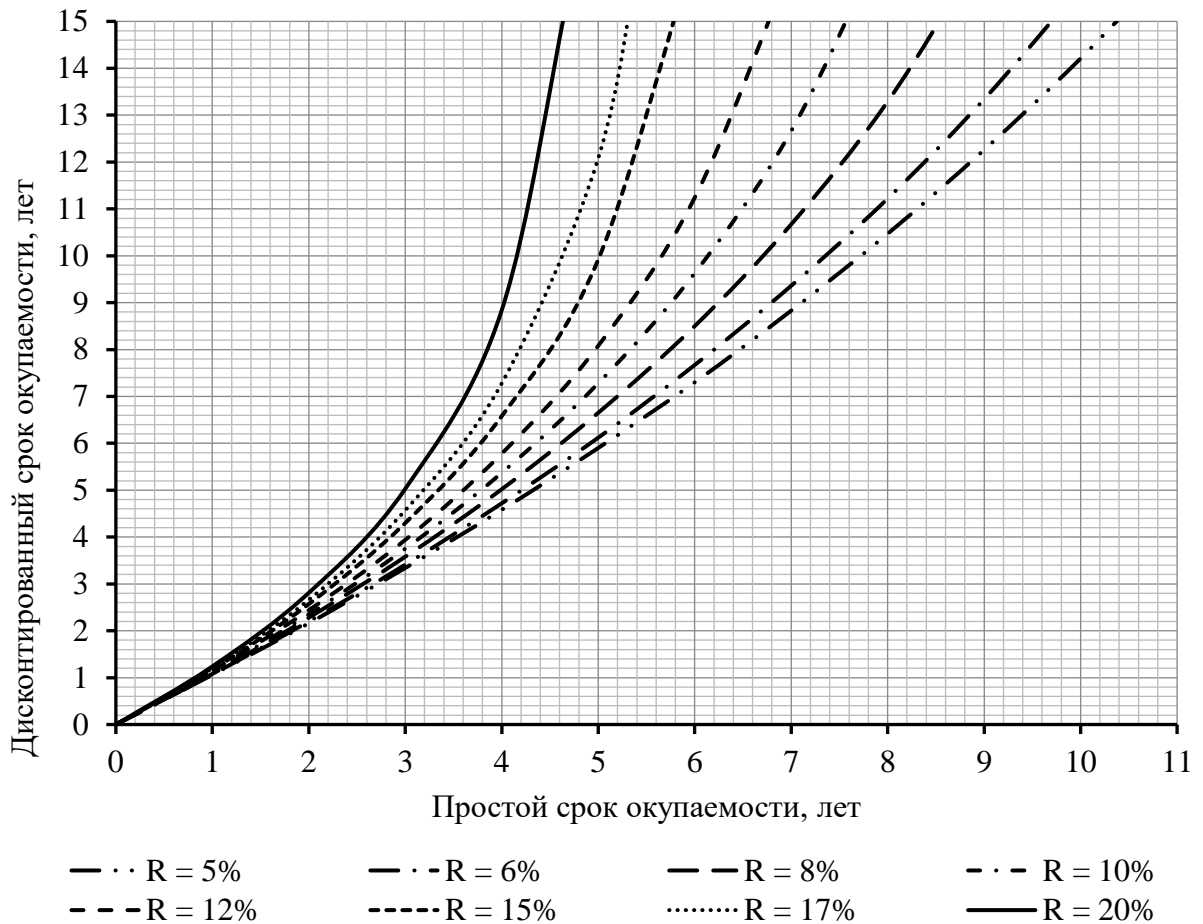


Рисунок 52 – Зависимость дисконтированного срока окупаемости от простого срока окупаемости при различных значениях ставки дисконтирования

Графическая зависимость, показанная на рисунке 52, дает возможность определить дисконтированный срок окупаемости предлагаемой технологии исходя из значений простого срока окупаемости и ставки дисконтирования R .

Таким образом, предложенная методика позволяет оценить экономическую целесообразность планируемой реконструкции и определять эффективные условия его работы.

Для оценки срока окупаемости инвестиционного проекта, связанного с реконструкцией тепловой сети на базе предлагаемого устройства в работе сделан расчет, основанный на тарифах и ценах на оборудование, актуальных на первое полугодие 2022 года в г. Иваново. Данный расчет имеет ограниченное применение, поскольку не может учесть всех обстоятельств, сопутствующих проведению энергосберегающих мероприятий на конкретном объекте в

условиях быстроизменяющейся экономики. В связи с этим расчет простого и дисконтированного срока окупаемости произведен на 1 кВт тепловой мощности, производимой устройством по утилизации тепловых потерь.

Объектом исследования является типовое административное здание промышленного предприятия, расположенное в г. Иваново. Исходя из принятых условий работы, предусматривающих низкотемпературное отопление, коэффициент трансформации для расчета принят равным 4. По данным [93] тариф на тепловую энергию составляет 2153 руб/Гкал, тариф на электрическую энергию при одноставочном тарифе [94] – 4,97 руб/(кВт·ч). На данном этапе целесообразно определить ежегодный экономический эффект от применения устройства равный разнице в затратах на тепловую энергию, покупаемую у сторонней теплоснабжающей организации, и затратах на электрическую энергию, затрачиваемую на привод компрессора и насоса.

На рисунке 53 показано графическое определение ежегодного экономического эффекта на фрагменте соответствующей диаграммы. Кроме тарифов на тепловую и электрическую энергию необходимо владеть информацией об удельной стоимости оборудования, которая будет существенно зависеть как от производителя оборудования, так и от теплопроизводительности теплового насоса (с увеличением тепловой мощности удельная стоимость существенно падает).

Таким образом, при заданных условиях ежегодный экономический эффект составил 3130 рублей с 1 кВт тепловой мощности устройства.

Итоговая стоимость оборудования складывается из стоимости горизонтального грунтового коллектора, теплового насоса, модуля циркуляции теплоносителя и теплоотражающего экрана. Для расчета выбран тепловой насос отечественного производства Henk с удельной стоимостью 8200 руб/кВт (при теплопроизводительности теплового насоса 30 кВт). Удельная стоимость модуля циркуляции, экрана и коллектора зависит от конкретных обстоятельств

применения устройства и в данном расчете условно принята равной удельной стоимости теплового насоса.

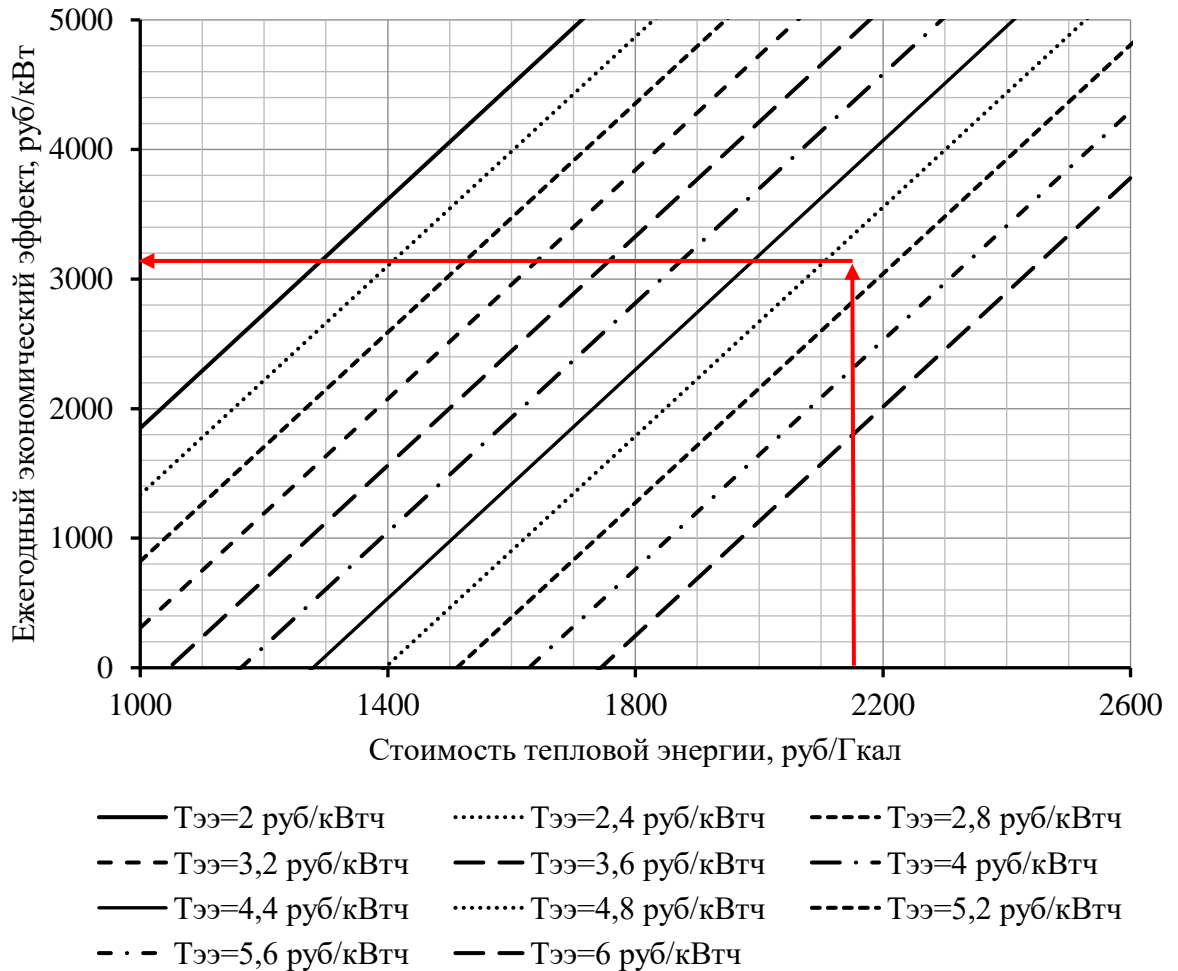


Рисунок 53 – Определение ежегодного экономического эффекта

Стоимость проектных работ принята равной 10% от стоимости оборудования. Стоимость монтажных работ принята равной нулю, исходя из допущения о том, что все необходимые работы производятся силами промышленного предприятия в ведении которого находятся тепловые сети.

С учетом вышесказанного можно определить итоговую удельную стоимость реконструкции равной 16400 руб/кВт и перейти к нахождению простого и дисконтированного срока окупаемости. В соответствии с рисунками 54 и 55 простой срок окупаемости равен 5,2 года, дисконтированный – 8,6 лет.

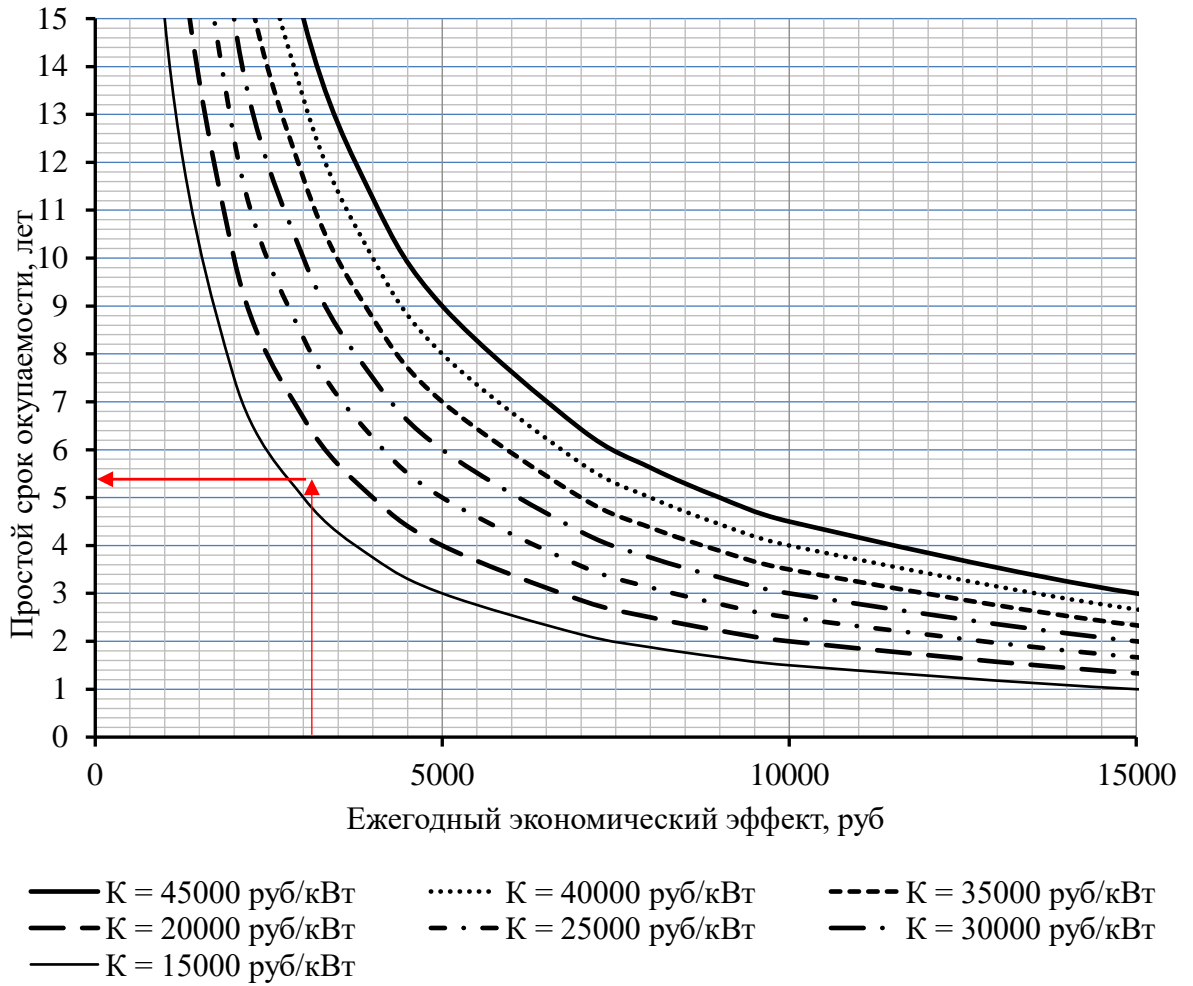


Рисунок 54 – Определение простого срока окупаемости

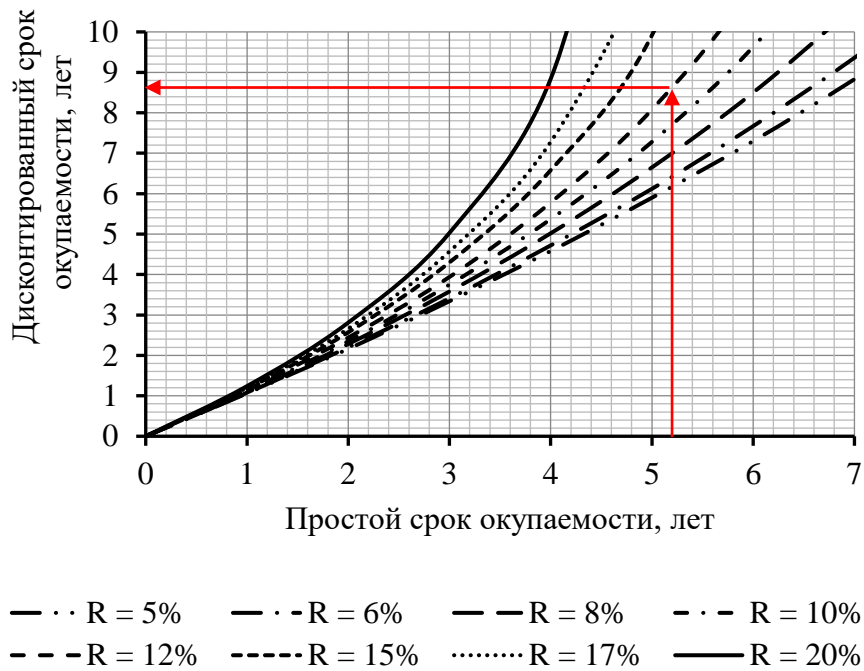


Рисунок 55 – Определение дисконтированного срока окупаемости

4.4 Практическое применение устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы

В настоящем разделе рассмотрены варианты практического применения предлагаемого устройства, а также особенности размещения устройства в канале теплотрассы.

4.4.1 Установка теплоотражающего экрана и коллектора в канале теплотрассы

Конструкция тепловой сети с размещенным коллектором и теплоотражающим экраном основана на применении каркасного устройства П-образной формы с элементами опоры, предложенного и описанного в [95].

Каркасное устройство с элементами опоры выполнено из пластикового материала, облицованное рамами с теплоотражающими экранами, установленное с зазором 10-50 мм от внутренних поверхностей канала. Каркасное устройство П-образной формы с элементами крепления к трубопроводам, выполненное из пластикового материала, облицованное рамами с теплоотражающими экранами, установленное вокруг трубопроводов тепловой сети с зазором 40-50 мм от поверхности трубопроводов тепловой сети, внутри каркасного устройства с элементами опоры. Каркасное устройство с элементами опоры и каркасное устройство П-образной формы с элементами крепления к трубопроводам имеют полчки для установки рам с теплоотражающим экраном. Схема каркасных устройства показана на рисунке 56. Элементы крепления к трубопроводам выполнены в виде опорной планки и двух фиксирующих планок.

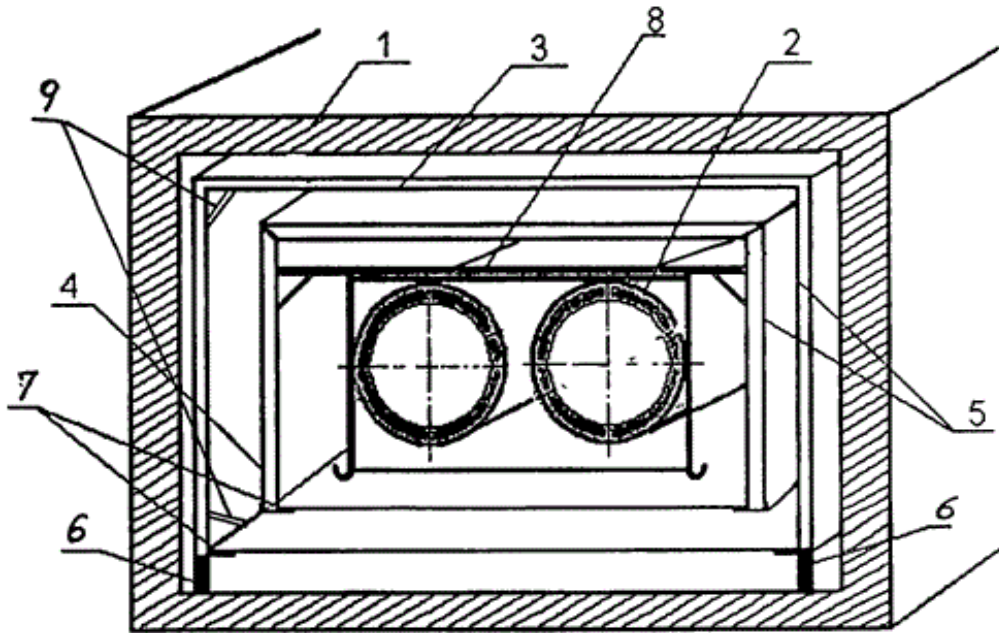


Рисунок 56 – Каркасное устройство П-образной формы:

1 – канал теплотрассы; 2 – трубопроводы тепловой сети; 3 – каркасное устройство П-образной формы с элементами опоры; 4 – каркасное устройство П-образной формы с элементами крепления; 5 – рамы с теплоотражающими экранами; 6 – опоры; 7 – полочки; 8 – элементы крепления к трубопроводам, 9 – раскосы

Каркасные устройства 3 и 4 имеют П-образную форму, в нижней части снабжены полочками 7 для установки рам с теплоотражающими экранами 5. Для придания жесткости каркасные устройства П-образной формы могут быть снабжены раскосами 9. Каркасное устройство П-образной формы с элементами опоры 3 устанавливается на донную плиту канала на опоры 6 выполненные, например, в виде ножек, на расстоянии $10 \div 50$ мм от внутренних поверхностей канала. На его боковых и верхней плоскостях закрепляют рамы с теплоотражающими экранами 5. На полочки 7 устанавливают рамы с теплоотражающими экранами 5. Каркасное устройство П-образной формы с элементами крепления 4 снабжено элементами крепления 8 к трубопроводам, выполненным в виде опорной планки и двух фиксирующих планок. Опорная планка расположена на расстоянии 40-50 мм от верхней планки каркасного устройства 4 для его установки на трубопроводы 2 и обеспечения необходимой величины зазора от поверхности трубопроводов 2. Расстояние между фиксирующими планками выбирают равным ширине трубопроводов для обеспечения

фиксации каркасного устройства П-образной формы с элементами крепления 4 на трубопроводах 2. Расстояние от фиксирующих планок до боковых планок каркасного устройства П-образной формы с элементами крепления 4 выбирают равным 40-50 мм для обеспечения необходимой величины зазора от поверхности трубопроводов 2. Каркасное устройство П-образной формы с элементами крепления 4 устанавливают на трубопроводы 2 с помощью элементов крепления 8. Закрепляют рамы с теплоотражающими экранами 5 на боковых и верхней плоскостях каркасного устройства 4 и устанавливают рамы с теплоотражающими экранами 5 на полочки 7. Каркасные устройства 3 и 4 позволяют технологически быстро устанавливать теплоотражающие экраны во время укрытия канала верхней плитой. Длину каркасных устройств 3 и 4 выбирают кратной длине укрывающих плит и для удобства монтажа не более 1 метра. Теплоотражающие экраны сохраняют целостность при вскрытии канала теплотрассы 2, при образовании локальных разрывов теплоотражающие экраны могут быть легко заменены или восстановлены, например способом наложения заплат [95].

4.4.2 Варианты практического применения устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы

Прямым предназначением устройства, которому посвящена настоящая работа, является утилизация тепловых потерь в канале теплотрассы и возврат теряемой тепловой энергии в систему теплоснабжения.

При этом полученная тепловая энергия может быть использована разнонаправлено, как для решения задач традиционного теплоснабжения объектов различного назначения, так и для теплоснабжения инженерных систем городского и промышленного хозяйства.

Для промышленных предприятий в условиях, когда источник тепловой энергии, коммуникации и потребитель находятся в ведении одного собственника, создаются наиболее благоприятные условия для организации слаженной

работы системы теплоснабжения и применения современных энергосберегающих технологий.

Анализ параметров работы устройства позволяет расширить спектр его практического применения для решения ряда инженерных и хозяйственных задач. К иным прикладным вариантам практического применения устройства относятся:

- Бесконтактное подсоединение потребителя тепловой энергии.
- Обеспечение работы снегоплавильных установок.
- Обеспечение работы «теплых тротуаров».
- Подогрев воды в бассейне.

Бесконтактное подсоединение абонента подразумевает покрытие тепловой нагрузки, например, вновь строящегося здания или сооружения опосредованно, а не традиционным путем, подразумевающим организации ответвления от распределительной или магистральной сети и передачи тепловой энергии от теплоносителя тепловой сети к абонентским установкам. Традиционный подход влечет за собой гидравлическую разбалансировку и, следовательно, наряду с капитальными затратами, требует определенных финансовых затрат на наладку тепловых сетей. Бесконтактный способ, подразумевающий применение устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы для покрытия тепловой нагрузки на подключаемый абонент не требует увеличения тепловой нагрузки на источник, не вносит изменений в гидравлический режим работы сети, обеспечивает независимость от гидравлического режима тепловой сети, подразумевает возможность использования иных источников энергии для работы устройства (солнечное излучение, тепловая энергия канализационных стоков, тепловая энергия удаляемого вентиляционного воздуха).

Использование предлагаемого устройства в качестве источника тепловой энергии для работы снегоплавильных установок, установок для поддержания дорожного покрытия без льда и снега, а также для нагрева воды в бассейнах будет отличаться большей эффективностью по сравнению с применением

этого же устройства для подогрева теплоносителя в системах горячего водоснабжения и отопления. Это обстоятельство обусловлено низким, но достаточным потенциалом получаемой тепловой энергии, что ведет к снижению высоты теплоподъема в тепловом насосе и, как следствие, требует меньших затрат внешней работы на трансформацию тепла, что сокращает текущие затраты на эксплуатацию таких систем.

4.5 Выводы по четвертой главе

1. Разработана инженерная методика расчета устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы. Определены расчетные условия.

2. Предложен качественный метод регулирования работы устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы, основанный на разработанной универсальной номограмме.

3. Разработана методика оценки экономической эффективности применения предлагаемого устройства, позволяющая определить простой и дисконтированный срок окупаемости реконструкции тепловых сетей на базе предлагаемого в работе устройства.

4. Предложены варианты практического применения устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы.

Результаты исследования, приведенного в главе 1, отражены в 2 работах [102, 114].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические и экспериментальные положения работы, направленные на повышение эффективности систем теплоснабжения промышленных предприятий за счет утилизации тепловых вторичных энергоресурсов, могут быть представлены в виде следующих основных результатов:

1. Проведен анализ источников информации для оценки существующих методов повышения эффективности системы транспорта тепловой энергии, в результате которого были выделены основные актуальные в настоящее время подходы к повышению эффективности работы тепловых сетей и сделан вывод об отсутствии в настоящее время способа утилизации тепловых потерь сети теплоснабжения, позволяющего полностью исключить потери теплоты в окружающую среду.

2. Определен потенциал энергосбережения в тепловых сетях.

3. Разработан способ повышения эффективности системы теплоснабжения на базе оригинального устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы, позволяющий обеспечить сбережение энергетических ресурсов за счет возврата в систему теплоснабжения теряемой тепловой энергии в месте установки устройства.

4. Разработана и создана экспериментальная установка для исследования процессов теплообмена в элементах тепловой сети с применением теплоотражающих экранов и без них.

5. Проведено экспериментальное исследование, которое позволило определить влияние теплоотражающих экранов на процесс переноса теплоты в сети теплоснабжения. Коэффициент эффективности теплоотражающих экранов, работающих при теплофизических и геометрических параметрах экспериментальной установки равен 0,55 при наличии одного экраном, и 0,7 – двух экранов.

6. Разработаны математические модели переноса теплоты в тепловой сети без дополнительных элементов, тепловой сети с теплоотражающим экраном и тепловой сети при совместной работе с предлагаемым устройством.

Относительное отклонение результатов расчета от экспериментальных значений составило не более 5,4%.

7. На основе разработанных математических моделей процессов теплообмена в сетях теплоснабжения различных конструкций определено допустимое максимальное тепловосприятие коллектора устройства в размере 90% от первоначальных тепловых потерь и выявить факторы, влияющие на эффективность работы теплоотражающего экрана в тепловой сети.

8. Проведен анализ эффективности работы теплоотражающего экрана в условиях тепловой сети без коллектора, который показал, что при установке теплоотражающего экрана у внутренней поверхности канала теплотрассы во всех вариантах расчета его коэффициент эффективности варьируется в диапазоне от 0,14 до 0,19.

9. Проведен анализ влияния тепловосприятия коллектора на тепловые потери сети теплоснабжения без теплоотражающего экрана, который показал, что отбор тепловой энергии коллектором из канала теплотрассы в размере первоначальных тепловых потерь вызывает увеличение линейной плотности теплового потока с поверхности трубопроводов в среднем на 10-14%.

10. Разработана инженерная методика расчета параметров устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы.

11. Разработана методика оценка экономической эффективности применения предлагаемого устройства.

12. Результаты диссертационной работы переданы ООО «Ивановская тепловая электростанция» и внедрены в учебный процесс ИГЭУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон № 261 от 23 ноября 2009 г.: [принят Гос. Думой 11 ноября 2009 г.: по состоянию на 11 июня 2021 г.] // Российская газета. – 2009. – 27 ноября (№ 226)
2. Федеральный закон №190 от 27 июля 2010 г.: [Принят Гос. Думой 9 июля 2010 г.: по состоянию на 1 мая 2022г.] // Российская газета. – 2010. – 30 июля (№ 168)
3. Энергетическая стратегия России на период до 2035 г.: [утв. расп. Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р]. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/1026>
4. Федеральная служба государственной статистики [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gks.ru>
5. Аверьянов, В.К. О направлениях повышения эффективности централизованного теплоснабжения крупных городов [Электронный ресурс] / В.К. Аверьянов, Э.Н. Лисицкий, Ю.В. Юферев // Новости теплоснабжения. – 2015. – №09. Режим доступа: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3434
6. Бакай, С.М. Инновационные резервы снижения потерь в тепловых сетях предприятий / С.М. Бакай, С.О. Казакова // Управление экономикой: методы, модели, технологии: материалы XVIII междунар. науч. конф. – 2018. – С. 158–161.
7. Бисерова, К. А. Анализ основных проблем современных сетей централизованного теплоснабжения / К. А. Бисерова // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2021. – Т. 1. – С. 294-296.
8. Фаздалова, А. Р. Влияние негативных воздействий на коэффициент теплопроводности тепловой изоляции / А. Р. Фаздалова, Ю. В. Ваньков // XXV Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика : материалы конференции. В 3-х томах, 07–08 декабря 2021 года, г. Казань. – Казань: Казанский государственный энергетический университет. – 2022. – С. 177-180.
9. Ваньков, Ю. В. Повышение надежности транспортировки тепловой энергии до потребителей в условиях модернизации системы горячего водоснабжения / Ю. В. Ваньков, И. Н. Запольская, С. О. Гапоненко, Л. Р. Мухаметова // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2020. – Т. 12. – № 4(48). – С. 29-37.

10. **Фортов, В.Е.** Энергетика в современном мире / В.Е. Фортов, О.С. Попель. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. – 168 с.
11. **Половников, В.Ю.** Тепломассоперенос в тепловой изоляции и зонах размещения энергосберегающих систем транспортировки и хранения энергоносителей: дис...докт. техн. наук: 01.04.14: защищена 19.02.2021 / Половников Вячеслав Юрьевич. – Томск, 2021. – 400 с.
12. **Кузнецов, Г.В.** Процессы тепло- и массопереноса в конструкциях и зонах размещения подземных тепловых сетей / Г.В. Кузнецов, В.Ю. Половников. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2019. – 280 с.
13. **Яковлев, Б.В.** Предотвращение коррозионной повреждаемости теплосетей канальной прокладки / Б.В. Яковлев // Новости теплоснабжения. – 2009. – № 3. – С. 39–41.
14. **Балтер, И.В.** Анализ коррозионного состояния подземных тепловых сетей / И.В. Балтер // Теплоэнергетика. – 1976. – № 7. – С. 56 – 60.
15. **Хлебанин, Ю.М.** Влияние потерь в тепловых сетях на энергетическую эффективность теплофикации / Ю.М. Хлебанин, Ю.Е. Николаев // Промышленная энергетика. – 2003. – № 10. – С. 2 – 4.
16. **Иванов, В.В.** Влияние увлажнения изоляции и грунта на тепловые потери подземных теплотрасс / В.В. Иванов, И.В. Букаров, В.В. Василенко // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 7. – С. 32 – 33.
17. **Слепченко, В.С.** Влияние различных эксплуатационных факторов на тепловые потери в бесканальных подземных трубопроводах тепловой сети / В.С. Слепченко, А.Н. Рондель, Н.И. Шаповалов // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 6. – С. 18 – 23.
18. **Кириллов Ю.И.** Состояние тепловой изоляции на электростанциях ОАО РАО «ЕЭС России» / Ю.И. Кириллов, М.А. Мотлохов, А.М. Бычков [и др.] // Энергетик. – 2005. – № 11. – С. 2 – 5.
19. **Цигина, А. А.** Перспективы развития теплоснабжения в России / А. А. Цигина // Инфраструктурные отрасли экономики: проблемы и перспективы развития. – 2016. – № 14. – С. 78-82.

20. Теплоэнергетика и централизованное теплоснабжение России в 2014-2018 годах [Электронный ресурс]/ Информационно-аналитический доклад: ФГБУ «РЭА» Минэнерго России, 2020. Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/17737>
21. Доклад о состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в РФ в 2019 году [Электронный ресурс]/ Информационно-аналитический доклад: ФГБУ «РЭА» Минэнерго России, 2020. Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/20641>
22. Распоряжение от 19 апреля 2018 года N 703-р [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://government.ru/docs/32368/>
23. **Голяк, С. А.** Оценка температурных полей подземных теплопроводов с целью утилизации теряемой теплоты [Электронный ресурс]/ С. А. Голяк, И. Е. Сикерин // Материалы Международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции»: МГСУ. – 2005. Режим доступа: <http://www.energsovet.ru/stat396.html>
24. **Соколов, Е. Я.** Теплофикация и тепловые сети: учеб. для вузов / Е. Я. Соколов. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 472 с.
25. ТР 129-02 Технические рекомендации по строительству сетей тепловодоснабжения из стальных труб со скорлупкой пенополиуретановой изоляцией в подземных канальных и наземных прокладках. – М.: НИИМосстрой. – 2021. – 28 с.
26. ГОСТ 30732-2020 Межгосударственный стандарт. Трубы и фасонные изделия стальные с тепловой изоляцией из пенополиуретана с защитной оболочкой. Технические условия. – М.: Стандартинформ. – 2020. – 70 с.
27. СП 131.13330.2020 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. – М.: ФАУ ФЦС, 2020. – 150 с.
28. СП 124.13330.2012 Тепловые сети. Актуализированная редакция СНиП 41-02-2003. – М.: ФАУ ФЦС, 2012. – 78 с.
29. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – М.: ФАУ ФЦС, 2012. – 96 с.
30. СП 61.13330.2012 Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 41-03-2003. – М.: ФАУ ФЦС, 2012. – 56 с.

31. **Басс, М.С.** Выбор оптимального теплоизоляционного материала для тепловых сетей / М.С. Басс, А.В. Варавка // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2012. – № 1. – С. 269–272.

32. **Авдеев, С. Н.** Исследование эффективности теплоизоляционной конструкции в непроходном канале / С. Н. Авдеев, М. В. Гаврилов, В. Н. Дорофеев, М. Н. Медведев // Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения : Материалы X Национальной конференции с международным участием, Саратов, 23–24 апреля 2020 года. – Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 2020. – С. 22-35.

33. **Исмакова, А. М.** Повышение эффективности тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей путём применения оптимального вида теплоизоляционного материала / А. М. Исмакова, А. С. Гаврилов // Инновации. Наука. Образование. – 2021. – № 45. – С. 387-391.

34. **Фазлиев, Р. А.** Анализ тепловых потерь через теплоизоляционные конструкции и методы повышения энергоэффективности путем их снижения / Р. А. Фазлиев, С. О. Гапоненко // Тинчуринские чтения : Материалы XIV Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 23 апреля – 26 2019 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2019. – С. 158-162.

35. **Закомолдина, Е. С.** Влияние типа теплоизоляции и способа прокладки тепловых сетей на эффективность тепловых сетей / Е. С. Закомолдина, Л. В. Плотникова // Наука современности: проблемы и решения : Сборник научных статей. – Москва : Издательство "Перо", 2019. – С. 102-105.

36. **Салахова, А. Ф.** Энергетическая эффективность замены тепловых сетей на предварительно изолированные ППУ-трубопроводы / А. Ф. Салахова, В. А. Чернышова, Э. А. Ахметов // Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии : сборник статей XXI Международной научно-практической конференции, Пенза, 16–17 апреля 2019 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2019. – С. 129-131.

37. Труба в пенополимерминеральной изоляции (ППМ изоляция, ППМИ) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://himtrust.ru/company/articles/truba_v_penopolimermineralnoj_izoljacii_ppm_izoljacija_ppmi.

38. **Бухмиров, В. В.** Экспериментальное исследование тонкопленочных энергосберегающих покрытий на основе полых микросфер / В. В. Бухмиров, А. К. Гаськов // Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности : сборник докладов II Межд. научно-практической конференции. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2018. – С. 37-40.

39. **Скрипченко, А. С.** Повышение эффективности работы тепловых сетей / А. С. Скрипченко // Инновационная наука. – 2016. – № 5-2(17). – С. 166-169.

40. Теплоизолирующее покрытие горизонтально расположенного трубопровода: пат. 123490 Рос. Федерация: МПК F16L 59/00 (2006.01) / Иванов Д.И., Видин Ю.В., Евтихов Ж.Л., Федюкович А.К.; Заявитель и патентообладатель Иванов Д.И.; заявл. 2012122129/28; опубл. 27.12.2012, Бюл. № 36.

41. **Фазлиев, Р. А.** Анализ тепловых потерь через теплоизоляционные конструкции и методы повышения энергоэффективности путем применения отражающей теплоизоляции / Р. А. Фазлиев, С. О. Гапоненко // Наука молодых - будущее России : сборник научных статей 5-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых : в 4 т., Курск, 10–11 декабря 2020 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. – С. 336-341.

42. Контактная конструкция теплопроводов двухтрубной тепловой сети: пат. 124369 Рос. Федерация: МПК F24D 11/00 / Моисеев В. И., Тувальбаев Б. Г.; заявитель и патентообладатель Моисеев В. И., Тувальбаев Б. Г.: заявл. 2012127735/12; опубл. 20.01.2013, Бюл. № 2

43. Теплосеть: пат. 102088 Рос. Федерация: МПК F 24 F 7/06 / Кобелев Н.С., Емельянов С.Г., Алябьева Т.В [и др.]; заявитель и патентообладатель Юго-Зап. гос. унт.; заявл. 2008138479/06; опубл. 25.04.2012. – Бюл. №7.

44. **Марченко, А.В.** Разработка технологий использования котлоагрегатов ТЭЦ и их дутьевых вентиляторов для транспорта и утилизации вентиляционных выбросов промышленных предприятий и автомагистралей: дис...канд. техн. наук:

05.14.14: защищена 17.10.2008 / Марченко Александра Витальевна. – Иваново, 2008. – 175 с.

45. **Плыкин, В.Д.** Возобновляемые источники энергии: учебно-методическое пособие / В.Д. Плыкин. – Ижевск: Издательство «Удмуртский университет», 2012. – 60с.

46. **Твайделл, Дж.** Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайделл, А. Уэйр – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.

47. **Да Роза, А.** Возобновляемые источники энергии. Физико-химические основы: учебное пособие / А. да Роза; пер. с англ. под редакцией С.П. Малышенко, О.С. Попеля. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект»; М.: Издательский дом МЭИ; 2010. – 704 с: ил.

48. Использование подземной теплоты. Основные положения, разрешения и вопросы защиты окружающей среды / Правила VDI 4640 Blatt 1, 1998. Режим доступа: <https://www.vdi.de>

49. **Калоша, В.К.** Математическая обработка результатов эксперимента / В.К. Калоша, С.И., Лобко, Т.С. Чикова. – Мн.: Выш.Школа, 1982. – 103 с., ил

50. **Мурашкина, Т.И.** Техника физического эксперимента и метрология: учеб.пособие / Т.И. Мурашкина. – СПб.: Политехника, 2015. – 138 с.: ил.

51. **Чубинский, А.Н.** Методы и средства научных исследований. Методы планирования обработки результатов экспериментов / А.Н. Чубинский, Д.С. Русаков, И.М. Батырева, Г.С. Варанкина. – СПб.: СПбГЛТУ, 2018. – 104 с.

52. **Новицкий П.В.,** Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоиздат, 1991. – 304 с.

53. **Чигарев, А.В.** ANSYS для инженеров. Справочное пособие / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – Москва: Машиностроение, 2004. – 512 с.

54. **Кондранин, Т.В.** Применение пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидко-сти и газа: Учебное пособие / Т.В. Кондранин, Б.К.Ткаченко, М.В. Березникова, А.В. Евдокимов, А.П. Зуев — М.: МФТИ, 2005. — 104 с.

55. COMSOL Inc: официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.comsol.ru>.

56. **Анкудинов В. Е.**, Компьютерное моделирование процессов переноса и деформаций в сплошных средах: Учебное пособие / Д. Д. Афлятунова, М. Д. Кривилев, Г. А. Гордеев. – Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2014. — 108 с.
57. **Половников, В.Ю.** Математическое моделирование тепловых режимов систем транспортировки тепла / В.Ю. Половников // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2012. – №2. – с. 118-122
58. **Кузнецов, Г.В.** Численный анализ влияния радиационного теплообмена на тепловые режимы и тепловые потери теплопроводов / Кузнецов Г.В., Половников В.Ю.// Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2011. – №5-6. – с. 12-20
59. **Тарасевич, Е.И.** Численное моделирование теплообмена для двухтрубных тепловых сетей при подземной канальной и бесканальной прокладке / Е.И. Тарасевич // Фундаментальные исследования. – 2015. – №2-22. – с.4880-4885
60. **Селезнев, В.Е.** Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов: методы, модели и алгоритмы / В.Е. Селезнев, В.В. Алешин, С.Н. Прялов; под ред. В.Е. Селезнева. – М.: МАКС Пресс, 2007. – 695 с.
61. **Лыков, А.В.** Теплообмен: справочник / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
62. **Патанкар, С.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар; пер. с англ. В.Д. Виленского. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
63. **Полежаев, В.И.** Математическое моделирование конвективного тепло-массообмена на основе уравнений Навье–Стокса / В.И. Полежаев, А.В. Бунэ, Н.А. Вerezуб и др. – М.: Наука, 1987. – 272 с.
64. **Карауш, С. А.** Сопряженный теплообмен при ламинарном течении жидкости в подземных каналах /С.А. Карауш, А.В. Фурман// Известия ВУЗов. Энергетика. – 1979. – № 9. – С. 60–66.
65. **Ландау, Л.Д.** Теоретическая физика: учебное пособие / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 3-е изд., перераб. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
66. **Джалурия Й.** Естественная конвекция: Тепло и массообмен / Й. Джалурия. – М.: Мир, 1983. – 400с.

67. **Полежаев, В.И.** Исследование естественной конвекции жидкостей и газов при нормальной и пониженной гравитации Диссертация, представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук Москва, 1972 г.
68. **Гебхард, Б.** Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен/ Й. Джалурия, Р. Махаджан, Б. Саммакия. – М.: Мир, 1991. – Т. 2. – 528 с.
69. **Рубцов, Н.А.** Теплообмен излучением в сплошных средах / Н.А. Рубцов. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1984. – 278 с.
70. **Зигерль, Р.** Теплообмен излучением: пер. с англ. / Р. Зигерль, Дж. Хауэлл; под ред. Б. А. Хрусталева. – М.: Мир, 1975. – 934 с.
71. **Адрианов, В.Н.** Основы радиационного и сложного теплообмена / В.Н. Адрианов. – М.: Энергия, 1972. – 464 с.
72. COMSOL Inc: официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.comsol.ru>.
73. **Буркова Е. Н.** Система автоматизированных расчетов Comsol: учеб. пособие / Е. Н. Буркова, А. Н. Кондрашов, К. А. Рыбкин; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Электрон. дан. – Пермь, 2019. –133 с.
74. Физические величины: Справочник / А. П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.]; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1231 с.
75. Излучательные свойства твердых материалов. Справочник / под ред. А.Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974. – 472 с.
76. **Бухмиров, В.В.** Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен» / В.В. Бухмиров, Д.В. Ракутина, Ю.С. Солнышкова. – Иваново, ИГЭУ, 2009. – 104 с.
77. **Волков, М.М.** Справочник работника газовой промышленности / М.М. Волков, А.Л. Михеев, К.А. Конев М. – Москва, 1988. – 144с.
78. СП 41-103-2000 Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. – М.: ФГУП ЦПП, 2000. – 47 с.
79. **Бухмиров В.В.** Тепломассообмен: учеб. пособие / В.В. Бухмиров. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2014. – 360 с.

80. **Бухмиров, В.В.** Теоретические основы теплотехники. Основы теплообмена / В.В. Бухмиров; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2011. – 68 с.

81. **Бухмиров, В.В.** Тепловой и гидравлический расчет рекуперативного теплообменного аппарата / В.В. Бухмиров, Д.В. Ракутина, М.В. Родионова, А.К. Гасков; ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2021. – 164 с.

82. **Григорьев В.А., Крохин Ю.И.** Тепло- и массообменные аппараты криогенной техники: Учебное пособие для вузов/ В.А. Григорьев, Ю.И. Крохин.– М.: Энергоиздат, 1982. –312 с.,ил.

83. **Янговский, Е. И.** Промышленные тепловые насосы / Е. И. Янговский, Л. А. Левин. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

84. **Соколов Е.Я.** Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения / Соколов, Е.Я.; Бродянский, В.М.; Изд-во: М.: Энергия, 1968 г.

85. DEDIETRICH: официальный сайт производителя тепловых насосов и холодильного оборудования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dedietrichotoplenie.ru/>

86. WATERKOTTE: официальный сайт производителя тепловых насосов и холодильного оборудования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://waterkotte.nt-rt.ru/>

87. EMICON: официальный сайт производителя тепловых насосов и холодильного оборудования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.emicon.com.ru

88. **Дячек, П.И.** Холодильные машины и установки: Учеб. Пособие / П.И. Дячек. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 424 с.

89. **Захаров, В.М.** Холодильные машины и установки : учебное пособие / В. М. Захаров, Н. Н. Смирнов ; Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГБОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина"Иваново, 2014. – 304 с.

90. **Архаров А.М.** Криогенные системы: основы проектирования аппаратов, установок и систем. – М.: Машиностроение, 1999. – 720 с.

91. **Ставровский, Е.С** Оценка экономической эффективности капиталовложений в энергетические объекты / Е.С. Ставровский, С.Н. Ярунин. Методические указания, 1997. – 15 с.

92. Ставровский, Е.С. Оценка привлекательности инвестиционных проектов / Е.С. Ставровский, И.Г. Кукукина. Иваново, 1997. – 108 с.

93. Постановление Департамента энергетики и тарифов Ивановской области № 57-т/20 от 17.12.2021 О корректировке долгосрочных тарифов на тепловую энергию, теплоноситель на 2022 - 2023 годы для ПАО "Т Плюс" (на территории Ивановской области).

94. Постановление Департамента энергетики и тарифов Ивановской области № 57-э/2 от 17 декабря 2021 г. О тарифах на электрическую энергию для населения и приравненных к нему категорий потребителей по Ивановской области на 2022 год.

95. RU (11) 139 798 (13) U1 Патент на полезную модель Захаров В.М. МАГИСТРАЛЬ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ, 2014

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

96. **Банникова, С.А.** Математическое моделирование теплопереноса в непроходных каналах тепловых сетей / С.А. Банникова // Вестник ИГЭУ. – 2022. – №1. – С. 12–21.

97. **Банникова, С.А.** Экспериментальное определение тепловых потерь сети теплоснабжения для их использования в устройстве утилизации / С.А. Банникова, В.М. Захаров, М.В. Козлова // Вестник ИГЭУ. – 2019. – №1. – С. 5–11.

Патенты и авторские свидетельства

98. Устройство для утилизации тепловых потерь теплотрасс: пат. 88361 Рос. Федерация: МПК E02D 1/00 (2006.01) / Банников А.В., **Банникова С.А.**; заявитель и патентообладатель Ивановский гос. энергетич. ун-т. – № 2009118787/22: заявл. 18.05.2009; опубл. 10.11.2009, Бюл. №31.

99. Устройство по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы: пат. 94988 Рос. Федерация: МПК E02D 1/00 (2006.01) / Захаров В.М., **Банникова С.А.**;

заявитель и патентообладатель Ивановский гос. энергетич. ун-т. – № 2010105334/22: заявл. 15.02.2010: опубл. 10.06.2010, Бюл. № 16.

100. Устройство по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы: пат. 103175 Рос. Федерация: МПК F24D 11/02 (2006.01) / Захаров В.М., Смирнов Н.Н., **Банникова С.А.**; заявитель и патентообладатель Ивановский гос. энергетич. ун-т. – № 2010145682/03: заявл. 09.11.2010: опубл. 27.03.2011 Бюл. № 9

101. Устройство для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы: пат. 116607 Рос. Федерация: МПК F24D 11/02 (2006.01) / Захаров В.М., **Банников А.В.**, Банникова С.А., Лапатеев Д.А.; заявитель и патентообладатель Ивановский гос. энергетич. ун-т. – № 2011151847/12: заявл. 19.12.2011: опубл. 27.05.2012 Бюл. № 15.

102. Утилизация тепловых потерь в канале теплотрассы: свидетельство на программу для ЭВМ 2018616398 Рос. Федерация / **Банникова С.А.**, Козлова М.В.; заявитель и патентообладатель Ивановский гос. энергетич. ун-т. – № 2018613284: заявл. 05.04.2018: опубл. 01.06.2018

Тезисы и полные тексты докладов конференций

103. **Банникова, С.А.** Повышение энергетической эффективности сетей теплоснабжения / С.А. Банникова, В.М. Захаров // Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики: I Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием (г. Ульяновск, 6 - 7 октября 2021): Сб. трудов конф. [Электронный ресурс]. – Ульяновск: УлГТУ. – 2021. – С.135 – 138.

104. **Банникова, С.А.** Анализ результатов моделирования процессов теплообмена в тепловой сети с применением теплоотражающих экранов / С.А. Банникова, В.М. Захаров // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: (XXI Бенардосовские чтения): материалы Междунар. науч.-технич. конф. – Иваново: ИГЭУ. – 2021. – Т.2. – С. 341–344.

105. **Банникова, С.А.** Математическая модель двухтрубной водяной тепловой сети с подземной прокладкой в непроходных каналах / С.А. Банникова, В.М. Захаров // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения): Сб. науч. трудов по материалам Междунар. (XX Всероссийской) науч.-технич. конф. – Иваново: ИГЭУ. – 2019. – Т.2. – С. 353–355.

106. Козлова, М.В. Оценка потенциала энергосбережения в сетях системы теплоснабжения г. Иваново / М.В. Козлова, А.В. Банников, **С.А. Банникова** // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. 2018: XXIV Междунар. науч.-технич. конф. студентов и аспирантов: тезисы докладов. – Москва, 2018. – С.658 – 658.

107. **Банникова, С.А.** Производство тепловой энергии при ее транспортировке в системах централизованного теплоснабжения/ С.А. Банникова// Сб. трудов ведущих ученых ИГЭУ. – Иваново: ИГЭУ. – 2018. – С. 3–7.

108. Козлова, М.В. К определению условий работы устройства для утилизации потерь в канале теплотрассы / М.В. Козлова, **С.А. Банникова** // XIII молодежная науч. конф. "Тинчуринские чтения": тезисы докладов. – Казань: Казанский гос. энергетич. ун-т. – 2018. – Т.2. – С.323 – 326.

109. **Банникова, С.А.** Утилизация тепловых потерь в тепловых сетях системы теплоснабжения промышленных предприятий / С.А. Банникова // Энергосбережение - теория и практика: Труды Девятой Междунар. школы-семинара молодых ученых и специалистов. – Москва: Издательский дом МЭИ. – 2018. – С.159 – 162.

110. **Банникова, С.А.** Экспериментальная установка по исследованию устройства для утилизации потерь в канале теплотрассы / С.А. Банникова, В.М. Захаров // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тезисы докладов. – Москва: Издательский дом МЭИ. – 2017. – Т.2. – С.303 – 303.

111. **Банникова, С.А.** Экспериментальное исследование устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы / С.А. Банникова, В.М. Захаров // Материалы междунар. науч.-технич. конф. "Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии" (XIX Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ. – 2017. – Т.2. – С.328 – 331.

112. **Банникова, С.А.** Построение математической модели работы устройства для утилизации потерь в канале теплотрассы в программной среде COMSOL Multiphysics 4.3 b / С.А. Банникова, В.М. Захаров // Энергия инновации - 2014: материалы отчетной конф. молодых ученых ИГЭУ: материалы конф. – Иваново: ИГЭУ. – 2015. – С.3 – 7.

113. **Банникова, С.А.** Особенности математического моделирования работы устройства для утилизации потерь в канале теплотрассы / С.А. Банникова, В.М.

Захаров // Междунар. науч.-технич. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XVIII Бенардосовские чтения)»: материалы конф. – Иваново: ИГЭУ. – 2015. – Т.2. – С.121 – 125.

114. **Банникова, С.А.** Экономическая эффективность реконструкции тепловых сетей на основе трансформатора теплоты / С.В. Банникова, В.М. Захаров // Энергия инновации – 2013. Внутривузовская отчетная конф. молодых ученых ИГЭУ: материалы конф. – Иваново: ИГЭУ. – 2014. – С.3 – 6.

115. **Банникова, С.А.** Тепловое аккумулирование и утилизация тепловых потерь в канале теплотрассы / С.В. Банникова // Материалы Междун. научно-техническая конференция "Состояние и перспективы развития электротехнологии" (XVII Бенардосовские чтения). – Иваново: ООО "ПресСто". – 2013. – Т.2. – С.149 – 150.

116. **Банникова, С.А.** Математическое моделирование процессов переноса тепловой энергии в системе "коллектор - тепловая сеть" / С.А. Банникова, В.М. Захаров // Энергия инновации-2012. Внутривузовская отчетная конф. молодых ученых ИГЭУ: Материалы конф. – Иваново: УИУНЛ ИГЭУ. – 2013. – т.1. – С.3 – 7.

117. **Банникова, С.А.** Особенности работы устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы / С.А. Банникова // Энергия-2012. Седьмая региональная научно-техническая конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: Материалы конф. – Иваново: ИГЭУ. – 2012. – Т.1. – С.120 – 123.

118. **Банникова, С.А.** Оценка энергетического потенциала неизбежных тепловых потерь в сетях системы теплоснабжения при канальной прокладке / Банникова С.А., Захаров В.М. // Пятая региональная науч.-технич. конф. студ. и асп. «Энергия-2010»: Материалы конф. В 6 т. Т.1. – Иваново, 2010. – С. 127–128.

119. **Банникова, С.А.** Оценка эффективности устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы/ Банникова С.А., Ставровский Е.С.// Междунар. науч.-технич. конф. «XVI Бенардосовские чтения»: Материалы конф. – Иваново, 2011. – С.155-158.

120. **Банникова, С.А.** Проблемы математического моделирования процессов теплообмена в системе «коллектор – тепловая сеть»/ Банникова С.А., Захаров В.М.// Восьмая междунар. науч.-технич. конф. студентов и аспирантов «Энергия 2013»: Материалы конф. – Иваново: ИГЭУ, 2013.– с. 151–155.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

**Документы, подтверждающие
практическую реализацию результатов работы**



«Ивановская Тепловая Электростанция»

Юридический адрес: Россия, 153510,
Ивановская область, Ивановский р-н,
г. Кохма, ул. Ивановская, д. 18
Фактический адрес: 153511, Ивановская
обл., г.о. Кохма, ул. Ивановская, д.18,
Литер К20, 3 этаж

ИНН 3702070999, ОГРН 371101001, БИК 044526600, ПАО «ИФИБАНК» г. Москва

р/с: 40702810100560000207, к/с: 30101810300000000600, директор – Артёмьев Николай Владимирович, тел./факс: (4932)93-88-43, e-mail: ivtes@list.ru



Акт об использовании результатов диссертационной работы

Настоящий акт составлен о том, что на ООО «Ивановская тепловая электростанция» приняты к использованию следующие результаты диссертационной работы Банниковой Светланы Андреевны на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика»:

- 1) общая характеристика технического решения по повышению эффективности систем централизованного теплоснабжения за счет утилизации тепловых потерь в сетях теплоснабжения;
- 2) расчетные зависимости, позволяющие определить технические параметры устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы и определять температуру теплоносителя в коллекторе устройства в зависимости от температуры наружного воздуха;
- 3) результаты исследований условий применения предлагаемого технического решения.

За счет реализации технического решения предполагается сократить транспортные потери в сетях теплоснабжения за счет применения описанного в диссертационной работе устройства и увеличить тепловую нагрузку на источник за счет бесконтактного подсоединения абонентов, сократив тем самым затраты на реконструкцию тепловых сетей и наладку режимов их эксплуатации.

Главный инженер ООО «ИТЭС»

Д.М. Иневаткин

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
ИГЭУ

Гусенков А.В.

«07» апреля 2022 г.

Акт

внедрения в учебный процесс ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет» результатов диссертационной работы Банниковой Светланы Андреевны

В учебном процессе при чтении лекций, проведении практических и лабораторных занятий по дисциплинам «Энергосбережение в теплотехнологии», «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», «Теплоснабжение промышленного предприятия» и при выполнении научно-исследовательских работ студентами, обучающимися по направлению подготовки «Теплоэнергетика и теплотехника» (13.03.01 и 13.04.01) используются результаты научных исследований Банниковой Светланы Андреевны, включенные в состав ее диссертационной работы: способ повышения эффективности систем теплоснабжения, основанный на применении устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы; математическая модель совместной работы тепловой сети и устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы; результаты лабораторных исследований работы теплоотражающих экранов и факторов, влияющих на их эффективность.

Декан инженерно-физического
факультета ИГЭУ
к.ф.-м.н., доцент

Кабанов О.А.

Заведующий кафедрой
«Энергетика теплотехнологий
и газоснабжение» ИГЭУ
к.т.н., доцент

Колибаба О.Б.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Объекты интеллектуальной собственности

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 88361

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ
ТЕПЛОТРАСС**

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
"Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина" (ИГЭУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2009118787

Приоритет полезной модели 18 мая 2009 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 10 ноября 2009 г.

Срок действия патента истекает 18 мая 2019 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам



Б.И. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 94988

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ
В КАНАЛЕ ТЕПЛОТРАССЫ**

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № **2010105334**

Приоритет полезной модели **15 февраля 2010 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **10 июня 2010 г.**

Срок действия патента истекает **15 февраля 2020 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 103175**УСТРОЙСТВО ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ
В КАНАЛЕ ТЕПЛОТРАССЫ**

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № **2010145682**

Приоритет полезной модели **09 ноября 2010 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **27 марта 2011 г.**

Срок действия патента истекает **09 ноября 2020 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 116607

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ
В КАНАЛЕ ТЕПЛОТРАССЫ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ) (RU)*

Автор(ы): *с.м. на обороте*

Заявка № 2011151847

Приоритет полезной модели 19 декабря 2011 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 27 мая 2012 г.

Срок действия патента истекает 19 декабря 2021 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018616398

Утилизация тепловых потерь в канале теплотрассы

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ) (RU)*

Авторы: *Банникова Светлана Андреевна (RU), Козлова Мария Владимировна (RU)*

Заявка № 2018613284

Дата поступления 05 апреля 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 01 июня 2018 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев