

---

*На правах рукописи*



**БАНИКОВА Светлана Андреевна**

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

Специальность: 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

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

Иваново 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук, доцент **Захаров Вадим Михайлович**

**Официальные оппоненты:**

**Ваньков Юрий Витальевич**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики и систем теплоснабжения

**Кулагин Станислав Михайлович**, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет», доцент кафедры строительства и инженерных систем

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", г. Москва

Защита состоится «24» сентября 2022 г. в 9:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен:

[http://ispu.ru/files/Dissertaciya\\_Baninikova\\_S.A..pdf](http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Baninikova_S.A..pdf)

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ [www.ispu.ru](http://www.ispu.ru).

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2022г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.064.01



Ледуховский  
Григорий Васильевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 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 теплогазоснабжения 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. Однако, подобное решение с большой вероятностью вызовет увеличение тепловых потерь.

Анализ предлагаемых решений показывает, что до настоящего момента вопрос предельного сокращения, вплоть до исключения, тепловых потерь в сетях теплоснабжения не рассматривался.

**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 верификации 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 оценки экономической эффективности его применения.

**Соответствие паспорту специальности.** Работа соответствует паспорту специальности в части формулы специальности: «совершенствование промышленных теплоэнергетических систем..... разработка и создание нового теплотехнического оборудования»; «поиск структур и принципов действия теплотехнического оборудования, которые обеспечивают сбережение энергетических ресурсов, уменьшение энергетических затрат на единицу продукции»; в части области исследования – пункту 1 «Разработка научных основ

сбережения энергетических ресурсов в промышленных теплоэнергетических устройствах и использующих тепло системах и установках»; пункту 4 «Разработка новых конструкций теплопередающих и теплоиспользующих установок, обладающих улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками».

**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 доминирующие 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 за счет 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 тепловых сетей различных конструкций; в создании экспериментальной установки, проведении натурного 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.); конференциях молодых ученых «Инновационные проекты молодых ученых» (2011-2019 гг.); конкурсе «Умник», проводимого в рамках V Ивановского инновационного конвента «Образование. Наука. Инновации» (Иваново, 2015); 9-ой Международной школе-семинаре 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.

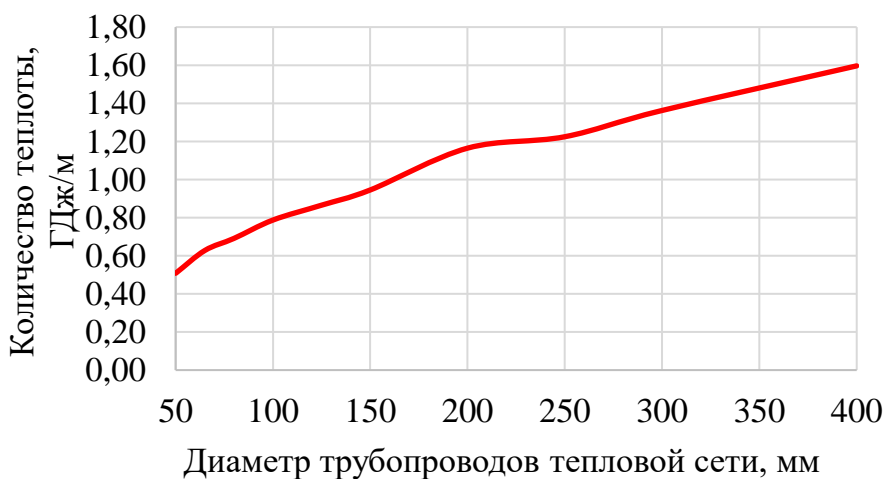
**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения по работе, списка использованных источников из 120 наименований. Текст диссертации изложен на 149 стр. машинописного текста, содержит 56 рисунков, 19 таблиц и 2 приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, поставлена цель исследования, сформулированы решаемые задачи, отражены научная новизна, практическая и теоретическая значимость полученных результатов, изложены основные положения, защищаемые автором.

**В первой главе** проведен анализ технических решений по повышению энергетической эффективности систем теплоснабжения промышленных предприятий. Определен потенциал энергосбережения в сетях теплоснабжения в нормальных условиях их работы. Определены сезонные потери теплоты с 1 метра тепловой сети в зависимости от диаметра трубопроводов (рисунок 1).

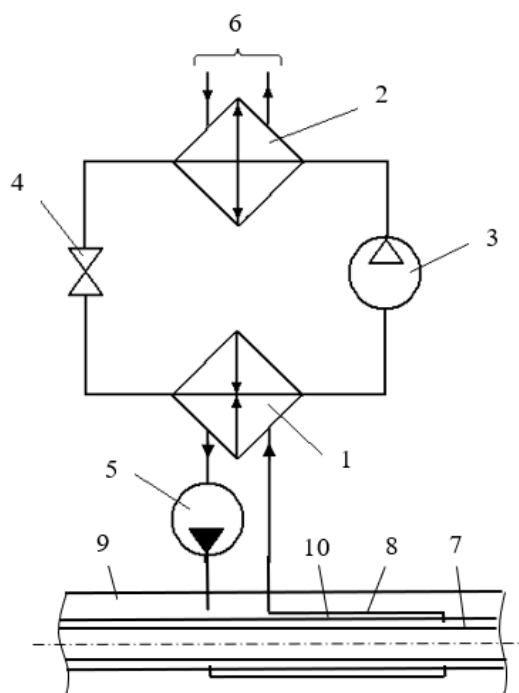
Рисунок 1. Удельные сезонные потери теплоты в зависимости от диаметра трубопроводов тепловой сети



Разработаны номограммы по определению линейных тепловых потерь в тепловых сетях различных диаметров и температурных графиков работы системы теплоснабжения. Классифицированы и описаны основные технические решения, направленные на сокращение тепловых потерь в тепловых сетях. Приводится описание предлагаемого оригинального устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы, принципиальная схема которого показана на рисунке 2.

Устройство по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы, исследование работы которого проведено в рамках настоящей диссертации, 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 тепловых потерь в сетях теплоснабжения. При этом выработанная тепловая энергия может быть использована как для нужд горячего водоснабжения или отопления рядом расположенных зданий и сооружений в течении всего года, так и для теплоснабжения различных инженерных систем промышленного и городского хозяйства (например, «теплые» тротуары и дороги, снегоплавильные установки и т.п.).



**Рисунок 2. 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

Устройство по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы состоит из теплоотражающего экрана, коллектора и сопряженного с ним парокompрессионного трансформатора тепла. 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 трансформатора тепла, который в свою очередь, позволяет повысить потенциал воспринятой тепловой энергии до требуемых параметров.

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. В заключительной части главы сформулированы цель и задачи исследования.

**Во второй главе** изложены основные положения, связанные с проведением экспериментального исследования процессов теплообмена в тепловой сети с применением теплоотражающих экранов и без них. рассматриваются вопросы разработки и создания экспериментальной установки для проведения этого исследования.

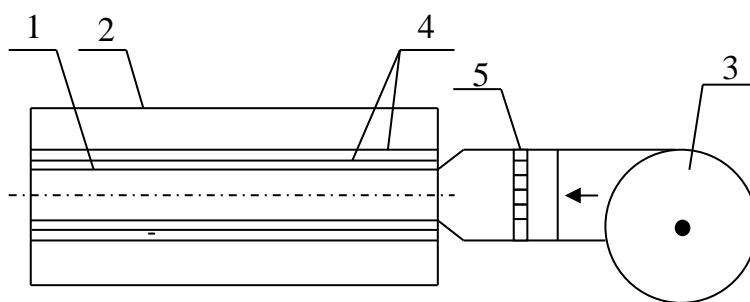
С целью оценки эффективности теплоотражающих экранов в тепловой сети, а также получения значений плотности теплового потока на наружной поверхности канала теплотрассы, необходимых для верификации математических моделей процессов теплообмена в тепловой сети, была создана экспериментальная установка. Поскольку в работе значимым является исследование влияния теплоотражающих экранов на процесс теплообмена, экспериментальное исследование было решено разбить на три этапа, соответствующих трем различным конфигурациям экспериментальной установки, а именно:

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

Принципиальная схема экспериментальной установки №3 показана на рисунке 3.

**Рисунок 3. Принципиальная схема экспериментальной установки с теплоотражающими экранами:**

1 – трубопровод; 2 – стенки канала; 3 – вентилятор с теплоэлектронагревателем; 4 – теплоотражающий экран; 5 – хонейкомб



Базовая конструкция экспериментальной установки включает в себя полимерную цилиндрическую гладкостенную трубу, канал в форме параллелепипеда прямоугольного сечения, выполненный из оргстекла и вентилятор с теплоэлектронагревателем, выполняющий роль источника тепловой энергии. На входе в трубу (трубопровод) со стороны источника тепловой энергии установлена спрямляющая решетка (хонейкомб), предназначенная для выравнивания поля скоростей по сечению трубопровода. 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.

Относительно решаемой задачи теплофизические характеристики трубопровода и подвижного теплоносителя в нем не влияют на оценку эффективности работы теплоотражающего экрана. Принципиальным в эксперименте является соблюдение геометрического подобия установки и тепловой сети. Поэтому система «горячий воздух – полимерная труба» эквивалентна системе «горячая вода – изолированный трубопровод водной тепловой сети».

В ходе эксперимента для трех различных конфигураций установки был определен тепловой поток на наружной поверхности канала в 15 точках, по 5 точек на верхней, боковой и нижней поверхности канала соответственно. Места размещения датчиков измерительных приборов показаны на рисунке 4. Кроме того, контролировались температура воздуха внутри трубопровода и его скорость. Измерение температуры производилось в начале и конце участка, при этом датчики температур располагались по оси трубы.

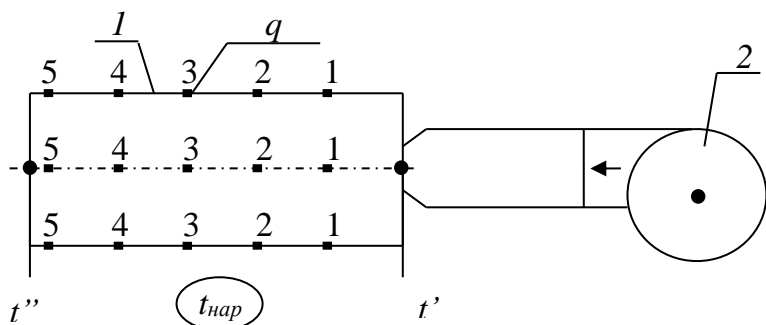


Рисунок 4. **Позиции датчиков измерительного прибора:**  
1 – канал; 2 – вентилятор с ТЭНом

Плотность теплового потока и температура в указанных точках измерялись прибором ИТП – МГ4.03 «ПОТОК», а скорость воздуха – анемометром в составе универсального измерительного прибора АТЕ-9538. В ходе эксперимента были получены данные, показанные в таблицах 1, 2 и 3.

Таблица 1. **Плотности теплового потока на наружной поверхности канала (экспериментальная установка №1)**

Сторона канала	Мин/ макс замер	Плотность теплового потока, Вт/м <sup>2</sup>				
		Позиция измерительного прибора				
		1	2	3	4	5
Верхняя	Мин. значение	193,8	192,6	187,1	181,6	175,7
	Макс. значение	205,0	198,2	197,0	187,9	182,2
Боковая	Мин. значение	103,1	99,0	94,1	90,5	81,0
	Макс. значение	110,8	103,6	105,1	99,8	85,0
Нижняя	Мин. значение	61,6	60,3	54,3	60,0	51,1
	Макс. значение	68,7	62,1	62,5	66,3	54,5

Таблица 2. Плотности теплового потока на наружной поверхности канала (экспериментальная установка №2)

Сторона канала	Мин/макс замер	Плотность теплового потока, Вт/м <sup>2</sup>				
		Позиция измерительного прибора				
		1	2	3	4	5
Верхняя	Мин. значение	93,8	93,4	90,5	85,7	84,3
	Макс. значение	99,2	99,5	98,4	90,0	89,0
Боковая	Мин. значение	43,0	42,6	42,1	44,2	43,5
	Макс. значение	49,9	47,9	47,6	46,7	48,5
Нижняя	Мин. значение	15,2	12,0	10,9	13,0	12,4
	Макс. значение	17,3	15,3	13,8	15,9	13,8

Таблица 3. Плотности теплового потока на наружной поверхности канала (экспериментальная установка №3)

Сторона канала	Мин/макс замер	Плотность теплового потока, Вт/м <sup>2</sup>				
		Позиция измерительного прибора				
		1	2	3	4	5
Верхняя	Мин. значение	63,7	62,1	60,2	58,8	58,0
	Макс. значение	68,5	66,7	65,8	63,3	62,4
Боковая	Мин. значение	30,0	27,1	26,1	25,8	25,0
	Макс. значение	34,1	32,4	28,4	29,7	33,4
Нижняя	Мин. значение	9,8	11,0	10,5	12,6	10,3
	Макс. значение	14,3	14,3	13,3	13,5	11,5

В ходе математической обработки экспериментальных данных были определены среднеарифметическое значение плотности теплового потока в каждой точке, абсолютная погрешность измерений, дисперсия, среднеквадратичное отклонение, границы доверительного интервала и относительная погрешность измерений. Относительная погрешность измерений в среднем составляет 5%.

Таким образом, полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о том, что при данных геометрических и теплофизических параметрах экспериментальной установки один экран способен сокращать тепловой поток на 55%, два экрана – на 70%. Экспериментальные данные использованы для верификации математической модели работы системы, включающей теплоотражающий экран и тепловую сеть.

**Третья глава** посвящена разработке математических моделей процессов теплообмена в тепловой сети без дополнительных элементов, тепловой сети с теплоотражающим экраном и тепловой сети с установленным устройством по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы.

Математическое моделирование процесса переноса теплоты в рассматриваемой системе основано на решении системы дифференциальных уравнений неразрывности,

движения и энергии, при составлении которых были приняты допущения, с учетом которых решаемая задача свелась к двумерной постановке.

Основные определяющие уравнения для нахождения полей скоростей и температур в процессе теплообмена в прямоугольной декартовой системе координат с учетом принятых допущений приведены ниже.

Поле скоростей в воздухе канала теплотрассы определяется решением системы уравнений движения (1, 2) и неразрывности (3).

$$\rho \cdot \left( u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right); \quad (1)$$

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

где  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – температура жидкости, °С;  $u$  – скорость движения жидкости, м/с;  $p$  – давление жидкости, Па;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения жидкости, 1/К;  $t_a$  – температура жидкости в равновесном состоянии, °С;  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости, Па·с.

$$\rho \cdot \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = 0. \quad (3)$$

Температурное поле в воздухе канала теплотрассы определяется решением уравнения энергии для жидкости

$$\rho \cdot C_p \cdot \left( u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (4)$$

где  $C_p$  – средняя удельная изобарная теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К).

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

$$\lambda_w \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = 0, \quad (5)$$

где  $\lambda_w$  – коэффициент теплопроводности твердого тела, Вт/(м·К).

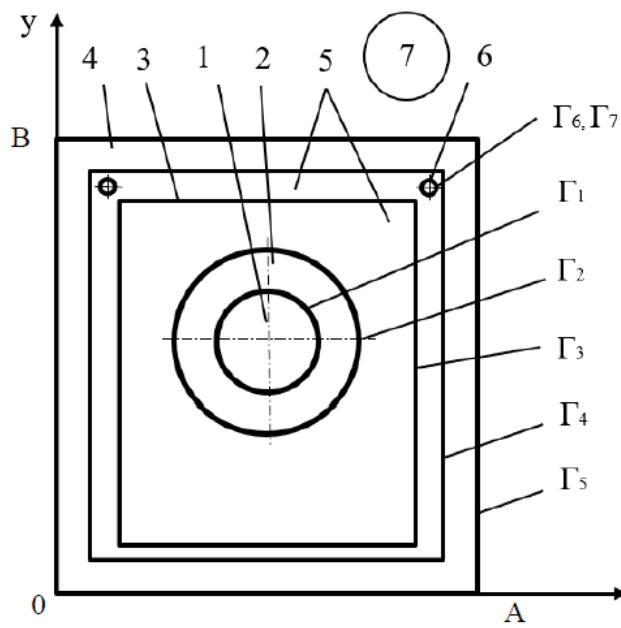
Математические модели процессов теплообмена в тепловой сети без дополнительных элементов, тепловой сети с теплоотражающим экраном и тепловой сети с установленным устройством по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы имеют в своей основе идентичные уравнения движения (1), (2), неразрывности (3) и переноса энергии (4), (5), 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.

Граничные условия для системы уравнений (1) – (5) на границах канала теплотрассы с координатами  $x = 0, y = 0$  и  $x = A, y = B$  показаны на рисунке 5. При этом  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_6, \Gamma_7$  являются граничными условиями 3-го рода на соответствующих поверхностях, а  $\Gamma_5$  – граничное условие 4-го рода, описывающее теплообмен на границе контакта внешней стороны канала с прилегающим грунтом.

**Рисунок 5. 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



Таким образом, первая математическая модель, описывающая теплообмен в тепловой сети без дополнительных элементов (M1), имеет границы  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_4, \Gamma_5$ . Вторая математическая модель, описывающая теплообмен в тепловой сети с теплоотражающим экраном (M2), имеет границы  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5$ . Третья математическая модель, описывающая теплообмен в тепловой сети при ее совместной работе с устройством по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы (M3), имеет границы  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5, \Gamma_6, \Gamma_7$ .

Для расчета теплообмена излучением использовались математические соотношения, определяющие эффективный и результирующий тепловые потоки излучением.

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.

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 поверхностях теплоотражающих экранов. При этом эффективный

и результирующий тепловые потоки излучением с учетом отсутствия внешних источников излучения и излучения окружающей среды рассчитываются по уравнениям:

$$J = (1 - \varepsilon_w) \cdot G_m + \varepsilon_w e_b(T), \quad (6)$$

$$-n \cdot q_{\text{рез}} = \varepsilon_w \cdot (G_m - e_b(T)), \quad (7)$$

где  $\varepsilon_w$  – степень черноты стенки;  $e_b(T)$  – плотность потока собственного излучения абсолютно черного тела, Вт/м<sup>2</sup>;  $G_m$  – падающее излучение с других поверхностей системы, Вт/м<sup>2</sup>.

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

Для верификации математических моделей и обоснованности принятых при их разработке допущений было выполнено сравнение результатов численного расчета с данными экспериментального исследования. Реализация математических моделей выполнена в программно-вычислительном комплексе Comsol Multiphysics, основанном на методе конечных элементов. Экспериментальные и расчетные значения тепловых потоков представлены на рисунке 6.



Рисунок 6. Экспериментальные и расчетные значения тепловых потоков

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

Далее на основе численных расчетов путем оценки влияния работы устройства на тепловой режим однотрубной и двухтрубной тепловой сети с канальной подземной прокладкой в непроходных каналах было определено максимально возможное тепловосприятие коллектора устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы.

На основании результатов математического моделирования процессов теплообмена в рассматриваемых системах (М1, М2, М3) были построены зависимости, отражающие влияние тепловосприятия 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, работающих по температурным графикам 150/70 и 95/70, при расчетной температуре наружного воздуха и температуре наружного воздуха начала и конца отопительного периода для условий г. Иваново. Пример такой зависимости показан на рисунке 7. Важно отметить, что тепловосприятие 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 площадь поверхности теплообмена самого коллектора является величиной искомой, на нахождение которой направлена изложенная в работе оригинальная инженерная методика.

Анализ работы теплоотражающего экрана в условиях тепловой сети без коллектора показал, 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. Коэффициент эффективности теплоотражающего экрана определяется уравнением

$$K_3 = 1 - (q_3 / q_{\text{норм}}), \quad (8)$$

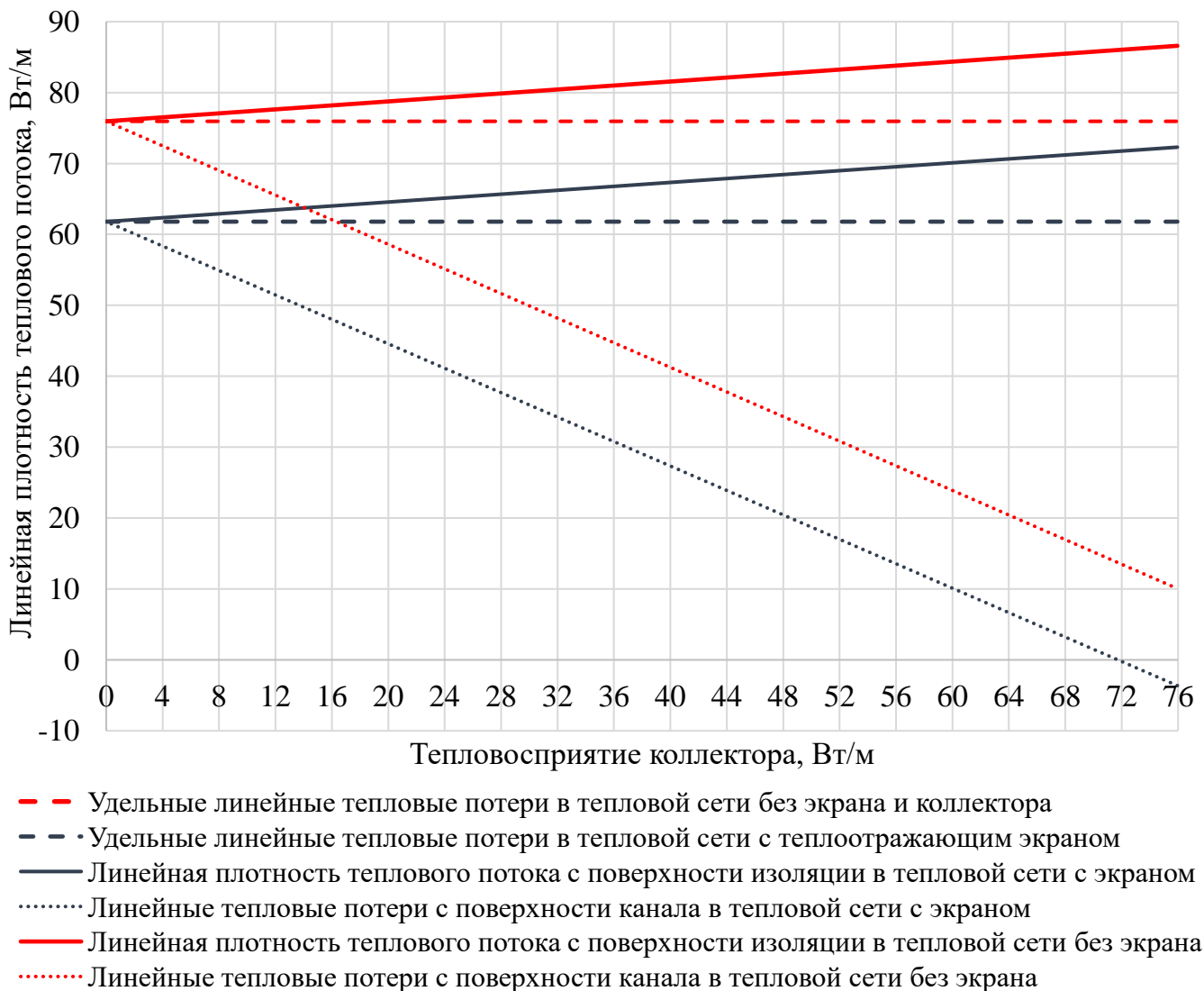
где  $q_3$  – плотность теплового потока в системе с теплоотражающим экраном, Вт/м<sup>2</sup>;

$q_{\text{норм}}$  – плотность теплового потока в системе без теплоотражающего экрана, Вт/м<sup>2</sup>.

Полученные результаты показывают, что отбор тепловой энергии коллектором из канала теплотрассы в размере первоначальных тепловых потерь в системе без экрана вызывает увеличение линейной плотности теплового потока с поверхности трубопроводов в среднем на 10-14%.

В случае совместной работы сети, экрана и коллектора 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, необходимая для достижения требуемого тепловосприятия 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.



**Рисунок 7. Влияние тепловосприятия коллектора на тепловой поток с поверхности изоляции и с поверхности канала в двухтрубной тепловой сети с температурным графиком работы 95/70 при расчетной температуре наружного воздуха**

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 отсутствием отбора энергии из окружающего грунта и находится в диапазоне от 93% до 95,2% от первоначальных тепловых потерь.

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



В заключительной части главы приведены результаты исследования, позволившие оценить влияние степени черноты экрана и коэффициента теплопроводности изоляции трубопровода на эффективность работы теплоотражающего экрана и сделать вывод о существенной значимости последнего.

**В четвертой главе** приведена разработанная инженерная методика расчета устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы, определены расчетные условия его работы. Предложена оригинальная универсальная номограмма качественного метода регулирования работы устройства. Представлена разработанная методика оценки экономической эффективности применения предлагаемого устройства и предложены варианты его практического применения.

## **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 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 выявлены 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 оценки экономической эффективности применения предлагаемого устройства.

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

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК**

1. **Банникова, С.А.** Математическое моделирование теплопереноса в непроходных каналах тепловых сетей / С.А. Банникова // Вестник ИГЭУ. – 2022. – №1. – С. 12–21.
2. **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**

3. 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.

4. 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.
5. 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
6. 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
7. 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

8. **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.
9. **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., 2-4 июня 2021 г., г. Иваново. – Иваново: ФГБОУВО "Ивановский гос. энергетич. ун-т им. В.И. Ленина". – 2021. – Т.2. – С. 341–344.
10. **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., 29-31 мая 2019 г., г. Иваново. – Иваново: ФГБОУВО "Ивановский гос. энергетич. ун-т им. В.И. Ленина". – 2019. – Т.2. – С. 353–355.
11. **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 (15–16 марта 2018 г., Москва): тезисы докладов. – Москва, 2018. – С.658 – 658.
12. **Банникова, С.А.** Производство тепловой энергии при ее транспортировке в системах централизованного теплоснабжения/ С.А. Банникова// Сб. трудов ведущих ученых ИГЭУ. – Иваново: ФГБОУВО "Ивановский гос. энергетич. ун-т им. В.И. Ленина". – 2018. – С. 3–7.
13. **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", 24-27 апреля 2018 г., г. Казань: тезисы докладов: в 3-х т. – Казань: Казанский гос. энергетич. ун-т. – 2018. – Т.2. – С.323 – 326.
14. **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, 5–12 октября 2018 г., г. Москва. – Москва: Издательский дом МЭИ. – 2018. – С.159 – 162.
15. **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.

16. **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)*, 31 мая - 2 июня 2017 г., Иваново. – Иваново: Ивановский гос. энергетич. ун-т имени В. И. Ленина. – 2017. – Т.2. – С.328 – 331.
17. **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*, 26-30 января 2015 г., г. Иваново: материалы конф. – Иваново: ФГБОУ ВПО "Ивановский гос. энергетич. ун-т им. В.И. Ленина". – 2015. – С.3 – 7.
18. **Банникова, С.А.** Особенности математического моделирования работы устройства для утилизации потерь в канале теплотрассы / С.А. Банникова, В.М. Захаров // *Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XVIII Бенардосовские чтения)*, Междунар. науч.-технич. конф., 27-29 мая 2015 г., г. Иваново: материалы конф. – Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский гос. энергетич. ун-т. – 2015. – Т.2. – С.121 – 125.
19. **Банникова, С.А.** Экономическая эффективность реконструкции тепловых сетей на основе трансформатора теплоты / С.В. Банникова, В.М. Захаров // *Энергия инновации - 2013. Материалы отчетной конф. молодых учёных ИГЭУ*, 27-31 января 2014 г., г. Иваново: материалы конф. – Иваново: ФГБОУ ВПО "Ивановский гос. энергетич. ун-т". – 2014. – С.3 – 6.
20. **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)*, 29-31 мая 2013 г., г. Иваново. – Иваново: ООО "ПресСто". – 2013. – Т.2. – С.149 – 150.
21. **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*, 24 января 2012 г., г. Иваново: Материалы конф. – Иваново: УИУНЛ ИГЭУ. – 2013. – т.1. – С.3 – 7.
22. **Банникова, С.А.** Особенности работы устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы / С.А. Банникова // *Энергия-2012. Седьмая региональная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (с междунар. участием)*, 17-19 апреля 2012 г., г. Иваново: Материалы конф. – Иваново: ФГБОУ ВПО "Ивановский гос. энергетич. ун-т им. В.И. Ленина". – 2012. – Т.1. – С.120 – 123.
23. **Банникова, С.А.** Оценка энергетического потенциала неизбежных тепловых потерь в сетях системы теплоснабжения при канальной прокладке / Банникова С.А., Захаров В.М. // *Материалы региональной науч.-технич. конф. студентов и аспирантов «Энергия 2010» / Ивановский гос. энергетич. ун-т – Иваново, 2010. – С. 129–130.*
24. **Банникова, С.А.** Оценка эффективности устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы/ Банникова С.А., Ставровский Е.С.//*Тезисы докладов Междунар. науч.-технич. конф. «XVI Бенардосовские чтения» / Ивановский гос. энергетич. ун-т. – Иваново, 2011. – С.155-158.*
25. **Банникова, С.А.** Проблемы математического моделирования процессов теплообмена в системе «коллектор – тепловая сеть»/ Банникова С.А., Захаров В.М.// *Материалы восьмой Междунар. науч.-технич. конф. студентов и аспирантов «Энергия 2013» / Ивановский гос. энергетич. ун-т. – Иваново, 2013.– с. 151–155.*

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

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание учёной  
степени кандидата технических наук

Подписано в печать 27.06.2022 г. Формат 60x84<sup>1/16</sup> Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ №123  
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет  
имени В.И. Ленина»153003, г. Иваново, ул. Рафаковская, 34. Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ