

УДК 621.578

**Светлана Андреевна Банникова**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, телефон +7 (4932) 26-99-75, e-mail: sabannikova\_pte@mail.ru

**Александр Васильевич Банников**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, телефон +7 (4932) 26-99-75, e-mail: avbannikov\_pte@mail.ru

**Мария Владимировна Козлова**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, телефон +7 (4932) 26-99-75, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

## Повышение энергетической эффективности работы тепловых сетей за счет утилизации тепловых потерь

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Эффективность транспортировки тепловой энергии, связанная с тепловыми потерями, в частности, через изоляцию трубопроводов, напрямую характеризует состояние тепловых сетей и систем централизованного теплоснабжения в целом. Повышение эффективности передачи тепловой энергии в современных системах теплоснабжения в контексте актуальных подходов к энергоэффективности является важнейшей задачей. Известные к настоящему моменту технические решения по снижению тепловых потерь через изоляцию трубопроводов снижают тепловые потери, но не предельно. Целью настоящего исследования является разработка технического решения, предназначенного для сокращения (вплоть до исключения) нормируемых линейных тепловых потерь в сетях теплоснабжения промышленных предприятий.

**Материалы и методы.** Исследования проведены с использованием методов экспериментального исследования процессов теплообмена, математического моделирования теплоэнергетического оборудования.

**Результаты.** Предложено устройство по утилизации тепловых потерь, предназначенное для сокращения (вплоть до исключения) нормируемых линейных тепловых потерь в сетях теплоснабжения промышленных предприятий. Определено допустимое тепловосприятие коллектора устройства, описан способ его регулирования. Разработана инженерная методика расчета предлагаемого устройства. Определена эффективность применения теплоотражающих экранов в тепловых сетях.

**Выводы.** За счет применения предложенного устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы решен ряд задач, обеспечивающих повышение эффективности систем теплоснабжения промышленных предприятий.

**Ключевые слова:** тепловые сети, энергоэффективность, тепловые потери, утилизация тепловых потерь

**Svetlana Andreevna Bannikova**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: sabannikova\_pte@mail.ru

**Aleksandr Vasilyevich Bannikov**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: avbannikov\_pte@mail.ru

**Mariya Vladimirovna Kozlova**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

## Improvement of energy efficiency of heating networks due to recycling heat losses

### Abstract

**Background.** The efficiency of thermal energy transfer, which is inevitably accompanied by heat losses through the insulation of pipelines, directly characterizes heating networks and centralized heat supply systems in general. The most important task in terms of current approaches to energy efficiency is to improve the efficiency of thermal energy transfer in modern heat supply systems. Currently known technical solutions to reduce heat losses through insulation of pipelines reduce heat losses, but not significantly. So, the purpose of this study is to develop a technical solution to reduce (even eliminate) standardized linear heat losses in heat supply networks of industrial enterprises.

**Materials and methods.** The authors have used methods of experimental research of heat transfer processes and mathematical modeling of heat and power equipment.

**Results.** A device for recycling heat losses is proposed. It is designed to reduce (even eliminate) normalized linear heat losses in heat supply networks of industrial enterprises. The permissible heat absorption of the device collector is determined, and a method for its regulation is described. An engineering method for calculation of the proposed device has been developed. The effectiveness of application of heat-reflecting screens in heating networks has been determined.

**Conclusions.** A number of problems have been solved to improve the efficiency of heat supply systems of industrial enterprises using a device for recycling heat losses in the heating system channel.

**Key words:** heating networks, energy efficiency, heat losses, recycling of heat losses

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2024.4.022-029

**Введение.** Повышение эффективности транспорта тепловой энергии в современных системах теплоснабжения в контексте актуальных подходов к энергоэффективности является важнейшей задачей. Эффективность транспортировки тепловой энергии, связанная с тепловыми потерями, в частности, через изоляцию трубопроводов, напрямую характеризует состояние тепловых сетей и систем централизованного теплоснабжения в целом. По мнению экспертов, с учетом факторов, приводящих к сверхнормативным потерям, тепловые потери в сетях теплоснабжения могут достигать 30 % [1, 2]. Данные обстоятельства свидетельствуют о существенном потенциале снижения объема потребления топливно-энергетических ресурсов в системах теплоснабжения и приводят к необходимости создания тепловых сетей с применением современных энергоэффективных технологий. Утвержденный к настоящему времени «Комплексный план мероприятий по повышению энергетической эффективности экономики Российской Федерации»<sup>1</sup> предусматривает реализацию мероприятий по снижению потерь энергетических ресурсов как при их потреблении, так и в ходе транспортировки и определяет динамику потерь в

тепловых сетях одним из целевых показателей плана. Согласно этому документу, к 2030 году планируется сократить тепловые потери до 7 %.

Анализ современных технических решений по повышению энергетической эффективности тепловых сетей позволил выделить три основных направления по сокращению и использованию тепловых потерь:

- использование современных и перспективных теплоизоляционных материалов, к которым можно отнести пенополиуретановую и пенополимерминеральную изоляцию, изоляцию из стекловолокна, термоизоляционную краску, теплоотражающую изоляцию, альфольевую изоляцию и др.;

- применение технических решений, направленных на изменение конструкции элементов тепловой сети, например: контактная конструкция теплопроводов двухтрубной тепловой сети, особенность которой заключается в объединении подающего и обратного трубопровода в один [3]; инновационная конструкция канальной тепловой сети, включающая блок из теплоизоляционных плит с каналами для труб [4];

- применение технических решений, связанных с использованием теряющейся в окружающую среду тепловой энергии [5, 6].

<sup>1</sup> Распоряжение от 19 апреля 2018 года № 703-п [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://government.ru/docs/32368/>

Большинство перечисленных решений, несомненно, позволяют снизить тепловые потери, но не предельно.

Ниже приведены результаты исследования, направленные на разработку устройства по утилизации тепловых потерь, предназначенного для сокращения (вплоть до исключения) нормируемых линейных тепловых потерь в сетях теплоснабжения промышленных предприятий.

Устройство по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы состоит из парокompрессионного трансформатора тепла (теплого насоса) и сопряженного с ним коллектора, размещенного в канале теплотрассы. Коллектор представляет собой систему трубопроводов, расположенную вдоль канала теплотрассы, по которому циркулирует теплоноситель. На рис. 1 показана принципиальная схема одного из вариантов исполнения устройства.

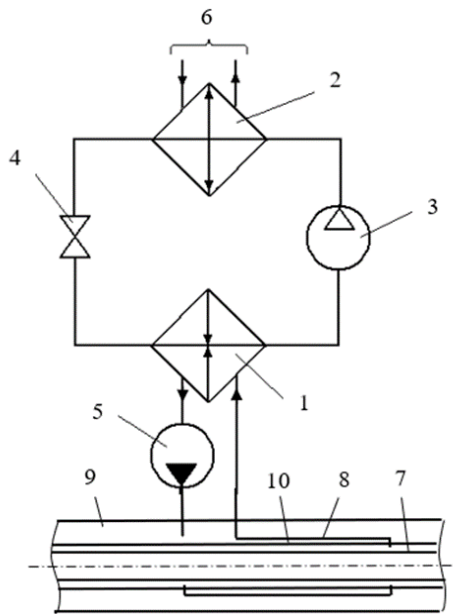


Рис. 1. Принципиальная схема устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы: 1 – испаритель; 2 – конденсатор; 3 – компрессор; 4 – дроссельное устройство; 5 – циркуляционный насос; 6 – потребитель тепловой энергии; 7 – изолированный трубопровод тепловой сети; 8 – коллектор устройства по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

Низкопотенциальным источником тепловой энергии для работы устройства являются нормируемые тепловые потери сети теплоснабжения с подземной канальной прокладкой трубопроводов. Теряющаяся с

поверхности трубопроводов тепловая энергия нагревает воздух внутри канала теплотрассы, который является по сути тепловым вторичным энергоресурсом в виде побочного продукта при осуществлении технологического процесса транспортировки тепловой энергии и средой, которая позволяет передать тепловые потери от трубопроводов тепловой сети к коллектору устройства. При этом нагретый в коллекторе теплоноситель направляется при помощи циркуляционного насоса в испаритель парокompрессионного теплового насоса. Выделенная в конденсаторе теплового насоса тепловая энергия может быть использована для нужд горячего водоснабжения или отопления рядом расположенных зданий и сооружений в течение всего года.

Основной задачей работы устройства является повышение эффективности работы тепловых сетей за счет утилизации тепловых вторичных энергоресурсов.

Очевидным является тот факт, что отбор тепловой энергии из канала теплотрассы приведет к снижению температуры воздуха внутри канала, что в свою очередь вызовет увеличение тепловых потерь. В связи с этим для организации корректной работы указанного устройства, заключающейся в недопущении увеличения тепловых потерь, в канале также установлен теплоотражающий экран, расположенный между трубопроводами тепловой сети и призванный снизить радиационную составляющую теплового потока с поверхности трубопроводов.

Таким образом, предложенное устройство позволяет утилизировать нормируемые тепловые потери в сетях теплоснабжения и тем самым повысить энергетическую эффективность их работы.

**Методы исследования.** Для оценки эффективности применения теплоотражающих экранов в тепловой сети было проведено экспериментальное исследование. Для этого была разработана и создана экспериментальная установка (ЭУ), представляющая собой физическую модель тепловой сети. Экспериментальное исследование состояло из трех этапов, соответствующих трем различным конфигурациям ЭУ (рис. 2):

- базовой конструкции (ЭУ №1);
- конструкции с расположенным вокруг трубопровода теплоотражающим экраном (ЭУ №2);

• конструкции с двумя теплоотражающими экранами (ЭУ №3).

Условия проведения экспериментального исследования приведены в [7]. В результате эксперимента установлено, что при геометрических и теплофизических параметрах экспериментальной установки один теплоотражающий экран, расположенный вокруг трубопровода, способен снизить тепловые потери на 55 %, два экрана – на 70 %.

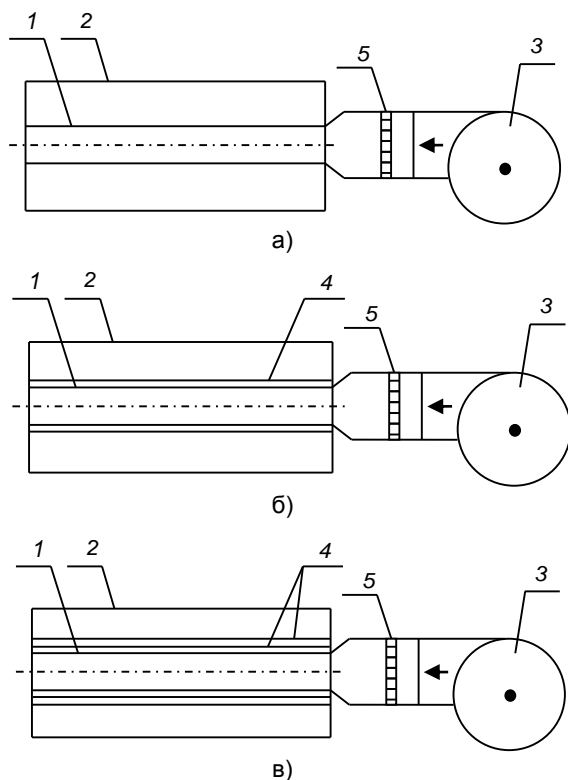


Рис. 2. Принципиальные схемы конфигураций экспериментальной установки: а – ЭУ №1; б – ЭУ №2; в – ЭУ №3; 1 – трубопровод; 2 – канал; 3 – вентилятор с ТЭНом; 4 – теплоотражающий экран; 5 – хонейкомб

Далее было произведено построение математической модели процессов теплообмена в сети теплоснабжения без дополнительных элементов, тепловой сети с применением теплоотражающего экрана и при совместной работе сети с предлагаемым устройством. Подробное описание математического моделирования приведено в [8].

Для проверки адекватности математических моделей было выполнено сравнение результатов экспериментального исследования с результатами моделирования процессов теплообмена в экспериментальной установке при граничных условиях, соответствующих условиям проведения натурного

эксперимента. Расчеты производились в специализированном программном комплексе Comsol Multiphysics, основанном на методе конечных элементов. Относительное отклонение результатов расчета от экспериментальных значений не превысило 5,5 %, что свидетельствует об адекватности математической модели и возможности ее использования для определения параметров и режима работы исследуемого устройства.

Как уже было отмечено, необходимым условием использования устройства является сохранение теплового режима работы тепловой сети. Для этого необходимо организовать отбор теплоты, не вызывающий превышения тепловых потерь выше значений, которыми характеризовалась тепловая сеть до установки устройства. Для этого у внутренней поверхности канала теплотрассы между коллектором и трубопроводами тепловой сети расположен теплоотражающий экран.

Другим возможным результатом работы устройства может стать охлаждение окружающего сеть грунта и даже его промерзание, что недопустимо. Поэтому вопрос корректного отбора и поиск приемлемого диапазона регулирования работы устройства является крайне важным для рассматриваемого технического решения.

В контексте сказанного следующей решенной задачей стало определение максимально допустимого тепловосприятия коллектора, значение которого непосредственно влияет на геометрические характеристики коллектора и, следовательно, на капитальные затраты на установку устройства по утилизации тепловых потерь в целом. При этом под тепловосприятием коллектора понимается энергия, воспринимаемая коллектором в единицу времени на единицу длины теплотрассы.

Для анализа влияния работы устройства по утилизации тепловых потерь на тепловой режим работы сети и для определения максимально возможного тепловосприятия коллектора устройства был проведен ряд численных расчетов. Объектом исследования стала двухтрубная сеть с температурными графиками работы 150/70 и 95/70, расположенная в г. Иванове. Расчеты производились при граничных условиях, соответствующих условиям функционирования тепловой сети при расчетной температуре наружного воздуха и температуре наружного воздуха начала и конца отопительного периода.

В результате расчетов были получены значения удельных линейных потерь тепловой энергии: в 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. На рис. 3 показаны поля температур в непроходном канале двухтрубной тепловой сети, работающей по температурному графику 150/70, в условиях расчетной температуры наружного воздуха при различных конфигурациях тепловой сети.

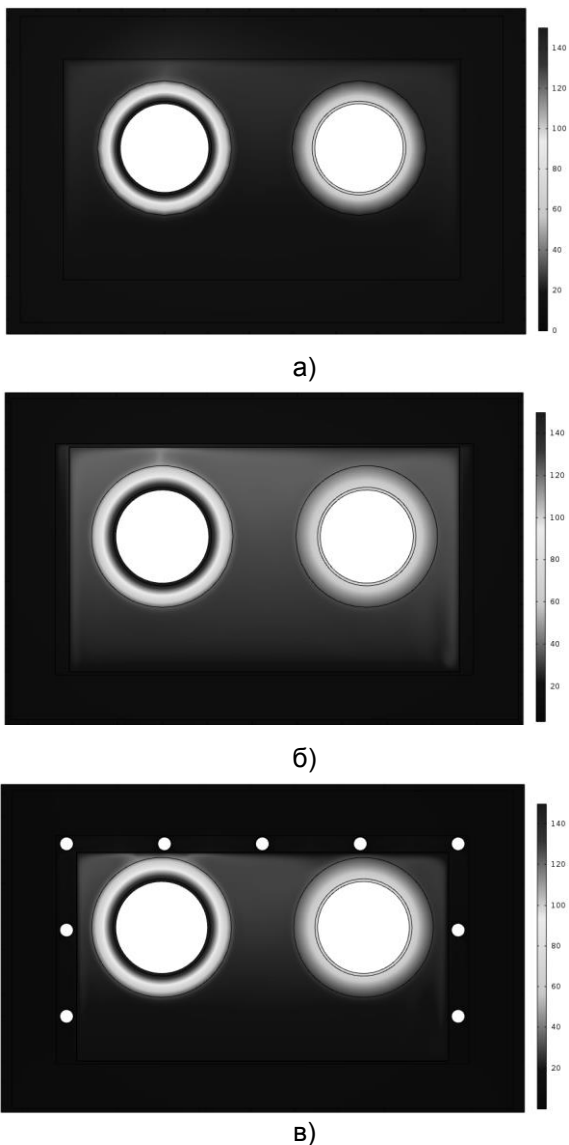


Рис. 3. Температурное поле в двухтрубной тепловой сети: а – без дополнительных элементов; б – с теплоотражающим экраном; в – с теплоотражающим экраном и коллектором

Для определения условий работы устройства по утилизации тепловых потерь

при совместной работе с однотрубной и двухтрубной тепловыми сетями с канальной прокладкой в непроходных каналах был произведен анализ результатов расчета, полученных при математическом моделировании. Графическое изображение на рис. 4 являет собой пример одной из полученных в результате проведенного анализа зависимостей, определяющих условия совместной работы рассматриваемого устройства и тепловой сети.

**Результаты исследования.** В рамках проведенного исследования указанных выше математических моделей было установлено, что отбор тепловой энергии коллектором из канала теплотрассы в системе без теплоотражающего экрана в размере тепловых потерь, которые имела сеть до установки устройства, закономерно вызывает увеличение линейной плотности теплового потока с поверхности трубопроводов в среднем на 10–14 %. Применение теплоотражающего экрана, расположенного у внутренней поверхности канала теплотрассы между коллектором и трубопроводами, позволяет исключить увеличение тепловых потерь. В этом случае, отбирая аналогичное количество энергии от сети, линейная плотность теплового потока с поверхности трубопроводов становится на 4 % меньше первоначального значения, что говорит о выполнении требования по сохранению теплового режима работы сети. При этом тепловая энергия в размере 4 % от исходных тепловых потерь, необходимая для достижения требуемого тепловосприятия коллектора, компенсируется энергией окружающего грунта, что является недопустимым, поскольку в этом случае будет наблюдаться охлаждение и, возможно, промерзание грунта в месте расположения устройства. Исходя из вышесказанного, значение максимально допустимого тепловосприятия коллектора, обеспечивающее стабильность теплового режима сети, определяется отсутствием отбора тепловой энергии из окружающего тепловую сеть грунта. Зона допустимой работы устройства показана на рис. 4 серым цветом. Также необходимо отметить, что диаметр трубопроводов тепловых сетей не влияет на описанные выше закономерности. Это позволяет экстраполировать полученные результаты на тепловые сети с различными диаметрами трубопроводов.

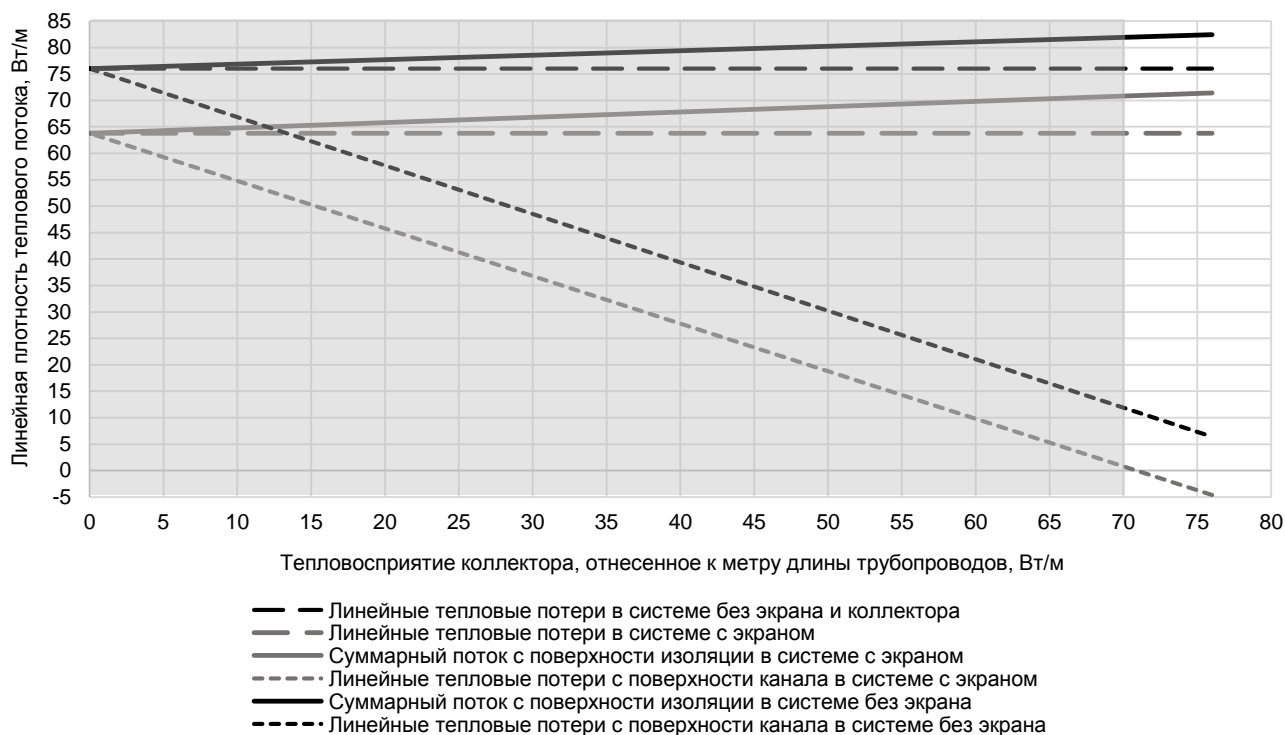


Рис. 4. Влияние тепловосприятости коллектора на тепловой поток с поверхности изоляции и с поверхности канала в однотрубной тепловой сети  $d = 200$  мм при расчетной температуре наружного воздуха

Таким образом, обобщая результаты численного моделирования, можно констатировать, что допустимое тепловосприятие коллектора устройства во всех рассмотренных вариантах тепловой сети и условиях их работы, изменяется в диапазоне от 93 до 95 %.

Что касается эффективности работы теплоотражающего экрана в условиях тепловой сети без коллектора, то при его установке у внутренней поверхности канала теплотрассы во всех вариантах расчета наблюдалось снижение тепловых потерь в размере от 14 до 19 %. При этом выяснилось, что наиболее значимым фактором, определяющим эффективность теплоотражающего экрана в условиях тепловой сети, является термическое сопротивление изоляции трубопровода, напрямую зависящее от ее коэффициента теплопроводности. Этим обстоятельством объясняется высокая эффективность теплоотражающего экрана в условиях неизолированного трубопровода в экспериментальной установке.

В рамках проведенного исследования была также разработана инженерная методика расчета предлагаемого устройства, направленная на определение длины коллектора, приведенной к одному метру сети теплоснабжения, и параметров работы элементов теплового насоса. Данная методика

положена в основу зарегистрированной программы для ЭВМ [9].

Эксплуатация устройства предполагается также при режимах, отличных от расчетных. Необходимость регулирования работы устройства связана с изменением величины тепловых потерь в течение отопительного периода. Регулирование работы устройства производится за счет изменения температуры теплоносителя в коллекторе, для определения которой разработана универсальная номограмма, показанная на рис. 5.

**Выводы.** Таким образом, проведенное исследование позволило решить ряд задач, обеспечивающих повышение эффективности систем теплоснабжения промышленных предприятий за счет применения устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы.

Необходимо отметить, что одним из существенных достоинств исследуемого устройства является возможность осуществления бесконтактного присоединения абонента для покрытия его тепловой нагрузки без нарушения целостности трубопроводов тепловой сети, что позволит, в частности, обеспечить гидравлическую стабильность режима работы сети теплоснабжения.

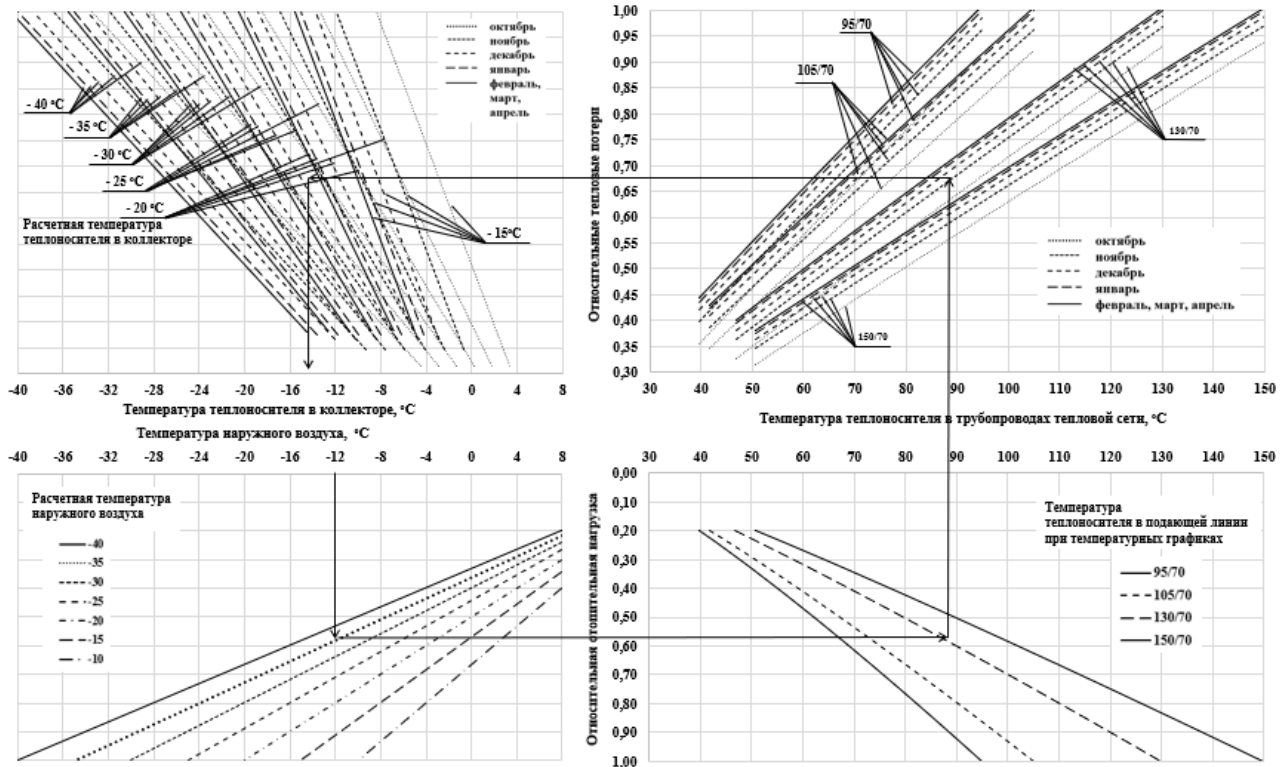


Рис. 5. Номограмма для определения температуры теплоносителя в коллекторе устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы для климатических условий Центральной России

Вариантами наиболее эффективного практического применения предлагаемого устройства является его использование 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.

#### Список литературы

1. Цигина А.А. Перспективы развития теплоснабжения в России // Инфраструктурные отрасли экономики: проблемы и перспективы развития. – 2016. – № 14. – С. 78–82.
2. Обзор и анализ состояния тепловых сетей в России / А.Ю. Жданюк, Д.В. Желтухина, М.П. Веремьева и др. // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. – 2022. – № 5. – С. 185–188.
3. Пат. 124369 Российская Федерация МПК F24D11/00. Контактная конструкция теплопроводов двухтрубной тепловой сети / В.И. Моисеев, Б.Г. Тувальбаев; заявл. 2012127735/12; опубл. 20.01.2013, Бюл. № 2.
4. Пат. 102088 Российская Федерация МПК F 24 F 7/06. Теплосеть / Н.С. Кобелев, С.Г. Емельянов, Т.В. Алябьева, В.Н. Кобелев; заявл. 2008138479/06; опубл. 25.04.2012, Бюл. №7.
5. Голяк С.А., Сикерин И.Е. Оценка температурных полей подземных теплопроводов с целью утилизации теряемой теплоты [Электронный

ресурс] // Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции: материалы Междунар. науч.-техн. конф., МГСУ. – М., 2005. Режим доступа: <http://www.energosoвет.ru/stat396.html>

6. 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. – Иваново, 2008. – 175 с.

7. Банникова С.А., Захаров В.М., Козлова М.В. Экспериментальное определение тепловых потерь сети теплоснабжения для их использования в устройстве утилизации // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 1. – С. 5–11.

8. Банникова С.А. Математическое моделирование теплопереноса в непроходных каналах тепловых сетей // Вестник ИГЭУ. – 2022. – Вып. 1. – С. 12–21.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018616398 Российская Федерация. Утилизация тепловых потерь в канале теплотрассы / С.А. Банникова, М.В. Козлова; № 2018613284; заявл. 05.04.2018; опубл. 01.06.2018.

#### References

1. Tsigina, A.A. Perspektivy razvitiya teplosnabzheniya v Rossii [Prospects of the development of heat supply in Russia]. *Infrastrukturnyye otrasli*

*ekonomiki: problemy i perspektivy razvitiya*, 2016, no. 14, pp. 78–82.

2. Zhdanyuk, A.Yu., Zheltukhina, D.V., Verem'eva, M.P., Bebes, A.O., Lopatina, P.M. Obzor i analiz sostoyaniya teplovykh setey v Rossii [Review and analysis of the heating networks in Russia]. *Konkurentosposobnost' v global'nom mire: ekonomika, nauka, tekhnologii*, 2022, no. 5, pp. 185–188.

3. Moiseev, V.I., Tuval'baev, B.G. *Kontakt'naya konstruktsiya teploprovodov dvukhtrubnoy teplovoi seti* [Contact design of heat pipelines of a two-pipe heating network]. Patent RF, no. 124369, 2013.

4. Kobelev, N.S., Emel'yanov, S.G., Alyab'eva, T.V., Kobelev, V.N. *Teploset'* [Heating system]. Patent RF, no. 102088, 2012.

5. Golyak, S.A., Sikerin, I.E. Otsenka temperaturnykh poley podzemnykh teploprovodov s tsel'yu utilizatsii teryaemoy teploty [Assessment of temperature fields of underground heat pipelines for the purpose of recycling lost heat]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Teoreticheskie osnovy teplogazosnabzheniya i ventilyatsii»* [Proceedings of International scientific-technical conference “Theoretical foundations of heat and gas supply and ventilation”]. Moscow, 2005. Available at: <http://www.energsovet.ru/stat396.html>

6. Marchenko, A.V. *Razrabotka tekhnologiy ispol'zovaniya kotloagregatov TETs i ikh dut'evykh ventilyatorov dlya transporta i utilizatsii ventilyatsionnykh vybrosov promyshlennykh predpriyatiy i avtomagistralei*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Development of technologies to use boiler units of thermal power plants and their blower fans for transport and recycling of ventilation emissions from industrial enterprises and highways. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2008. 175 p.

7. Bannikova, S.A., Zakharov, V.M., Kozlova, M.V. Eksperimental'noe opredelenie teplovykh poter' seti teplosnabzheniya dlya ikh ispol'zovaniya v ustroystve utilizatsii [Experimental study of heat losses of the heating supply network for their use in a recycling device]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 1, pp. 5–11.

8. Bannikova, S.A. Matematicheskoe modelirovaniye teploperenosa v neprokhodnykh kanalakh teplovykh setey [Mathematical modeling of heat transfer in non-passing channels of heating networks]. *Vestnik IGEU*, 2022, issue 1, pp. 12–21.

9. Bannikova, S.A., Kozlova, M.V. *Utilizatsiya teplovykh poter' v kanale teplotrassy* [Recycling of heat losses in the heating system channel]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2018616398 RF, 2018.