

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
институт
Теплотехники и гидрогазодинамики
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.А. Кулагин
подпись инициалы, фамилия
«____» _____ 2021 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ТЕПЛОТЫ ЧЕРЕЗ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

тема

13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

код и наименование направления

13.04.01.01 Энергетика теплотехнологий

код и наименование магистерской программы

| | | | |
|----------------------|---------------|---------------------------|----------------------|
| Научный руководитель | _____ | проф., д-р. техн. наук | <u>А.П. Скуратов</u> |
| | подпись, дата | должность, ученая степень | инициалы, фамилия |
| Выпускник | _____ | | <u>И.В. Сорокин</u> |
| | подпись, дата | | инициалы, фамилия |
| Рецензент | _____ | проф., д-р. техн. наук | <u>Ю.Л. Липовка</u> |
| | подпись, дата | должность ученая степень | инициалы, фамилия |

Красноярск 2021

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
институт
Теплотехники и гидрогазодинамики
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.А. Кулагин
подпись инициалы, фамилия
«_____» _____ 2021 г

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации

Студенту: Сорокину Ивану Владимировичу

Группа ФЭ19-01М

Направление (специальность) 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Тема выпускной квалификационной работы: «Методика расчета и оценка потерь теплоты через теплоизоляционные конструкции тепловых сетей»

Утверждена приказом по университету № 17023/с от 03.10.2019.

Руководитель ВКР: А.П. Скуратов д–р техн. наук, профессор кафедры ТТиГД ПИ СФУ

Исходные данные для ВКР: 1) Правила и нормы (СП, СНиП) по проектированию тепловой изоляции оборудования и теплопроводов; 2) Научно-технические публикации по проектированию и расчету конструкций тепловых сетей; 3) Теплофизические свойства современных теплоизоляционных материалов; 4) Современные аналитические и численные методы расчета теплообмена теплотрубопроводов.

Перечень разделов ВКР: 1). Актуальное состояние технологий определения тепловых потерь; 2). Методика определения тепловых потерь в сетях теплоснабжения; 3) Анализ влияния эксплуатационных факторов на тепловые потери трубопроводом.

Презентация материала (рисунки, графики, таблицы и др.) в виде слайдов.

Руководитель ВКР

А.П. Скуратов

подпись

инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению

И.В. Сорокин

подпись

инициалы и фамилия студента

«26» 01 2020 г.

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация по теме «Методика расчета и оценка потерь теплоты через теплоизоляционные конструкции тепловых сетей» содержит 63 страницы текстового документа включая 12 иллюстрации, 8 таблиц, 36 формул, 60 использованных источников.

ТЕПЛОВЫЕ СЕТИ, РАБОЧЕЕ ТЕЛО, ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ, ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ, ЭНЕРГЕТИКА, ПОТРЕБИТЕЛИ, ТЕПЛО.

Цель работы – исследование методик расчета и оценки потерь теплоты через теплоизоляционные конструкции тепловых сетей для совершенствования существующих технологий анализа тепловых потерь.

Проведен анализ теоретических данных по определению тепловых потерь в трубопроводах различного назначения.

Усовершенствована методика определения тепловых потерь в сетях теплоснабжения, позволяющая учитывать не только способы прокладки и конфигурацию трубопроводов, но также изменение теплозащитных свойств изоляции в процессе ее эксплуатации.

Проведен сравнительный анализ влияния эксплуатационных факторов на величину тепловых потерь трубопроводом, а также даны рекомендации по оптимизации тепловых потерь через теплоизоляцию выбранной конструкции водяной сети.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 6 |
| 1 Существующие методики определения удельных тепловых потерь через теплоизоляционный слой..... | 8 |
| 1.1 Особенности применяемых методик..... | 8 |
| 1.2 Методы определения часовых потерь теплоты..... | 11 |
| 1.3 Виды трубопроводов..... | 14 |
| 1.3.1 Надземные трубопроводы..... | 17 |
| 1.3.2 Подземные трубопроводы..... | 20 |
| 1.4 Изменение термодинамических характеристик тепловой изоляции в процессе эксплуатации..... | 21 |
| 1.5 Выводы по главе и постановка задач..... | 22 |
| 2 Методика определения тепловых потерь в сетях теплоснабжения..... | 25 |
| 2.1 Адаптация применяемой методики расчета для пгт. Березовка..... | 25 |
| 2.2 Основные термодинамические уравнения для определения тепловых потерь..... | 28 |
| 2.3 Методика расчета..... | 39 |
| 3 Анализ влияния эксплуатационных факторов на тепловые потери трубопроводом..... | 40 |
| 3.1 Результаты применения методики расчета..... | 42 |
| 3.2 Анализ полученных расчетных данных..... | 46 |
| 3.3 Методы редуцирования тепловых потерь на тепловых сетях..... | 52 |
| 3.4 Выводы по главе..... | 54 |
| Заключение..... | 56 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ..... | 57 |

ВВЕДЕНИЕ

Тепловые потери через стенки трубопровода отражают эффективность передачи теплоносителя от источника тепла к потребителю, надежность работы трубопровода и его техническое состояние [1].

Существующие технологии контроля тепловых потерь не позволяют эффективно и своевременно выявлять опасные участки тепловых сетей, которые в дальнейшем влияют на эффективность передачи тепла потребителям, что приводит к увеличению нагрузки на источники тепла или авариям [2]. Проблема своевременного определения неэффективных участков тепловых сетей актуальна в настоящее время.

Тепловые потери в трубопроводах при передаче и распределении теплоносителя в сетях состоят из:

- 1) Потеря тепловой энергии, в следствии утечек самого теплоносителя;
- 2) Потеря тепловой энергии через изоляционные коробы трубопроводов.

Большая доля потерь тепла связана с нормативными утечками теплоносителя, а именно: через технологические сливы средствами автоматизации, потери через неплотности в арматуре, трубопроводах и другие утечки сетевой воды, которые возникают в процессе эксплуатации трубопроводов [3].

Следует отметить, что потери тепла через изоляционные конструкции трубопроводов в сетях централизованного теплоснабжения несут в себе более серьезные проблемы в процессе эксплуатации, это связано с тем, что оценить такие потери достаточно сложно. Сложность проведения анализа теплопотерь вызвана такими факторами, как частичное или полное разрушение изоляции на отдельных участках трубопроводов, ее деформация, проникновение влаги

в канал и непосредственно в слой изоляции, что приводит к изменению величины коэффициента теплопроводности изоляционного материала [4].

Опираясь на ряд негативных факторов, возникающих в процессе эксплуатации, можно сделать вывод, что фактические теплозащитные свойства изоляционных конструкций значительно отличаются от справочных значений. Все эти изменения в процессе эксплуатации трубопроводов вызывают необходимость учитывать изменения коэффициентов теплопроводности изоляции на конкретных участках тепловых сетей [5].

Целью данной работы было исследование методик расчета и оценки потерь теплоты через теплоизоляционные конструкции водяных сетей для совершенствования существующих технологий анализа тепловых потерь [6].

1 Существующие методики определения удельных тепловых потерь через теплоизоляционный слой

1.1 Особенности применяемых методик

Проанализировав работы авторов [7-9], можно утверждать о том, что существует большое число методов определения удельных теплопотерь при транспортировке теплоносителя от источника к конечному потребителю. Эффективность этих методов связана с возможной погрешностью в расчете тепловых потерь вследствие не полного учета конструктивных и эксплуатационных факторов для конкретного вида сетей.

Количество теплоты, которое уходит через теплоизоляционный контур зависит от ряда факторов, таких как:

- Температуры наружного воздуха и скорости ветра;
- Температурного режима;
- Срока службы и условия эксплуатации трубопроводов;
- Материалов, из которых изготовлена теплоизоляционная конструкция;
- Протяженности трубопроводов;
- Типа прокладки трубопроводов (подземная, надземная).

Существует экспериментальная оценка тепловых потерь, данный метод учитывает измерение расхода и разницу температуры рабочего тела в циркуляционном контуре, который состоит, как правило, из прямой и обратной линии. Стоит отметить, что некоторые тепловые сети имеют хорошее состояние тепловой изоляции, следовательно, при установленвшемся гидравлическом и температурном режимах работы, тепловые потери минимальны и составляют около 0,6 °С на один километр [9-11]. Данный фактор является серьезным ограничителем в проведении анализов тепловых потерь, так как необходимая минимальная разность температур должна быть

8 °C [12], что делает максимальную длину циркуляционного контура ориентировочно 13 километров, проведение испытаний на таких коротких участках может привести к нарушению гидравлического режима.

Проблема, связанная с необходимостью отключения потребителей, решается при использовании метода тепловых волн. При использовании данного метода происходит изменение температурного режима температурного режима теплоисточника, что приводит к созданию температурных волн [13]. Следом проводятся высокоточные контактные замеры температуры рабочего тела в начале и в конце расчетного участка тепловой сети, а также фиксируется внутренний диаметр трубопровода и скорость движения рабочего тела (теплоносителя).

Так же существует контактный способ определения тепловых потерь, который основан на измерении температурных полей грунтовых поверхностей вокруг действующего теплопровода, при котором потери тепла определяются по известным соотношениям [14]. Данный способ имеет ряд недостатков, одним из которых является необходимость установки датчиков температуры (термопары) в массивах грунта, данный способ включает в себя вскрытие проложенных под землей теплотрасс.

С каждым годом возрастает интерес к аналитическому определению потерь теплоты в трубопроводах [15]. Данный метод интересен ввиду того, что экспериментальный метод оценок тепловых потерь является менее эффективным и более трудоемким.

По приведенным в [16] данным показано, что на практике, нередко встречаются тепловые сети с частичным или полностью разрушенным слоем изоляции. В современной литературе, такие дефекты изоляционной конструкции, освещены недостаточно.

Авторами [21-23] было предложено, определять удельные потери тепла опираясь на данные полученные с измерительных приборов, установленных у

потребителей. На основании показаний датчиков температуры, расхода и давления теплоносителя вычислялись потери тепла.

Тепловые потери находят по выражению:

$$Q_{ni} = kF_i \cdot (T_{cp} - T_h), \text{ Вт}, \quad (1)$$

где kF_i – комплекс трубопровода, определенный единожды по показаниям приборов учета для каждого конечного потребителя, Вт/К;

T_h – средне установленная температура наружного воздуха. К;

$T_{cp} = 0,5(T_0 - T_K)$ – средняя температура на участке теплосети. К;

T_0 и T_K – температуры теплоносителя на выходе из источника и на входе конкретного потребителя, соответственно, К.

Чтобы получить корректные данные при данном способе измерения, необходим комплекс средств автоматизации у каждого потребителя и на источнике тепла. Помимо этого, появляется необходимость производить замеры, температуры, расхода теплоносителя и давления для вычисления комплекса трубопровода kF_i . Для безучетных потребителей предлагалось проводить замеры при помощи портативного измерительного прибора, что в свою очередь является трудозатратным для теплоснабжающих компаний из-за большого количества абонентов. Не смотря на большое количество установленных приборов учета в ЖКХ, актуальность вопроса не изменилась [17-19].

Благодаря появившемся программным комплексам таким как, ZuluThermo, удается снизить время расчета и трудозатратность процесса вычисления. Данный программный комплекс, создает температурные графики, чертежи имеет возможность проводить гидравлический и температурный расчеты.

1.2 Методы определения часовых потерь теплоты

Для нахождение часовых потерь теплоты существует несколько способов:

1. Определение часовых потерь теплоты в тепловых сетях по нормативам
2. Расчет на основании полученных экспериментальных данных
3. При помощи приборов учета у конечных потребителей теплоты
4. Теплотехнический расчет

Определение часовых тепловых потерь через теплоизоляционный контур, основывается на сведениях об конструктивных особенностях теплопроводов и табличных значений норм теплового потока [20].

В зависимости от года проектирования трубопроводов выбираются разные нормативные значения часовых тепловых потерь [21]:

- 1) с 1959 г. по 1989 г. включительно;
- 2) с 1990 г. по 1997 г. включительно;
- 3) с 1998 г. по 2002 г. включительно;
- 4) с 2003 г. по настоящее время.

Для трубопроводов подземного типа прокладки, расчет нормативных удельных потерь тепловой энергии определяют по выражению:

$$q_h = q_h^{T1} + (q_h^{T2} - q_h^{T1}) \cdot \frac{\Delta T_{cp}^{cr} - \Delta T_{cp}^{T1}}{\Delta T_{cp}^{T2} - \Delta T_{cp}^{T1}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}, \quad (2)$$

где q_h^{T1} – удельная потеря тепла в подающем и обратом трубопроводе суммарно, при меньшем, чем для данной сети, табличном значении разности среднегодовых температур сетевой воды и грунта, Вт/м;

q_h^{T2} – удельная потеря тепла в подающем и обратом трубопроводе суммарно, при большем, чем для данной сети, табличном значении разности среднегодовых температур сетевой воды и грунта, Вт/м;

$\Delta T_{\text{ср}}^{\text{Tcr}}$ – разность среднегодовой температуры сетевой воды и грунта для данной тепловой сети. К;

$\Delta T_{\text{ср}}^{\text{T1}}$ - меньшее, чем для данной сети, табличное значение разности среднегодовых температур сетевой воды и грунта. К;

$\Delta T_{\text{ср}}^{\text{T2}}$ - большее, чем для данной сети, табличное значение разности среднегодовых температур сетевой воды и грунта, К.

Для определения среднегодового температурного режима рабочего тела и грунта используют выражение:

$$\Delta T_{\text{ср}}^{\text{cr}} = \frac{T_n^{\text{cr}} - T_0^{\text{cr}}}{2} - T_{\text{ср}}^{\text{cr}}, \text{К}, \quad (3)$$

где $T_n^{\text{cr}}, T_0^{\text{cr}}$ - среднегодовая температура сетевой воды в подающем и обратном трубопроводах, К;

$T_{\text{ср}}^{\text{cr}}$ -среднегодовая температура грунта на средней глубине заложения оси трубопроводов, К.

Метод оценки потерь тепла по удельным нормативным потерям носит оценочный характер, так как в расчете учитывается только год и способ прокладки трубопровода, его диаметр, а также число часов работы за год [22]. Стоит обратить внимание на то, что полученные данные могут отличаться друг от друга из-за технического состояния тепловой изоляции на разных участках трубопровода, следовательно, нельзя судить о состоянии теплотрассы только по нормативам. Величина нормативных тепловых потерь, является ограничительным диапазоном, который не следует превышать при передаче тепла.

Теплосетевая компания, за которой закреплен участок тепловой сети, должна проводить испытания с целью выявления величины теплопотерь при транспортировке теплоносителя. Испытания проводят раз в пять лет [23-25].

Для более точных результатов принято учитывать поправочный коэффициент k , который находят по выражению:

$$k = \frac{Q_{из.год.и}}{Q_{из.год.н}}, \quad (4)$$

где $Q_{из.год.и}, Q_{из.год.н}$ - потери тепла, найденные в процессе испытаний, пересчитанные на среднегодовые условия эксплуатации каждого испытанного участка трубопроводов тепловой сети, и потери, определенные по нормам для тех же участков, Вт.

С учетом поправочного коэффициента, удельные часовые потери тепла находят по выражению:

$$Q_{норм}^{ср.г.} = \sum(k \cdot q \cdot L \cdot \beta), \text{ Вт.} \quad (5)$$

Такая методика не является универсальной, ввиду того, что все трубопроводы эксплуатируются в разных условиях и имеют индивидуальный характер износа теплоизоляционного контура. Исходя из этого, для более точной оценки удельных тепловых потерь, появляется необходимость проводить испытания по всем участкам тепловой сети, что в свою очередь, является дорогостоящей процедурой и длительной по времени, т.к. испытания требует отключения потребителей [26].

На основании показаний установленных счетчиков у потребителей, становится возможным определение тепловых потерь при транспортировании теплоносителя. Транспортные тепловые потери находятся через выражение:

$$Q_{потерь} = Q_{отп}^{изм} - Q_{потреб}^{изм}, \text{ Вт,} \quad (6)$$

где $Q_{отп}^{изм}$ – количество тепла, отпущенное на тепловом источнике, Вт;

$Q_{потреб}^{изм}$ – количество тепла, использованного конечным потребителем,

Вт.

Данное выражение определяет тепловые потери, связанные с утечками рабочего тела, в то же время, оно не позволяет отследить тепловые потери, вызванные охлаждением рабочего тела [27].

Следует отметить, что основным недостатком метода определения часовых потерь по приборам учета, является отсутствие у большинства потребителей приборов учета, следовательно, данный метод учета сложно реализуем. Так же у измерительных тепловых приборов существует погрешность, а значит, полученные данные нельзя считать достоверными.

Определение тепловых потерь методом теплотехнического расчета проводится:

1. Для участков трубопроводов, не имеющих аналогов среди испытанных по типам прокладки и теплоизоляционных конструкций и не являющихся характерными для данной тепловой сети;
2. Для участков трубопроводов, вводимых в эксплуатацию после капитального ремонта, а также монтажа или реконструкции, при которых проводились работы по изменению типа и конструкции прокладки или замене тепловой изоляции;
3. При незначительной оснащенности потребителей приборами учета.

1.3 Виды трубопроводов

Трубопровод – это инженерное сооружение различной степени сложности, которое используют для транспортировки газообразных, сжиженных и жидких веществ, находящихся под давлением.

Основной функцией трубопроводов, является транспортировка сырья от места производства до места потребления. В зависимости от вида сырья, которое перемещают по трубопроводу, определяется и его наименование: паропровод, нефтепровод, водопровод, бензопровод, газопровод [28].

Стоит отметить, что независимо от назначения и вида укладки трубопровода, огромную роль играет выбор высокопрочных материалов для герметизации и защиты [29].

Основным способом защиты трубопровода от коррозии, механического воздействия, агрессивности транспортируемого сырья, перепадов температуры, наносят специальные теплоизоляционные и антикоррозионные покрытия.

Основные виды трубопровод подремонтированы на рисунке 1.



Рисунок 1 – Классификация трубопроводов

Данная иллюстрация показывает, какое огромное множество трубопровод существует, каждый из них предназначен для разных технологических нужд, разберем основные из них [30-34].

Трубопроводы принято классифицировать:

По масштабу:

- Магистральные – самые крупные инженерные сети для транспортировки сырья на большие расстояния;
- Технологические – используют с целью снабжения промышленных предприятий;
- Коммунальные – обеспечивают жилой и нежилой фонд теплом, водой, газом.

По способу прокладки:

- Надземные трубопроводы, которые сооружают на высоте не менее 25см от грунта на опорах, балках и эстакадах;
- Подземные трубопроводы, их укладывают в траншеи, канавы, тоннели, искусственные насыпи;
- Подводные трубопровод, данный вид сооружений проходит по дну водоема или в специально прорытых траншеях;
- Плавающие. Как правило, к таким трубопроводам дополнительно крепят поплавки. Укладка проводится поверх водоема.

По типу транспортируемого сырья:

- Водопровод – осуществляет транспортировку питьевой воды;
- Воздухопровод – транспортирует сжатый воздух;
- Газопровод – доставляет природный газ;
- Нефтепровод – снабжает промышленные предприятия сырой необработанной нефтью или нефтепродуктами;
- Паропровод – транспортирует пар находящийся под давлением;

- Троповод выполняет функцию передачи теплоносителя к конечным потребителям.

По давлению:

- Троповоды низкого давления – давление в трубном пространстве не превышает 12 атмосфер;
- Среднего давления – от 12 до 25 атмосфер;
- Высокого давления – показатель более 25 атмосфер.

По температуре передаваемого вещества:

- Холодные троповоды – температура рабочего тела около 0°C и ниже
- Среднетемпературные – температура передаваемого сырья варьируется от +1°C до +45°C
- Высокотемпературные или горячие – рабочее тело достигает температуры выше 46°C

Как известно, троповоды тепловых сетей прокладывают на земле, в земле и над землей. Независимо от способа укладки сетей, возникает необходимость обеспечивать большую надёжность работы системы при наименьших капитальных и эксплуатационных затратах. Следовательно, возникает необходимость более детально разобрать способы прокладки тепловых сетей [35].

1.3.1 Надземные троповоды

При укладке троповодов, выбор способа монтажа зависит от местных условий, где производится монтаж. Как утверждают авторы [37-38], надземный способ монтажа троповодов принято использовать в районах с вечномерзлыми грунтами, при неблагоприятном рельефе местности, на территориях промышленных предприятий.

Данный вид прокладки зарекомендовал себя достаточно надёжным в процессе эксплуатации, благодаря этому становится возможным в кратчайшие сроки определить и ликвидировать аварию. Отмечается, что такие трубопроводы доступны для ежедневного осмотра и обслуживания, следовательно, увеличивается срок службы [39]. На стадии монтажа, затрачивается меньше времени и сил в сравнении с подземным способом укладки.

Монтаж надземных трубопроводов осуществляют на отдельно стоящих опорах, эстакадах, фермах или подвесных конструкциях.

При монтаже данного типа трубопроводов применяется ряд требований, а именно, при установке в непроезжих районах, высота расположения тепловых сетей от поверхности земли до трубопроводов должна быть не менее 0,6 м. При монтаже тепловых сетей через улицы и проезжую часть, высота расположения трубопроводов от уровня проезжей части до наружного слоя изоляции должна быть не менее 4,5 м. При укладке через железнодорожные пути расстояние от головки рельса до наружного слоя изоляции не более 6,4 м. При прокладке трубопроводов на территории предприятий и эстакадах допускается совместная установка тепловых сетей с технологическими трубопроводами. Установка арматуры осуществляется в местах удобных для ремонта и обслуживания, вместе с этим предусмотрена установка площадки с перилами и лестницами [40].

Согласно ГОСТ 14202-69, поверх изоляции трубопроводов, наносятся опознавательные кольца, шириной 0,5 м., которые указывают параметры и тип среды (рисунок 2).

Однако, при использовании надземного тепловые потери тепловых сетей возрастают из-за разрушительных факторов, вызванных природными явлениями, такими как, дождь, ветер и др.

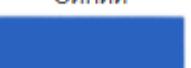
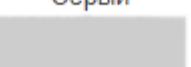
| Транспортируемое вещество | | Образцы и наименование цветов опознавательной окраски |
|-----------------------------|--|---|
| Цифровое обозначение группы | Наименование | |
| 1 | Вода | Зеленый  |
| 2 | Пар | Красный  |
| 3 | Воздух | Синий  |
| 4 5 | Газы горючие Газы негорючие | Желтый  |
| 6 | Кислоты | Оранжевый  |
| 7 | Щелочи | Фиолетовый  |
| 8 9 | Жидкости горючие Жидкости негорючие | Коричневый  |
| 0 | Прочие вещества | Серый  |

Рисунок 2 – Определение среды по цвету

1.3.2 Подземные трубопроводы

Данный вид прокладки тепловых сетей хорошо зарекомендовал себя в города и населенных пунктах, с точки зрения архитектурного облика. Благодаря такому технологическому решению, тепловые сети не мешают движению транспорта и позволяет сократить тепловые потери за счет использования теплозащитных свойств грунта. Промерзание грунта не представляет опасности для трубопроводов, исходя из этого, появляется возможность прокладки в зоне сезонного промерзания грунта. Подземные тепловые сети принято прокладывать на глубине от 0,5 до 2 м и ниже поверхности земли [41].

К недостаткам подземных прокладок тепловых сетей можно отнести: опасность увлажнения и разрушения изоляции вследствие воздействия грунтовых или поверхностных вод, что приводит к серьезному увеличению потерь тепла, а также опасность внешней коррозии труб в результате воздействия буждающих электрических токов, влаги и агрессивных веществ, содержащихся в грунте [42]. Подземные прокладки тепловых сетей нередко нуждаются в ремонте, что вызывает необходимость вскрытия улиц, проездов и дворов.

Конструктивно подземные трубопроводы разделяют на два принципиально различных вида укладки, а именно канальные и бесканальные [43-44].

Технология канальной кладки тепловых сетей считается совершенной, при использовании каналов, тепловые сети защищены от влияния влажности грунта, от нагрузок, вызванных транспортом и самим грунтом. Тепловые сети в канальной кладке имеют возможность самокомпенсироваться в угловых местах за счет технологического пространства между стенкой канала и трубой. Данный вид кладки тепловых сетей удобен в обслуживании

эксплуатирующего персонала, за счет постоянного доступа к тепловым сетям, что позволяет оперативно выполнять необходимый перечень работ [45].

Большее развитие получил бесканальный способ прокладки трубопроводов. Данный вид укладки является перспективным технологическим решением, ввиду удешевления стоимости монтажа. Однако из – за непосредственного контакта с грунтом, тепловые сети находятся в условиях физико-механических воздействий (влажность грунта, давление грунта и внешних нагрузок и т. п.), нежели в канальных прокладках. Бесканальный способ прокладки возможен при использовании механически прочной теплогидроизоляционной оболочки, способной защитить тепловые сети от тепловых потерь и выдерживать нагрузки, передаваемые грунтом [46-47].

Тепловые сети с наружным диаметром труб до 400 мм включительно, рекомендуется прокладывать преимущественно бесканальным способом.

1.4 Изменение термодинамических характеристик тепловой изоляции в процессе эксплуатации

Основным фактором, вызывающим увеличение термодинамических потерь в трубопроводах, является разрушение слоя изоляции в процессе эксплуатации [48]. Из многочисленных наблюдений выделяют следующие причины, влияющие на разрушение теплоизоляционных конструкций:

- Регулярные теплоперепады и тепловые напряжения в теплоизоляционном контуре;
- Механические повреждения, вызванные разгрузкой, укладкой и монтажом трубопроводов во время строительства или ремонта тепловых сетей;
- Повреждения при ликвидации аварий или капитальном ремонте;

- Проникновение влаги в проходные и непроходные каналы трубопроводов, вызванных затоплением или утечкой воды в связи с прорывом трубопроводов;
- При надземной прокладке повреждение изоляции вызваны спецавтотехникой или вандалами.
- Удельные потери тепла возникают вследствие деформации теплоизоляционного контура, вызванного провисанием трубопровода под собственным весом и других технологических конструкций.
- Провисание трубопроводов вызывают деформацию слоя изоляции, вследствие чего появляется воздушная прослойка между трубой и изоляцией.

Приведенные выше факторы, проявляются независимо от климатических условий эксплуатации и наблюдается во всех регионах РФ [49].

1.5 Выводы по главе и постановка задач

Следует отметить, что в настоящее время большинство теплотрасс эксплуатируются в нештатных режимах, что приводит к росту тепловых потерь, через теплоизоляционные конструкции трубопроводов при транспортировании рабочего тела от источника тепла к конечному потребителю.

При проведении анализа было установлено, что экспериментальное определение тепловых потерь является трудозатратным с временной и экономической точки зрения, в связи с этим данная методика является труднореализуемой и не может регулярно выполняться в полном объеме.

Теплотехнический расчет потерь теплоты, так же не позволяет достаточно точно оценить потери тепла при транспортировке теплоносителя, из-за использования в расчете справочных значений коэффициентов теплопроводности изоляционных конструкций, которые не учитывают ряд эксплуатационных факторов.

При использовании индивидуальных тепловых приборов учета у конечных потребителей, возможно оценить лишь усреднённые тепловые потери в трубопроводах. Полученные данные не дают полного представления о состоянии изоляции на конкретных участках тепловых сетей, к тому же такие приборы учета имеют погрешность, что влияет на точность показаний.

Существуют способы математического моделирования тепловых потерь при помощи различных программных комплексов. Данная методика получает широкое распространение и развитие в теплотранспортных компаниях.

Проблема определения тепловых потерь с учетом всех эксплуатационных особенностей является актуальной по сей день, существующие методы оценки тепловых потерь требует совершенствования, а также разработки новых методов.

Таким образом целью магистерской диссертации является исследование методик расчета и оценки потерь теплоты через теплоизоляционные конструкции водяных сетей для совершенствования существующих технологий анализа тепловых потерь.

Для достижения поставленной цели был поставлены и решены следующие задачи:

- 1) Провести анализ теоретических данных по определению тепловых потерь в трубопроводах;
- 2) Усовершенствовать методику оценки и определения тепловых потерь в сетях теплоснабжения, позволяющую учитывать не только способы

прокладки и конфигурацию трубопроводов, но также изменение теплозащитных свойств изоляции в процессе эксплуатации;

- 3) Дать сравнительный анализ влияния эксплуатационных факторов состояния тепловой изоляции на величину тепловой потери;
- 4) С использованием предлагаемой расчетной методики дать рекомендации по оптимизации тепловых потерь через теплоизоляцию выбранной конструкции водяной сети.

2 Методика определения тепловых потерь в сетях теплоснабжения

2.1 Адаптация применяемой методики расчета для пгт. Березовка

В данной главе представлено решение задачи аналитическим методом определения тепловых потерь в трубопроводах с учетом реальных условий эксплуатации сетей.

В качестве объекта исследования был рассмотрен фрагмент типичной двухтрубной тепловой сети пгт. Березовка Красноярского края (рисунок 3).

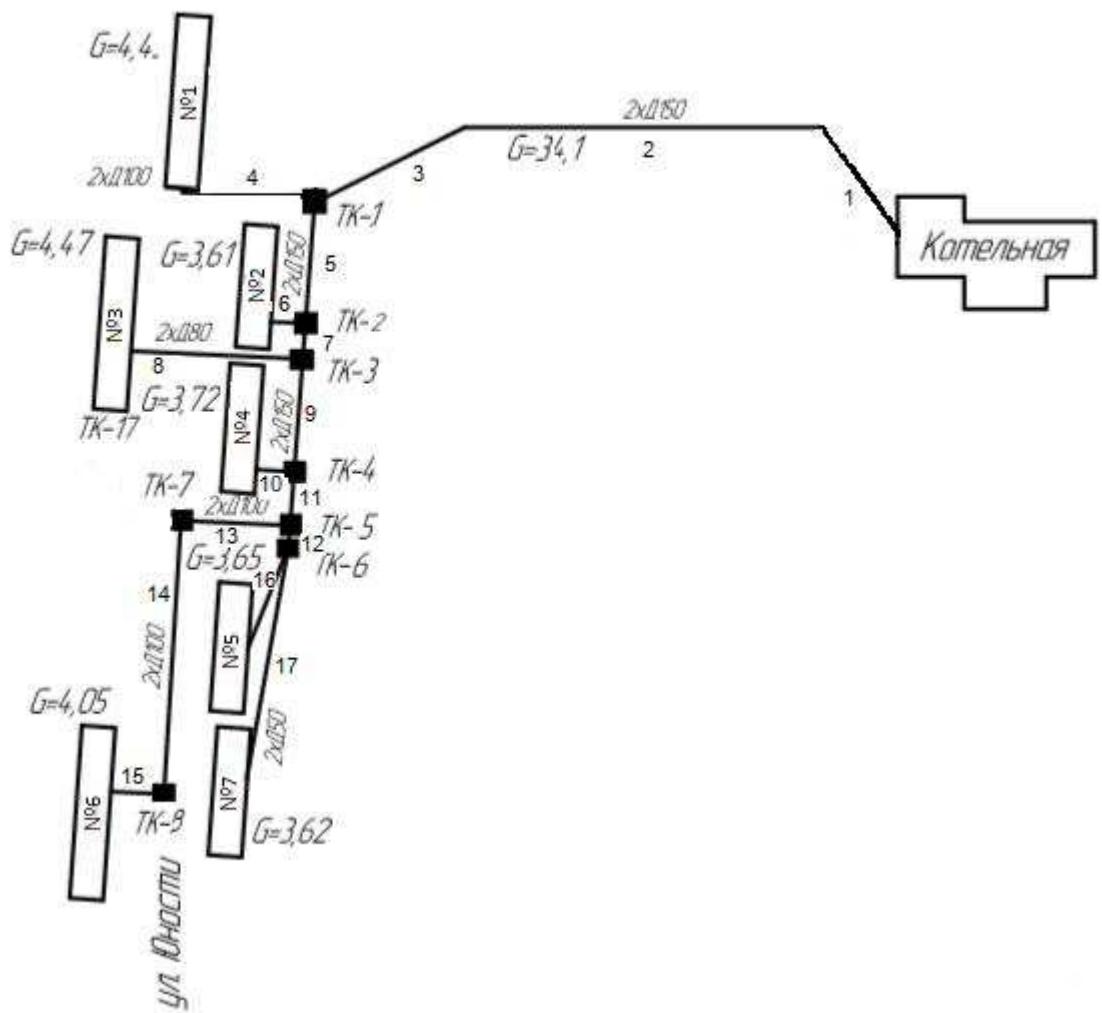


Рисунок 3 – Фрагмент прокладки типичной двухтрубной тепловой сети пгт. Березовка

В рассматриваемом примере, основным способом прокладки трубопроводов является, традиционный метод подземной кладки в непроходных каналах. Данный метод выбран ввиду эстетических, архитектурно-планировочных соображениях.

Конструкция непроходного канала состоит из лотков и плит перекрытий, выполненных из железобетонных элементов. Характеристики участков приведены в таблице 1.

Расчет потерь теплоты при качественном регулировании производится при средних климатических условиях района (таблица 2).

Существует ряд допущений при решении задач по определению тепловых потерь, а именно:

- 1) При расчете не рассматривается сопротивление стенок труб и каналов в которых они размещены, это вызвано тем, что их термическое сопротивление значительно меньше сопротивления изоляционного слоя;
- 2) В расчетах не учитывают термическое сопротивление теплоотдачи от рабочего тела к внутренней стенке трубы, поскольку оно меньше сопротивления наружной поверхности изоляции;
- 3) Термодинамические характеристики веществ являются постоянными и известными величинами
- 4) Слои изоляции, которым покрыт трубопровод состоят из: слоя черновой (основной) изоляции, слоя чистовой изоляции (рубероид, стеклоткань и пр.), в конце наносится защитное покрытие (оцинкованное железо или алюминий). Ввиду того, что чистовая изоляция и защитное покрытие обладают значительно меньшим термическим сопротивлением по сравнению с сопротивлением черновой изоляции, их сопротивлением при проведении анализа можно пренебречь;

- 5) Полученные расчетные данные применимы для системы с закрытым типом теплоснабжения;
- 6) Считается, что система герметична и не имеет дефектов, а значит утечки теплоносителя отсутствуют.

Таблица 1 – Характеристики тепловой сети в пгт. Березовка

| № уч - ка | Условный диаметр , мм | Длина участка, м | Способ прокладки | Тип изоляции | Наружный диаметр изоляции, мм | Условия эксплуатации и состояние изоляции |
|-----------|-----------------------|------------------|------------------|--------------|-------------------------------|---|
| 1 | 150 | 80 | Подземный | MB | 250 | Влажный воздух в канале |
| 2 | 150 | 140 | | | 250 | Влажный воздух в канале |
| 3 | 150 | 410 | | | 250 | Влажный воздух в канале |
| 4 | 100 | 130 | | | 250 | 40% увлажнение изоляции |
| 5 | 150 | 140 | | | 250 | Влажный воздух в канале |
| 6 | 150 | 145 | | | 250 | Влажный воздух в канале |
| 7 | 150 | 50 | | | 250 | 100% увлажнение изоляции |
| 8 | 80 | 160 | | | 160 | 100% увлажнение изоляции |
| 9 | 150 | 140 | | | 250 | Деформация изоляции |
| 10 | 80 | 145 | | | 160 | Влажный воздух в канале |
| 11 | 150 | 70 | | | 250 | Влажный воздух в канале |
| 12 | 150 | 30 | | | 250 | Влажный воздух в канале |
| 13 | 100 | 100 | | | 180 | Влажный воздух в канале |
| 14 | 100 | 240 | | | 180 | 100% увлажнение изоляции |
| 15 | 100 | 80 | | | 180 | 100% увлажнение изоляции |
| 16 | 50 | 140 | | | 177 | Влажный воздух в канале |
| 17 | 50 | 210 | | | 177 | Влажный воздух в канале |

Таблица 2 – Климатические данные пгт. Березовка

| № п/п | Параметр | Значение |
|-------|--|----------|
| 1 | Температура наружного воздуха, К | 253 |
| 2 | Средняя температура грунта на глубине заложения (5 м) подземного трубопровода, К | 278 |
| 3 | Температура прямой сетевой воды, К | 373 |
| 4 | Температура обратной сетевой воды, К | 363 |
| 5 | Средняя скорость ветра, м/с | 5 |

Описанные выше факторы отображают реальный эксплуатационный режим работы большинства тепловых сетей РФ.

2.2 Основные термодинамические уравнения для определения тепловых потерь

Решение задач по определению потерь тепла при транспортировке теплоносителя от источника к конечному потребителю, основано на базовых законах термодинамики и темпломассообмена.

При помощи выражения 7 осуществляется расчет удельных тепловых потерь через слой изоляции трубопроводов.

$$q = \frac{T_B - T_H}{R}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}, \quad (7)$$

где T_B – температура рабочего тела (воды) в тепловых сетях, К;

T_H – температура окружающей среды, К;

R – термическое сопротивление теплопровода.

При более детальном рассмотрении тепловых сетей, отмечается следующее, теплота, передаваемая теплоносителем к окружающей среде, сначала проходит внутреннюю поверхность трубопровода, затем слой

материала, из которого сделана труба, далее слой тепловой изоляции и в конце проходит через наружную поверхность тепловой изоляции [50].

$$R = R_{\text{вн}} + R_{\text{тр}} + R_{\text{и}} + R_{\text{н}}, \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{Вт}}, \quad (8)$$

где $R_{\text{вн}}$ – является термическим сопротивлением внутренней поверхности трубопровода, $(\text{м} \cdot \text{К})/\text{Вт}$;

$R_{\text{тр}}$ – является термическим сопротивлением стенки трубы, $(\text{м} \cdot \text{К})/\text{Вт}$;

$R_{\text{и}}$ – является термическим сопротивлением теплоизоляционного слоя;

$R_{\text{н}}$ – является термическим сопротивлением наружного слоя тепловой изоляции.

Согласно классическим законам термодинамики, термическое сопротивление цилиндрической поверхности находится по выражению (9):

$$R = \frac{1}{\pi \cdot d \cdot a}, \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{Вт}}, \quad (9)$$

где d – диаметр трубопровода, м;

α – коэффициент теплоотдачи на поверхности, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Для расчета коэффициента теплоотдачи от поверхности к окружающей среде используют выражение (10):

$$\alpha = \alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к.естеств.}} + \alpha_{\text{к.вынуж.}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}, \quad (10)$$

где $\alpha_{\text{л}}$ – коэффициент теплоотдачи излучением, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

$\alpha_{\text{к.естеств.}}$ – коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

$\alpha_{\text{к.вынуж.}}$ – коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

При расчете коэффициента теплоотдачи излучением применяют выражение (11):

$$\alpha_{\text{л}} = C \cdot \frac{\left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_H}{100}\right)^4}{T - T_H}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}, \quad (11)$$

где $C = 3,8 \dots 4,3$, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коэффициент излучения.

T - температура излучающей поверхности, К.

Принято использовать формулу Нуссельта для определения коэффициента теплоотдачи от горизонтальной трубы к воздуху при естественной конвекции, выражение (12):

$$\alpha_{\text{к.естеств.}} = 1,16 \cdot \sqrt[4]{\frac{T - T_H}{d}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}. \quad (12)$$

В зависимости от числа Рейнольдса определяется коэффициент конвективной теплоотдачи при вынужденной конвекции воздуха.

$$Re = \frac{\omega \cdot d}{v}, \quad (13)$$

где ω – средняя скорость движения среды, м/с;

v – кинематическая вязкость среды, $\text{м}^2/\text{с}$.

Число Рейнольдса определяет режим течения среды, при значениях $Re \geq 1 \cdot 10^3$ наблюдается переходный или турбулентный режим течения среды.

$$\alpha_{\text{к.вын.}} = 0,216 \cdot \frac{\beta_{\phi} \cdot Re^{0.6} \cdot \lambda_{\text{cp}}}{d}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}. \quad (14)$$

Если значение числа Рейнольдса $Re < 1 \cdot 10^3$, то наблюдается ламинарный режим течения среды [51]. При ламинарном режиме, расчет

коэффициента теплоотдачи при вынужденной конвекции рассчитывается при помощи выражения (15):

$$\alpha_{\text{к.вын.}} = 0,43 \cdot \frac{\beta_\phi \cdot Re^{0.5} \cdot \lambda_{\text{ср}}}{d}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}, \quad (15)$$

где $\lambda_{\text{ср}}$ – коэффициент теплопроводности среды, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

d – диаметр цилиндрической поверхности, м;

β_ϕ – поправочный коэффициент, учитывающий направление движения среды относительно поверхности.

В таблице 3 отражены значения поправочного коэффициента на направление ветра.

Таблица 3 – Значения поправочного коэффициента учитывающий направление потока ветра.

| $\Phi, \text{град}$ | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 |
|---------------------|----|----|------|------|------|------|------|------|------|
| β_ϕ | 1 | 1 | 0,98 | 0,95 | 0,87 | 0,77 | 0,67 | 0,60 | 0,55 |

Как правило, поправочный коэффициент принимается усреднённым $\beta_\phi = 0,821$, это связано с тем, что направление ветра является переменной величиной и установить угол Φ относительно оси расположения трубопровода достаточно сложно.

Исходя из заранее известных начальных данных, а именно, температура поверхности изолированного трубопровода, задача по определению потерь теплоты, решается методом последовательных приближений: по заданному коэффициенту теплоотдачи на внешней части трубопровода, находят удельные теплопотери и температуру поверхности, следом делается проверка расхождений заранее принятой и получаемой расчетной величины α .

Выражение (16) позволяет вычислить термическое сопротивление в цилиндрическом слое:

$$R = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}, \frac{\text{м}\cdot\text{К}}{\text{Вт}}, \quad (16)$$

где λ – коэффициент отображающий теплопроводность слоя, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

d_2 – наружный диаметр трубопровода, м;

d_1 – внутренний диаметр трубопровода, м.

При помощи выражения (17) находятся удельные потери теплоты изолированных тепловых сетей.

$$q = \frac{\pi \cdot (T_{\text{в}} - T_{\text{н}})}{\frac{1}{2\lambda_{\text{из}}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{d_2 \cdot a_{\text{из}}}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}, \quad (17)$$

где $\lambda_{\text{из}}$ – коэффициент показывающий теплопроводность слоя, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

$a_{\text{из}}$ – полный коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к окружающей среде, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$;

d_2 – наружный диаметр слоя изоляции покрывающий трубопровод, м;

d_1 – наружный диаметр трубы, м.

Необходимо учитывать увлажнение слоя изоляции. От того, какое количество влаги способен вместить в себя материал, зависит его теплопроводность [52].

Эффективная теплопроводность увлажненного слоя изоляции рассчитывается по выражению (18):

$$\lambda_{\text{эфф}} = \lambda_{\text{из}} \cdot \varphi_{\text{из}} + \lambda_{\text{ж}} \cdot \varphi_{\text{ж}}; \quad (18)$$

$$\varphi_{\text{из}} + \varphi_{\text{ж}} = 1; \quad (19)$$

$$\varphi_{\text{ж}}^{\max} = f. \quad (20)$$

Здесь $\varphi_{из}$, $\varphi_{ж}$ – объемная доля теплоизоляции и жидкости соответственно;

$\lambda_{из}, \lambda_{ж}$ – справочный коэффициент теплопроводности изоляции и жидкости соответственно, Вт/(м·К);

$\varphi_{ж}^{max}$ – максимальная доля жидкости в материале изоляции;

f – показывает какую пористость имеет изоляционный слой.

Принято считать, что одна из самых больших удельных тепловых потерь связана с влажным воздухом, который взаимодействует с подземными трубопроводами. Влажность содержащаяся в воздухе со временем начинает проникать в слой изоляции и вытеснять оттуда сухой воздух, в результате коэффициент теплопроводности резко возрастает, что ведет за собой увеличение тепловых потерь на участке. Как правило при расчетах коэффициент влагосодержания принимают $\varphi_{ж}^{max} = 0,0126$ [53].

При полном отсутствие слоя изоляции тепловые потери рассчитываются по выражению (21):

$$q = \frac{\pi \cdot (T_B - T_H)}{\frac{1}{d_2 \cdot a_{tp}}}, \text{ Вт}, \quad (21)$$

где a_{tp} – полный коэффициент теплоотдачи от стенки трубы, Вт/(м²·К).

Как показывает практика, при оценке удельных тепловых потерь, учесть все нарушения теплоизоляционной конструкции достаточно тяжело и трудоемко, к тому же большинство дефектов, увидеть не представляется возможным [54]. В этом случае, при расчете происходит имитация отсутствующего или деформированного слоя изоляции, путем исключения из области решения сегмента, габариты которого приравнивают к габаритам поврежденных участков, что продемонстрировано на рисунке 4.

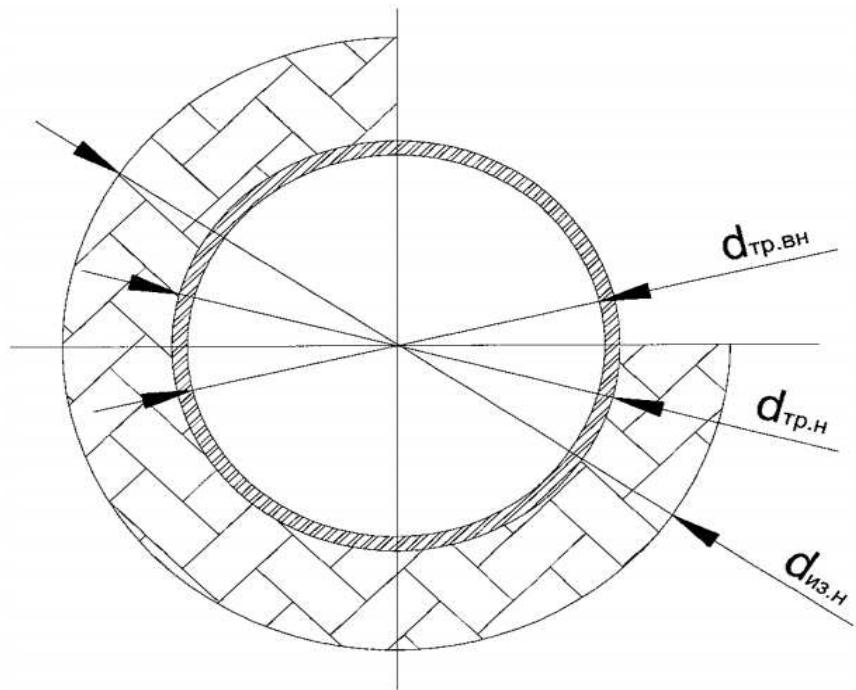


Рисунок 4 – Сечение трубопровода с частично отсутствующей изоляцией:
 $d_{\text{тр.вн}}$ — внутренний диаметр трубопровода; $d_{\text{тр.н}}$ — наружный диаметр
 трубопровода; $d_{\text{из.н}}$ — наружный диаметр теплоизоляции

Тепловые потери энергии через слой изоляции найдем по формуле (22):

$$q_{F1} = \frac{T_b - T_h}{\frac{\delta_{\text{из}}}{\lambda_{\text{из}}} + \frac{1}{a_{\text{из}}}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \quad (22)$$

где T_b – температура среды в трубе. К;

T_h – температура наружного воздуха. К;

$\delta_{\text{из}}$ – толщина теплоизоляционной конструкции тепловой сети, м;

$\lambda_{\text{из}}$ – коэффициент теплопроводности тепловой изоляции, Вт/(м·К);

$a_{\text{из}}$ – коэффициент теплоотдачи внешней стенки изоляционной конструкции, Вт/ (м²·К).

Величину тепловых потерь через неизолированный участок сети находят по выражению:

$$q_{F2} = \frac{T_b - T_h}{\frac{1}{a_{tp}}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \quad (23)$$

где $a_{из}$ – коэффициент теплоотдачи от поверхности трубопровода в окружающую среду, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Для перевода поверхностной плотности теплового потока ($\text{Вт}/\text{м}^2$) в линейную ($\text{Вт}/\text{м}$), отнесенную к 1 м длины трубопровода, используют выражение, которое применяется для перевода измеренных потерь тепловой энергии с помощью поверхностных датчиков плотности теплового потока в линейные потери:

$$q_L = q_F \cdot L_{окр}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}, \quad (24)$$

где $L_{окр}$ – длина дуги окружности.

Длина дуги недостающей части сегмента теплоизоляционного слоя находится по выражению:

$$L_{окр2} = L_{окр} \cdot \Psi, \text{ м}, \quad (25)$$

где Ψ – длина дуги окружности.

Тогда длина дуги изолированной поверхности находится по выражению (26):

$$L_{окр1} = L_{окр} \cdot (1 - \Psi), \text{ м}. \quad (26)$$

Результирующие тепловые потери считаются по формуле

$$q_L = q_{F1} \cdot L_{окр1} + q_{F2} \cdot L_{окр2}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}. \quad (27)$$

Следует отметить, что не менее частым дефектом слоя изоляции является ее деформация. При расчетах размер воздушной прослойки, которая

образуется вследствие деформации конструкции, принимают равной толщине верхней уплотнительной части теплоизоляционной конструкции [55].

Данный случай продемонстрирован на рисунке 5.

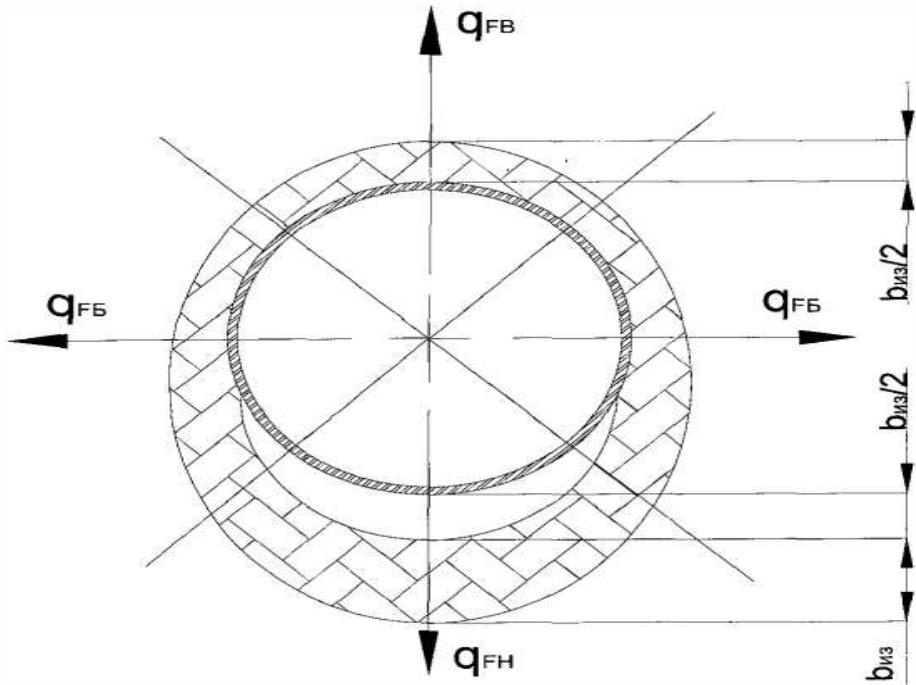


Рисунок 5 – Схема области решения для теплопровода с умеренно деформированной изоляцией (4 сегмента разбиения):

q_{FB} - тепловой поток через верхнюю поверхность трубопровода, Вт/м²;

q_{FB} - тепловой поток через боковую поверхность трубопровода, Вт/м²;

q_{FH} - тепловой поток через нижнюю поверхность трубопровода, Вт/м²;

$b_{из}$ - толщина теплоизоляционного слоя, м.

Тепловой поток через верхнюю поверхность определяют по формуле:

$$q_{FB} = \frac{T_B - T_H}{\frac{\delta_{из}/2 + 1}{\lambda_{из}} + \frac{1}{a_{из}}}, \text{ Вт} \quad (28)$$

Тепловой поток через боковую поверхность определяются по формуле:

$$q_{FB} = \frac{T_B - T_H}{\frac{\delta_{из} + 1}{\lambda_{из}} + \frac{1}{a_{из}}}, \text{ Вт} \quad (29)$$

Тепловой поток через нижнюю поверхность находят по формуле:

$$q_{FH} = \frac{T_B - T_H}{\frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} + \frac{\delta_{из}/2}{\lambda_{эф.воз}} + \frac{1}{a_{из}}} \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \quad (30)$$

где $\lambda_{эф.воз}$ - эффективная теплопроводность воздушной прослойки между стенкой стальной трубы и провисшей изоляцией, Вт/(м·К).

Отметим, что в процессе эксплуатации, когда в качестве изоляционного материала используют ППУ, в провисшем слое изоляции скапливается влага. Это обстоятельство также влияет на изменение коэффициента теплопередачи и величину потерь теплоты.

В данном случае, была улучшена методика расчета путем добавления поправочных коэффициентов, учитывающих этот слой влаги и воздушной прослойки.

Схема области решения при частичной деформации изоляции со скопившейся влагой в провисшем слое изоляции отображена на рисунке 6.

В случае наличия скопившейся влаги в провисшем слое изоляции, потери через нижнюю стенку считаются как для трехслойной изоляции:

$$q_{FH} = \frac{T_B - T_H}{\frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} + \frac{\delta_{воз}/\Delta\delta_{пров}}{\lambda_{эф.воз}} + \frac{\delta_{вл}/\Delta\delta_{пров}}{\lambda_{эф.вл}} + \frac{1}{a_{из}}} \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \quad (31)$$

где $\delta_{вл}$ – толщина водяного слоя, м;

$\lambda_{эф.вл}$ – эффективная теплопроводность водяного слоя, Вт/(м·К).

Для перевода в линейные потери, необходимо определить длину дуги окружности верхней, боковой и нижней частей трубопровода:

$$l_B = \frac{\pi \cdot (d_{тр.н} + \delta_{из})}{4}, \text{ м}; \quad (32)$$

$$l_B = \frac{\pi \cdot (d_{тр.н} + 2 \cdot \delta_{из})}{4}, \text{ м}; \quad (33)$$

$$l_H = \frac{\pi \cdot (d_{tp,H} + 3 \cdot \delta_{iz})}{4}, \text{ М.} \quad (34)$$

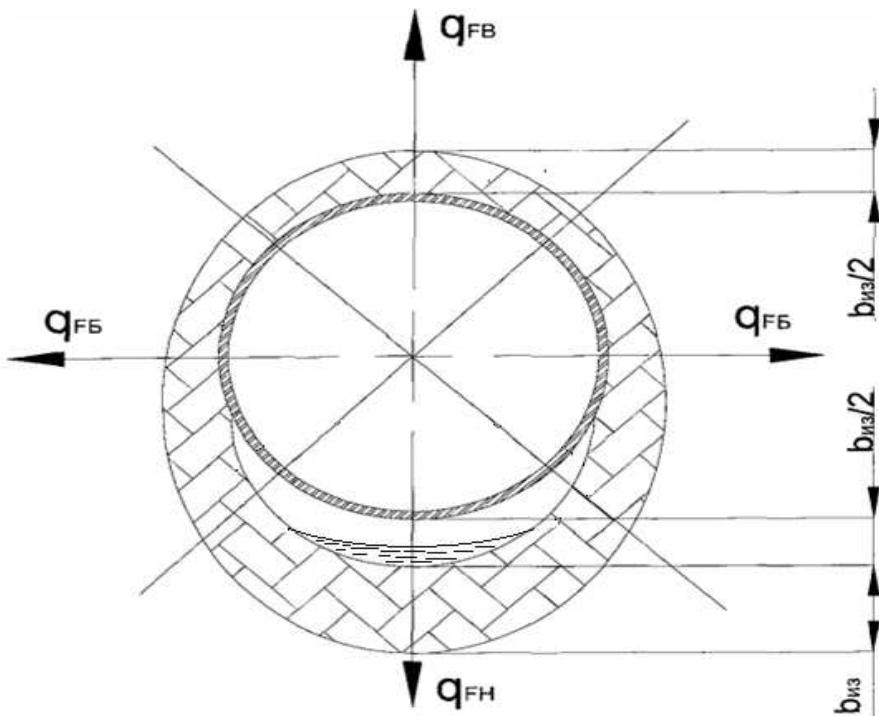


Рисунок 6 – Схема области решения для трубопровода при частичной деформации изоляции со скопившейся влагой в провисшем слое изоляции

Линейные тепловые потери от теплопровода с деформированной изоляцией находятся суммированием произведений тепловых потоков на длину соответствующей дуги:

$$q_L = q_{FB} \cdot l_B + 2 \cdot q_{FB} \cdot l_B + q_{FH} \cdot l_H, \frac{B_T}{M}. \quad (35)$$

Доказано, что точность нахождения тепловых потерь методом разбиения сечений трубопровода на сегменты, не существенно увеличивается при возрастании количества разбиений.

В методике, предложенной Цыганковой Ю.С. [56] учтены теплофизические характеристики изоляции, которые способны оказать большое влияние на термическое сопротивление теплоизоляционного контура. Данная методика была усовершенствована, путем учета дополнительной потери тепла от скопившейся влаги в провисшем слое изоляции, (см. формулу 31).

2.3 Методика расчета

Цыганковой Ю.С. был построен алгоритм расчета удельных тепловых потерь, позволивший существенно оптимизировать известные аналитические методики [56]. При этом с использованием программы Matlab был разработан программный комплекс, обладающий следующим рядом преимуществ:

1. Сокращаются временные затраты на расчетную часть.
2. Учитывает влияние влажности, температуры материала в конструкции, возможность усадки конструкции, а также фактор старения и разрушения материала в процессе эксплуатации. Перечисленные факторы, приближают полученные тепловые потери к реальным значениям.
3. Появляется возможность увеличения шага расчета, что повышает точность полученных данных.
4. Появляется возможность проведения анализа тепловых потерь на всем участке тепловой сети и на каждом конкретном участке.
5. Основываясь на полученные данные составляются обоснованные планы по ремонтным работам на участках тепловых сетей.
6. В представленном программном комплексе существует возможность оценки качества получаемой тепловой энергии, за счет расчета падения температуры в подающем теплопроводе.

3 Анализ влияния эксплуатационных факторов на тепловые потери трубопроводом

В данном разделе представлены результаты расчетов схемы теплоснабжения пгт. Березовка, с применением усовершенствованной методики [56].

На рисунке 7 показан чертеж второго участка тепловой сети пгт. Березовка.

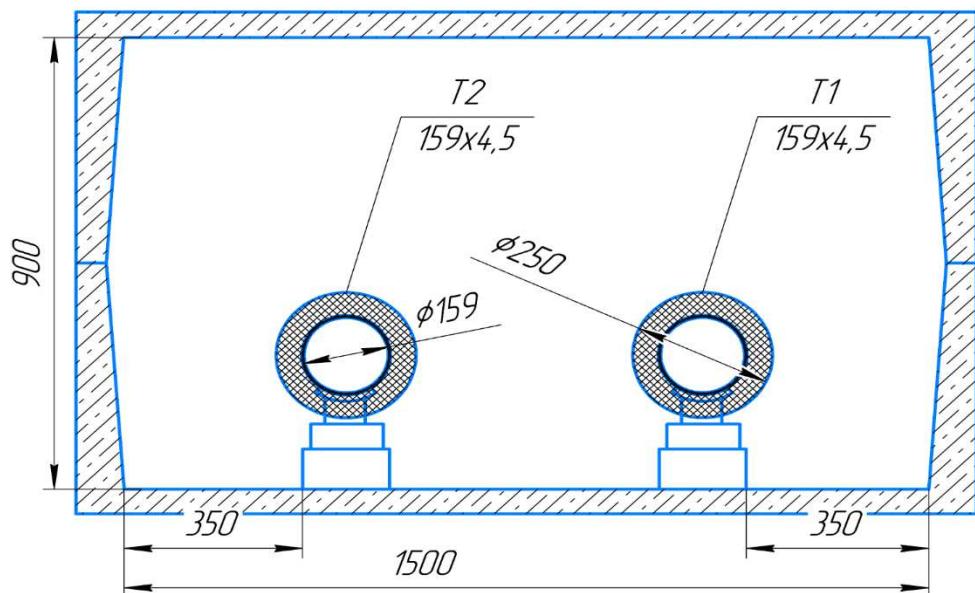


Рисунок 7 – Схема прокладки тепловой сети в пгт. Березовка на втором участке

Как видно из чертежа, в пгт. Березовка применяется подземная канальная кладка, в качестве изоляции используется минеральная вата.

В таблице 4 отражены температурные изменения температур рабочего тела в подающем и обратном трубопроводах, а также распределение температур по поверхности изоляционного слоя трубопроводов.

Таблица 4 – Распределение температур подающего и обратного трубопроводов.

| № участка | $T_{из.под}$, К | $T_{из.о}$, К | $T_{гв}$, К | $T_{хв}$, К |
|-----------|------------------|----------------|--------------|--------------|
| 1 | 310 | 293 | 368,2 | 321 |
| 2 | 305,2 | 297,3 | 363,4 | 321,2 |
| 3 | 305,1 | 297,4 | 362,7 | 323,3 |
| 4 | 304,9 | 299,6 | 362,6 | 323,4 |
| 5 | 304,9 | 298,5 | 362,6 | 323,1 |
| 6 | 304,8 | 298,5 | 362,2 | 323,3 |
| 7 | 304,9 | 298,5 | 362,1 | 323,5 |
| 8 | 304,8 | 299 | 362,0 | 323,5 |
| 9 | 304,5 | 298,7 | 361,9 | 323,5 |
| 10 | 304,3 | 298,9 | 362,0 | 323,5 |
| 11 | 304,5 | 299 | 362,6 | 323,5 |
| 12 | 304,5 | 299 | 362,5 | 323,2 |
| 13 | 303,8 | 298,9 | 362,3 | 323,3 |
| 14 | 303,4 | 299,2 | 362,2 | 323,3 |
| 15 | 303,2 | 299,4 | 362,0 | 323,3 |
| 16 | 302,5 | 299,4 | 361,9 | 323,4 |
| 17 | 302,7 | 299,4 | 361,9 | 323,4 |

Отметим, что теплосодержание сетевой воды в обратном трубопроводе меньше чем в подающем. Поэтому во время охлаждения подающего трубопровода происходит, нагрев воздуха внутри канала, температура которого ориентировочно равна температуре сетевой воды в обратном трубопроводе. Этот процесс вызывает незначительное изменение температур сетевой воды в обратном трубопроводе.

Следует отметить, что ввиду сравнительно небольшого удаления конечных потребителей от источника теплоснабжения, изменение температуры теплоносителя по длине участка незначительны. Однако существуют трубопроводы, длина которых растягивается на сотни километров, в таких случаях снижение температуры рабочего тела существенно.

3.1 Результаты применения методики расчета

Оценим удельную тепловую потерю для первого участка теплосети с учетом реального эксплуатационного состояния изоляционного слоя.

Исходные данные для расчета представлены в таблицах 1, 4.

При помощи формулы (12) найдем коэффициент теплоотдачи от горизонтальной трубы к воздуху при естественной конвекции:

$$a_{\text{к.естеств.}} = 1,16 \cdot \sqrt[4]{\frac{310-293}{0,25}} = 3,331, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Используя выражение (11) получим коэффициент теплоотдачи излучением:

$$a_{\text{л}} = C \cdot \frac{\left(\frac{310}{100}\right)^4 - \left(\frac{293}{100}\right)^4}{310-293} = 4,498, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Число Рейнольдса определяет режим течения среды, при значениях $Re \geq 1 \cdot 10^3$ наблюдается переходный или турбулентный режим течения среды.

СНиП устанавливают допустимую и оптимальную скорость воздуха в канальной кладке, в пределах от 0,1 м/с до 0,15 м/с, но не более 0,32 м/с. Выберем усредненное значение скорости воздуха $w = 0,15$ м/с.

$$Re = \frac{0,15 \cdot 0,25}{15 \cdot 10^{-6}} = 2,5 \cdot 10^3.$$

В данном случае получился турбулентный режим течения воды. Далее применяя формулу (14) определяем коэффициент конвективной теплоотдачи при вынужденной конвекции воздуха.

$$a_{\text{к.вын.}} = 0,216 \cdot \frac{0,87 \cdot (2,5 \cdot 10^3)^{0,6} \cdot 0,026}{0,25} = 2,112, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Применив выражение (10) найдем коэффициент теплоотдачи от поверхности к окружающей среды Вт/(м²·К):

$$a = 4,498 + 3,331 + 2,112 = 9,942 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Эффективная теплопроводность увлажненного слоя изоляции рассчитывается по выражению (18), Вт/(м·К):

$$\lambda_{\text{эфф}} = 0,035 \cdot 0,9 + 0,6 \cdot 0,1 = 0,092.$$

При помощи выражения (17) находятся удельные потери тепла изолированных тепловых сетей:

$$q = \frac{3,14 \cdot (368,2 - 293)}{\frac{1}{2 \cdot 0,092} \cdot \ln \frac{0,25}{0,15} + \frac{1}{0,25 \cdot 9,942}} = 73,9, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Для остальных участков сети, расчет производился по аналогичной методике с учетом особенностей действительного состояния теплоизоляции.

Результаты расчета представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Удельные тепловые потери участков тепловой сети

| № уч - ка | Условный диаметр , мм | Длина участка, м | Наружный диаметр изоляции, мм | Условия эксплуатации и состояние изоляции | Удельные тепловые потери подающего трубопровода Вт/м ² | Удельные тепловые потери обратного трубопровода Вт/м ² |
|-----------|-----------------------|------------------|-------------------------------|---|---|---|
| 1 | 150 | 80 | 250 | 40% увлажнение изоляции | 73,9 | 65,6 |
| 2 | 150 | 140 | 250 | 40% увлажнение изоляции | 69,4 | 61,5 |
| 3 | 150 | 410 | 250 | 40% увлажнение изоляции | 67,8 | 59,8 |
| 4 | 100 | 130 | 250 | 40% увлажнение изоляции | 68,3 | 63,5 |
| 5 | 150 | 140 | 250 | Влажный воздух в канале | 51,1 | 48,3 |
| 6 | 150 | 145 | 250 | Влажный воздух в канале | 50,8 | 47,1 |
| 7 | 150 | 50 | 250 | 100% увлажнение изоляции | 78,9 | 71,1 |
| 8 | 80 | 160 | 160 | 100% увлажнение изоляции | 83,6 | 75,9 |
| 9 | 150 | 140 | 250 | Деформация изоляции | 78,5 | 46,3 |
| 10 | 80 | 145 | 160 | Влажный воздух в канале | 68,1 | 42,5 |
| 11 | 150 | 70 | 250 | Влажный воздух в канале | 67,4 | 51,6 |
| 12 | 150 | 30 | 250 | Влажный воздух в канале | 65,3 | 43,6 |
| 13 | 100 | 100 | 180 | Влажный воздух в канале | 68,5 | 39,8 |
| 14 | 100 | 240 | 180 | 100% увлажнение изоляции | 76,3 | 61,77 |
| 15 | 100 | 80 | 180 | 100% увлажнение изоляции | 75,1 | 61,6 |
| 16 | 50 | 140 | 177 | Влажный воздух в канале | 66,2 | 42,9 |
| 17 | 50 | 210 | 177 | Влажный воздух в канале | 68,7 | 42,6 |

Для расчета абсолютной потери по всей длине участка используем формулу 36:

$$L_1 = \pi \cdot d_2 \cdot L \cdot \frac{q}{1000}, \text{ кВт}; \quad (36)$$

$$L = 3,14 \cdot 0,25 \cdot 80 \cdot \frac{73,9}{1000} = 4,643, \text{ кВт};$$

Для остальных участков тепловой сети, расчет производился по аналогичной методике с учетом особенностей действительного состояния теплоизоляции. Результаты представлены в сводной таблице 6.

Таблица 6 – Абсолютные тепловые потери по всей длине участка.

| № уч - ка | Длина участка, м | Наружный диаметр изоляции, мм | Абсолютные потери тепла по подающему трубопроводу, кВт | Абсолютные потери тепла по обратному трубопроводу, кВт |
|-----------|------------------|-------------------------------|--|--|
| 1 | 80 | 250 | 4,64 | 1,22 |
| 2 | 140 | 250 | 7,63 | 1,88 |
| 3 | 410 | 250 | 21,82 | 5,22 |
| 4 | 130 | 250 | 6,97 | 1,77 |
| 5 | 140 | 250 | 5,62 | 1,08 |
| 6 | 145 | 250 | 5,78 | 1,09 |
| 7 | 50 | 250 | 3,10 | 0,88 |
| 8 | 160 | 160 | 6,72 | 3,19 |
| 9 | 140 | 250 | 8,63 | 1,60 |
| 10 | 145 | 160 | 4,96 | 1,32 |
| 11 | 70 | 250 | 3,70 | 0,76 |
| 12 | 30 | 250 | 1,54 | 0,27 |
| 13 | 100 | 180 | 3,87 | 0,86 |
| 14 | 240 | 180 | 10,35 | 3,55 |
| 15 | 80 | 180 | 3,40 | 1,16 |
| 16 | 140 | 177 | 5,15 | 1,25 |
| 17 | 210 | 177 | 8,02 | 1,93 |

Суммарные потери по всей длине участка подающего трубопровода составляют 111,89 кВт, по обратному трубопроводу 29,02 кВт.

3.2 Анализ полученных расчетных данных

Перейдем к рассмотрению потерь тепловой энергии при транспортировании теплоносителя. Под понятием «проектные потери», принято считать потери, которые находятся по методичке, отраженной в [57], в данном источнике, в учет идет только год укладки сетей и их геометрические параметры, в учет не идут эксплуатационные факторы и реальное состояние теплоизоляционных конструкций тепловых сетей.

Расчетные тепловые потери – это потери с учетом реального состояния тепловой изоляции с учетом внешних факторов, в которых эксплуатируется трубопровод (таблицы 7 и 8).

Таблица 7 – Расчетные и проектные тепловые потери в подающем трубопроводе рассмотренной тепловой сети.

| № участка | Условия эксплуатации и состояние изоляции | Удельные тепловые потери подающего трубопровода Вт/м ² | Нормативные тепловые потери подающего трубопровода Вт/м ² | Относительные потери Δ, % |
|-----------|---|---|--|---------------------------|
| 1 | 40% увлажнение изоляции | 73,9 | 65,2 | 13,34% |
| 2 | 40% увлажнение изоляции | 69,4 | 58,6 | 18,43% |
| 3 | 40% увлажнение изоляции | 67,8 | 57,1 | 18,74% |
| 4 | 40% увлажнение изоляции | 68,3 | 58,3 | 17,15% |
| 5 | Влажный воздух в канале | 51,1 | 45,5 | 12,31% |
| 6 | Влажный воздух в канале | 50,8 | 44,7 | 13,65% |
| 7 | 100% увлажнение изоляции | 78,9 | 50,1 | 57,49% |
| 8 | 100% увлажнение изоляции | 83,6 | 62,5 | 33,76% |
| 9 | Деформация изоляции | 78,5 | 59,3 | 32,38% |
| 10 | Влажный воздух в канале | 68,1 | 63,1 | 7,92% |
| 11 | Влажный воздух в канале | 67,4 | 61,4 | 9,77% |
| 12 | Влажный воздух в канале | 65,3 | 59,7 | 9,38% |
| 13 | Влажный воздух в канале | 68,5 | 62,3 | 9,95% |
| 14 | 100% увлажнение изоляции | 76,3 | 44,1 | 73,02% |
| 15 | 100% увлажнение изоляции | 75,1 | 43,1 | 74,25% |
| 16 | Влажный воздух в канале | 66,2 | 63,5 | 4,25% |
| 17 | Влажный воздух в канале | 68,7 | 64,1 | 7,18% |

На рисунке 8 показана разница нормативных и расчетных тепловых потерь по участкам тепловой сети подающего трубопровода.

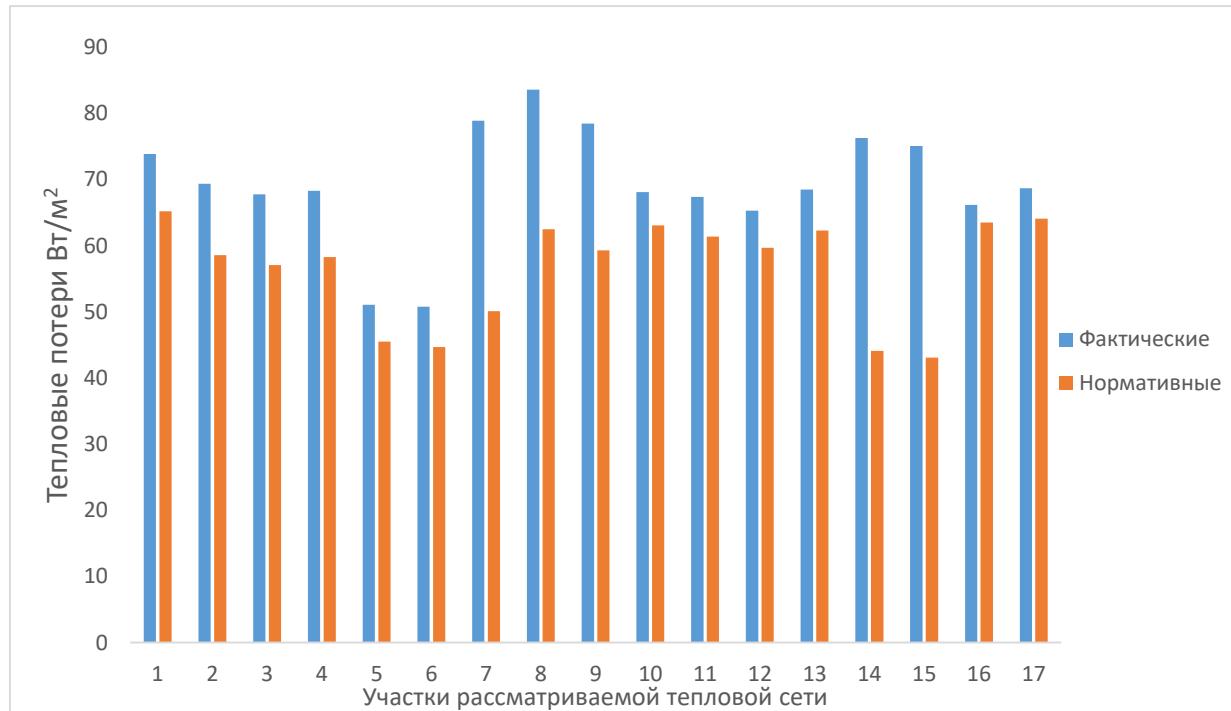


Рисунок 8 – Сравнение проектных и расчетных тепловых потерь подающего трубопровода

Исходя из полученных данных, видно, что самые большие потери в подающем трубопроводе, происходят при деформации и увлажнении слоя изоляции.

Таблица 8 – Расчетные и проектные тепловые потери в обратном трубопроводе рассмотренной тепловой сети.

| № участка | Условия эксплуатации и состояние изоляции | Удельные тепловые потери обратного трубопровода Вт/м ² | Нормативные тепловые потери обратного трубопровода Вт/м ² | Относительные потеря Δ, % |
|-----------|---|---|--|---------------------------|
| 1 | 40% увлажнение изоляции | 65,6 | 57,2 | 14,69% |
| 2 | 40% увлажнение изоляции | 61,5 | 53,6 | 14,74% |
| 3 | 40% увлажнение изоляции | 59,8 | 47,8 | 25,10% |
| 4 | 40% увлажнение изоляции | 63,5 | 51,3 | 23,78% |
| 5 | Влажный воздух в канале | 48,3 | 41,7 | 15,83% |
| 6 | Влажный воздух в канале | 47,1 | 40,8 | 15,44% |
| 7 | 100% увлажнение изоляции | 71,1 | 43,2 | 64,58% |
| 8 | 100% увлажнение изоляции | 75,9 | 44,1 | 72,11% |
| 9 | Деформация изоляции | 46,3 | 39,2 | 18,11% |
| 10 | Влажный воздух в канале | 42,5 | 38,2 | 11,26% |
| 11 | Влажный воздух в канале | 51,6 | 45,5 | 13,41% |
| 12 | Влажный воздух в канале | 43,6 | 39,3 | 10,94% |
| 13 | Влажный воздух в канале | 39,8 | 34,2 | 16,37% |
| 14 | 100% увлажнение изоляции | 61,77 | 46,4 | 33,13% |
| 15 | 100% увлажнение изоляции | 61,6 | 42,3 | 45,63% |
| 16 | Влажный воздух в канале | 42,9 | 38,9 | 10,28% |
| 17 | Влажный воздух в канале | 42,6 | 37,7 | 13,00% |

На рисунке 9 показана разница нормативных и расчетных тепловых потерь по участкам тепловой сети обратного трубопровода.

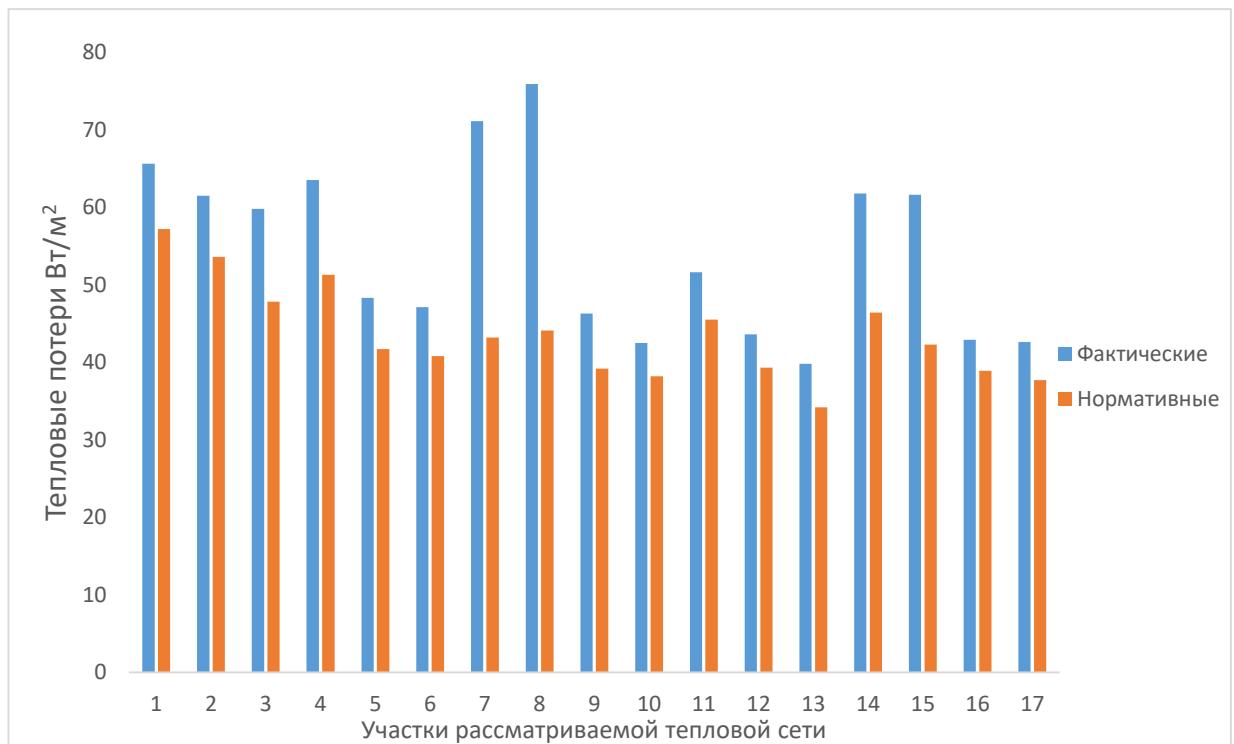


Рисунок 9 – Сравнение проектных и расчетных тепловых потерь обратного трубопровода

Из полученных данных видно, что учет реального состояния слоя изоляции на трубопроводе, при расчете, ведет к увеличению теплопотерь.

В зависимости от масштабности и вида дефекта изоляции тепловые потери могут изменяться в широком диапазоне, в несколько раз превышая проектные потери.

Особо сильное влияние на увеличение тепловых потерь оказывает эксплуатационный фактор, увлажнение изоляции – увеличение потерь более чем в два раза (рисунок 10).

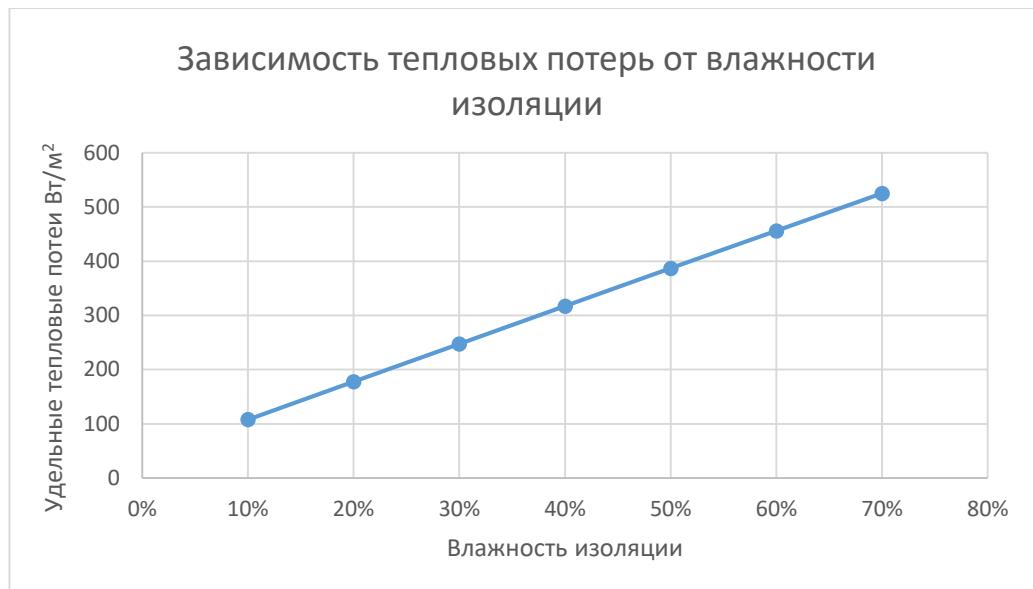


Рисунок 10 – Зависимость тепловых потерь от влажности изоляции

Стоит отметить, что также немало важную роль в увеличении коэффициента теплопередачи с поверхности трубы играет разрушение теплоизоляционной конструкции (рисунок 11). При отсутствии 25 % изоляции на трубопроводе тепловые потери для ППУ изоляции возрастают в 7,5 раз, для МВ в 5,6 раз.

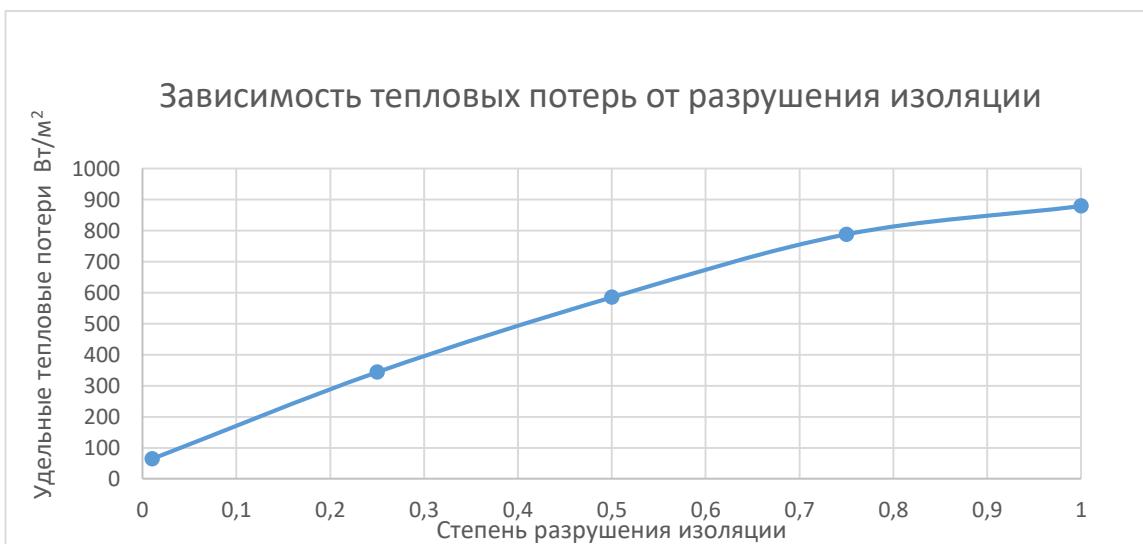


Рисунок 11 – Зависимость тепловых потерь от разрушения изоляции

Умеренная деформация теплоизоляции приводит к увеличению потерь тепловой энергии через теплоизоляционные конструкции трубопроводов для пенополиуретановой изоляции в 1,5 раза, для минеральной ваты в 1,4 раза.

Из-за воздействия природных явлений таких, как теплоперепад температур и другими эксплуатационными факторами, происходит деформация трубопровода, которая превращает нижнюю часть профиля теплоизоляционной конструкции в эллипс.

Полученные результаты, отраженные в таблице 7,8 наглядно показывают целесообразность применения данной методики и демонстрирует ее преимущества перед [57]. Данный расчет позволяет наиболее точно оценивать тепловые потери в сетях и своевременно ликвидировать причины повышения тепловых потерь. Следует отметить, что расчетный способ определения тепловых потерь, значительно менее затратный, чем проведение дорогостоящих испытаний по установлению фактических значений тепловых потерь. Предлагаемая методика расчета позволяет более оперативно оценивать тепловые потери для любой конфигурации тепловой сети при наличии датчиков температур воды в тепловых камерах, гигрометров и других датчиков. В то время как проведение натурных испытаний накладывает ряд ограничений на выбор испытуемых участков. Это приводит к тому, что испытания проводятся очень редко, как правило, в неотопительный период и в основном на магистральных тепловых сетях.

3.3 Методы редуктирования тепловых потерь на тепловых сетях

Для уменьшения потерь тепла в канальных тепловых магистралях необходимо максимально устранять попадание влаги в канал. Для этого необходимо дополнительным слоем цементного раствора с примесью резины заделывать соединительные швы каналов (рисунок 12, п.3), все на

соприкасающиеся с грунтом поверхности канала также целесообразно наносить битум, либо обрабатывать олеофобным покрытием.

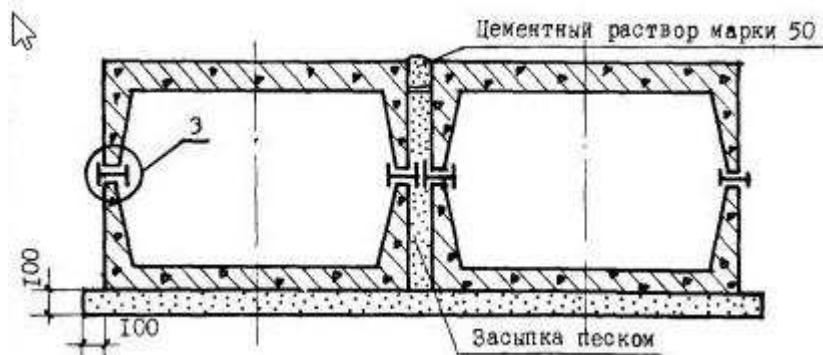


Рисунок 12 – Заделывание швов в канальной прокладке

Для бесканальной прокладки наносить олеофобное покрытие на наружный слой изоляции, прокладывать все тепловые сети согласно стандарта [58]. Необходимый уровень энергосбережения во многом зависит от качества проектирования. Проектирование следует осуществлять на основании действующих нормативных документов, среди которых основным является СНиП 41-03-2003 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов», утвержденный и введенный в действие с июня 2003 г. Так же отмечают, что с целью дополнительного влагоотвода используют дренирующий слой грунта – песка или геотекстиля.

Также отмечается, что использование дополнительной вентиляции каналов способствует уменьшения влажности канала, которая уменьшает интенсивность тепломассообмена. Увеличение интенсивности вентиляции воздуха, является системой с естественным побуждением воздуха за счет гравитационного напора шахт при этом одна из шахт является приточной, вторая вытяжной. При этом происходит осушение каналов, которое также может уменьшить скорость коррозии металлических конструкций до 60% [59].

Преобладающим способом прокладки тепловых сетей в Российской Федерации является прокладка в непроходных каналах с минераловатной

теплоизоляцией (80 %). Опыт эксплуатации показал, что использование в качестве изоляционного материала минеральной ваты не обеспечивает экономичное теплоснабжение потребителей, т.к. в процессе эксплуатации теплозащитные свойства теплоизоляционных конструкций резко снижаются вследствие большой частоты повреждений труб из-за наружной коррозии, увлажнения и разрушения изоляции, что приводит к значительным потерям тепла (в 2-3 раза превышающим нормативные) [60]. Использование ППУ изоляции способствует увеличению времени естественной деформации изоляции относительно изоляции из мин. ваты, обладает меньшими абсорбирующими свойствами и более низким коэффициентом температуропроводности, что сказывается на более высоких теплоизолирующих показателях материала.

3.4 Выводы по главе

В данной главе продемонстрированы преимущества использования улучшенной методики разработанной Цаганковой Ю.С.. Данная улучшенная методика позволяет с высокой точностью определять участки теплотрасс с наибольшими теплопотерями, что может позволить расставлять приоритеты при планировании ремонта участков тепловых сетей.

Проведен анализ влияния распространённых эксплуатационных дефектов тепловой изоляции на удельную тепловую потерю, установлено, что наибольшее влияние на тепловую потерю оказывает степень разрушения слоя изоляции; также на тепловую потерю значительно влияет влагосодержание в теплоизоляционном слое.

Проведенный анализ показывает неэффективность использования устаревших материалов и технологий прокладки сети, что требует внедрения

в эксплуатацию современных теплоизоляционных материалов и способов прокладки тепловой сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был проведен анализ современного состояния и проблем теплоизоляционных конструкций в РФ.

Установлено, что используемые методики не учитывают ряд важных эксплуатационных факторов, которые в значительной степени влияют на коэффициент теплопередачи.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем.

Показано, что наиболее эффективным методом, позволяющим оперативно оценить тепловые потери через теплоизоляционный слой в процессе эксплуатации трубопроводов, является предложенный метод Цыганковой Ю.С.

Взятая за основу эта методика была усовершенствована путем добавления эксплуатационного фактора деформации изоляции, при котором в образовавшемся провисании скапливается влага. Приведено уравнение, позволяющее определить тепловые потери через такую изоляцию.

Дан сравнительный анализ влияния эксплуатационных факторов на величину тепловых потерь через изоляцию. Установлено, что наиболее сильное влияние на тепловые потери оказывает разрушение и увлажнение слоя тепловой изоляции.

Предложен ряд технических рекомендаций для уменьшения тепловых потерь тепловых сетей – использование ППУ в качестве теплоизоляционного слоя, а также вентилирование каналов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Иванов В.В. К оценке тепловых потерь подземных теплотрасс/В.В. Иванов, В.В. Василенко, С.В. Черныш//Известия вузов. Строительство. - 2000. - №1. - С.65-69.
2. Закирова И.А. Совершенствование тепловой изоляции тепловых сетей с применением тонкопленочных покрытий / И.А. Закирова, Н.Д. Чичирова // Труды Академэнерго. 2016. № 3. С. 43-57.
3. Кузнецов Г.В., Озерова И.П., Половников В.Ю., Цыганкова Ю.С. Оценка фактических потерь тепла при транспортировке теплоносителя с учетом технического состояния и реальных условий эксплуатации тепловых сетей // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 4. – С. 56 – 60.
4. Кузнецов Г.В., Озерова И.П., Половников В.Ю., Цыганкова Ю.С. Оценка потенциала энергосбережения в системе транспортирования тепловой энергии // Энергетик. – 2012. – № 4. – С. 38 – 40.
5. Половников В.Ю., Цыганкова Ю.С. Определение потерь тепла через теплоизоляционные конструкции теплотрубопроводов // Энергия и человек: Сборник трудов Международной молодежной научной школы. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С. 222 – 226.
6. Abildinova S. K., Baydyusenov G. N. Analysis of transport losses of thermal energy through heat-insulating structures of pipelines of heating networks: coll. of scientific papers on the materials of the international scientific-practical conference «Integration processes of world scientific and technological development» part II / APNI. Belgorod, 2017. P. 68–74.
7. Kanev S. N., Ivashkevich A. A. Calculation of heat loss in heat supply systems // Electronic scientific publication «Uchenyye zametki TOGU». 2013. v. 4. № 4. P. 1975–1998.

8. Lianying Z., Zhenni W., Xiaohu Y., Liwen J., Qunli Z., Wenju H. Thermo-economic analysis for directly-buried pipes insulation of district heating piping systems // Energy procedia. 2017. № 105. P. 3369–3376.
9. Дунаев А.В., Логунова Т.С., Кононова М.С. О целесообразности применения жидкой изоляции в тепловых сетях // Строительство. Материалы II Брянского международного инновационного форума. 2016. - 43-47 с.
10. Лобынцев Р.А., Вердиев Н.Ф. Тепловая изоляция трубопроводов тепловых сетей // Молодежь и научно-технический прогресс. Международная научнопрактическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. 2015/ - 210-212 с.
11. Путрюс Л.С. Выбор тепловой изоляции тепловых сетей // Наука и инновации в современных условиях. 2018. - 132-134 с.
12. Степанов А.В., Тимофеев А.М. Развитие строительной теплофизики в регионах холодного климата // Труды III Евразийского симпозиума: Пленарные доклады. Якутск: Изд-во ЯФ СО РАН, 2006. С. 170–176.
13. Михеев М.А. Основы теплопередачи. М.; Л.: Государственное энергетическое издательство, 1949. 397 с.
14. Оцисик М.Н. Сложный теплообмен. М.: Мир, 1976. 616 с.
15. Hawkey D.J.C. District heating in the UK: A Technological Innovation Systems analysis // Environmental Innovation and Societal Transitions. 2012. V. 5. P. 19–32.
16. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: МЭИ, 1999. 472 с.
17. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М.: Энергия, 1977. 344 с.
18. СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. М.: Изд-во стандартов, 2004. 25 с

- 19.Даниэлян П.И., Яницкий П.А. Температурный режим движения жидкости по двум параллельным трубам // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1988. № 3, С. 100–107.
- 20.Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. М.: Наука, 1984. 288 с.
- 21.Красников Г.Е., Нагорнов О.В., Старостин Н.В. Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 184 с.
- 22.Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоиздат, 1991. 304 с.
- 23.Методические указания по определению фактических объемов тепловой энергии, отпускаемой источниками тепла и реализуемых потребителям теплоснабжающими предприятиями Ленинградской области. – СПб.: Комитет экономического развития и инвестиционной деятельности Ленинградской области, 2008, 230 с.
- 24.СНиП 41-02-2003. Тепловые сети. – М.: Госстрой России, 2003.
- 25.М-001–2003. Метод постановки опыта и расчета коэффициента теплопроводности для сверхтонких тепловых изоляционных материалов, методические рекомендации по теплотехническим расчетам. М.: ФГУП НИИ «Сантехники», 2003, 25 с.
- 26.Беляев, В.С. Жидкая теплоизоляция Изоллат. – Екатеринбург: ООО «Специальные технологии». – 2012. – Режим доступа: www.isollat.ru.
- 27.Леонтьев, А.В. Термо Шилд. – Екатеринбург.: ООО «Thermo-Shild». – 2012. – Режим доступа: www.thermo-shield.ru.
- 28.Как работает Temp-Coat 101. – М.: ЗАО «ТеплоЭнерго». – 2012. – Режим доступа: www.temp-coat.ru.

- 29.Бояринцев, А.В. Корунд сверхтонкая теплоизоляция. – Волгоград: Волгоградский инновационный ресурсный центр. – 2012. – Режим доступа: www.nano34.ru.
- 30.Алимов Х.А., Тепловые сети. Актуальные проблемы и пути решения// Новости теплоснабжения. 2007.№11 (87).
- 31.Варламов В.А. Теплоизоляционные материалы для тепловых трасс в России // Символ науки. 2017. №1. С.54-56.
- 32.Ветер В.В. и др. К вопросу об использовании труб из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом для прокладки теплопроводов // Промышленная энергетика // 1997. №12. С. 17-18.
- 33.Варварский В.С., Ковылянский Я.А. Новые направления работ в области теплоснабжения // Энергетик. 1994. № 11. С. 6-8.
- 34.Иванов В.В., Букаров Н.В., Василенко В.В. Влияние увлажнения изоляции и грунта на тепловые потери подземных теплотрасс // Новости теплоснабжения.- 2002.- № 7 (23).- С. 32-33.
- 35.Иванов В.В., Вершинин Л.Б. Распределение температур и тепловых потоков в зоне прокладки теплотрасс // Вторая Российская национальная конференция по теплообмену. Теплопроводность, теплоизоляция. — М., 1998. Т. 7. С. 103- 105.
- 36.Иванов В.В., Шкrebko C. V. Моделирование тепловых процессов подземных бесканальных теплотрасс // Вторая Российская национальная конференция по теплообмену. Теплопроводность, теплоизоляция. - М., 1998. Т. 7.-С. 106- 108.
- 37.Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Оценка масштабов тепловых потерь в магистральных теплотрубопроводах в условиях затопления // Промышленная энергетика.- 2006.- J42 8.- С.32-34.

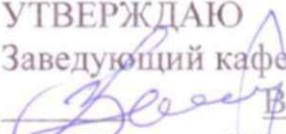
- 38.Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Затопление каналов тепловых сетей: причины и последствия // Новости теплоснабжения.- 2006.- № 08 (72).- С. 23 - 24.
- 39.Persson T, Wollerstrand J. Calculation of heat flow from buried pipes using a time dependent finite element model // 45th International Conference of Scandinavian Simulation Society. Copenhagen; 2004.- P. 223 - 227.
- 40.Claesson J, Bennet J, Hellstrom G. Multipole method to compute the conductive heat flows to and between pipes in a cylinder // Lund: Department of Building Technology and Mathematical Physics; 1987.- P. 101 - 109.
- 41.Методические указания по определению тепловых потерь в водяных тепловых сетях: РД 34.09.255-97.М.: СПО ОРГРЭС, 1988.- 18 с.
- 42.Кузнецов Г.В., Озерова И.П., Половников В.Ю., Цыганкова Ю.С. Оценка потенциала энергосбережения в системе транспортирования тепловой энергии // Энергетик.- 2012.- № 4.- С. 38 - 40.
- 43.Андианов Д.Е., Штыков Р.А., Уткин Ю.В. Проектирование и расчет тепловой сети промышленного предприятия на основе математических моделей // Промышленная энергетика.- 2004.- № 3.- С. 34 - 37.
- 44.Черныш С.В. Исследование и прогнозирование тепловых потерь подземных теплотрасс: Дис. канд.тех.наук: 05.23.03.- Ростов-на-Дону, 2000.- 165 с.-Библиогр.: с. 125 - 139.
- 45.Левкович В.В. Определение теплопотерь в водяных сетях по методике поучастковых испытаний.- Минск.: Изв. БГУ, 1956.- 28 с.
- 46.Крюков Л.А. Мягков А.А. Текущий контроль качества тепловой изоляции двухтрубных водяных сетей // Изв. вузов. Энергетика.- 1980.- № 5.-С. 108-111.
- 47.Цыганкова Ю.С. Декомпозиционный подход к расчету потерь теплоты в тепловых сетях // Научно-технические ведомости СПбГПУ .- 2012.- № 1.- С. 75 -81.

- 48.Кузнецов В.Г., Озерова И.П., Половников В.Ю., Цыганкова Ю.С. Оценка влияния нештатных условий эксплуатации тепловых сетей на увеличение транспортных тепловых потерь // Энергетика; эффективность, надежность, безопасность: Матер, докл. XVII Всерос. научн.-технич. конф.- Томск: Изд-во «СПБ Графике».- 2011.- С. 215 - 217.
- 49.Кузнецов В.Г., Озерова И.П., Половников В.Ю., Цыганкова Ю.С. Возможности теплосбережения в системе транспорта тепловой энергии // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: Матер, докл. XVII Всерос. научн.-технич. конф.- Томск: Изд-во «СПБ Графикс».- 2011.-С. 217-220.
- 50.СНиП 41.03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. М.: Изд-во стандартов.- 2004.- 25 с.
- 51.Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М.: Физматгиз, 1962.- 456 с.
- 52.Иванов В.В., Василенко В.В., Черныш С.В. К оценке тепловых потерь подземных теплотрасс // Изв. вузов. Строительство.- 2000.- № 1.- С. 66 - 69.
- 53.Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах.-М.: Энергия, 1967.- 167 с.
- 54.Носов В.Л. Влияние снегозаносимости на тепловые потери трубопроводов надземной прокладки в районах Крайнего Севера: Автореф. Дис.канд.тех.наук: 05.23.03.-Новосибирск, 1990.- 18 с.
- 55.Носов В.Л., Тишкевич З.П. Снижение тепловых потерь подземных трубопроводов // Основания, фундаменты и инженерные коммуникации в условиях Восточной Сибири и Крайнего Севера,- Красноярск, 1982,- С. 106- 109.
56. Цыганкова Ю.С. Программный комплекс по расчету фактических тепловых потерь и падения температуры теплоносителя по длине трубопровода в действующих тепловых сетях // Свидетельство о

государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011618250.— Бюлл.
прогр. № 4, 2011.

- 57.Методические указания по составлению энергетической характеристики для систем транспорта тепловой энергии по показателю «тепловые потери», часть 3: РД 153—34.20.523—2003.М.: СПО ОРГРЭС, 2003.— 28 с.
- 58.Схемы входного и операционного контроля качества строительно-монтажных работ, часть 4: тепловые сети, наружные газопроводы, автомобильные дороги и благоустройство.
- 59.Б. В. Яковлева «Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения», М., Издательство «Новости теплоснабжения», 2008 г.
- 60.Шарапов П.В., Ротов П.В. Регулирование нагрузки систем теплоснабжения. М.: Изд-во «Новости теплоснабжения», 2007

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
институт
Теплотехники и гидрогазодинамики
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

B.A. Кулагин
подпись инициалы, фамилия
« 23 » июня 2021 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ТЕПЛОТЫ ЧЕРЕЗ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

тема

13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

код и наименование направления

13.04.01.01 Энергетика теплотехнологий

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель



проф., д-р. техн. наук

A.P. Скуратов

подпись, дата

15.06.21.

должность,

ученая степень

ициалы, фамилия

I.B. Сорокин

ициалы, фамилия

Ю.Л. Липовка

ициалы, фамилия

Выпускник

Рецензент



проф., д-р. техн. наук

подпись, дата

18.06.2021

должность

ученая степень

Красноярск 2021