

На правах рукописи



ЛАПИН КОНСТАНТИН ВИКТОРОВИЧ

**МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ СЕТЕЙ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ФАКТИЧЕСКИЕ
ПОТЕРИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ**

Специальность 2.4.5. – Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань - 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на кафедре «Экономика и организация производства». Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания №075-03-2024-226 от 17.01.2024 г.

Научный
руководитель: доктор технических наук, доцент
Ахметова Ирина Гареевна

Официальные
оппоненты: **Половников Вячеслав Юрьевич**, д.т.н., доцент,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет», Научно-образовательный
центр И.Н. Бутакова, профессор

Пузаков Вячеслав Сергеевич, к.т.н., ООО «Бюро
Энергетика», генеральный директор

Ведущая
организация: **Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого», г. Санкт-Петербург**

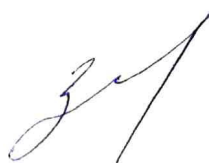
Защита состоится «03» декабря 2024 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.310.02, при ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд. Д.-224, тел./факс (843) 519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.02.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и на официальном сайте КГЭУ <http://www.kgeu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ш.Г. Зиганшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Развитие систем централизованного теплоснабжения сопряжено с постоянным поиском резервов сбережения тепловой энергии. Снижение тепловых потерь напрямую влияет на показатели эффективности транспортировки тепловой энергии. В связи с этим для теплоснабжающих организаций остается актуальным вопрос определения фактических потерь тепловой энергии в условиях эксплуатации тепловых сетей. Данный вопрос решается путем разработки методики проведения испытаний на фактические потери тепловой энергии в тепловых сетях централизованного теплоснабжения, находящихся в режиме эксплуатации.

Важным аспектом является отсутствие возможности проведения испытаний теплосети на фактические потери тепловой энергии по действующим методикам в отопительный период по причине необходимости прекращения теплоснабжения потребителей. В летний период проведение испытаний возможно в ограниченное время плановых отключений потребителей, но при этом уменьшается время, располагаемое для ремонтов тепловых сетей и источников тепловой энергии. Проведение испытаний требует значительных подготовительных работ, материальных ресурсов.

Имитируемые при испытаниях стационарные параметры тепловой энергии, распределение температуры теплоносителя в циркуляционном кольце не соответствуют реальным параметрам в условиях эксплуатации тепловых сетей в осенне-зимний период. Исходя из постоянных теплофизических изменений в работе системы теплоснабжения, результаты испытаний должны иметь динамический характер для случая нестационарного режима.

Степень научной разработанности проблемы. Вопросами определения фактических потерь тепловой энергии в тепловых сетях энергетических систем, исследованием процессов теплообмена с окружающей трубопроводы средой занимаются многие ученые и эксперты энергетической отрасли. Ключевыми авторами в этой области являются Соколов Е.Я., Николаев А.А., Зингер Н.М., Аксенов М.А., Манюк В.И., Қанлинский Я.И., Хиж Э.Б., Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Гусаков А.А., и др. На оптимизацию систем транспорта и распределения тепловой энергии, моделирования тепловых режимов, анализу потерь тепловой энергии в сетях направлены научные исследования таких ученых, как Половников В.Ю., Кузнецов Г.В., Бадах В.Ф., Цыганкова Е.С., Пузаков В.С. Математическому моделированию тепловых потерь, обусловленных изменением свойств изоляции при эксплуатации трубопроводов, посвящены исследования Мунябина Л.И., Арефьева Н.Н., Иванова В.В., Черныша С.В., Букарова Н.В., Шкробко С.В., Чернышевой Л. А., Андрианова Д.Е., Штыкова Р.А., Уткина Ю.В., Слепченка В.С., Ронделя А.Н., Шаповаловой Н.Н., Умеркина Г.Х., Dolla Rosa A., Eriksson D. и др.

Объект исследования – участки тепловых сетей в системах централизованного теплоснабжения населенных пунктов.

Предмет исследования – фактические тепловые потери в сетях централизованного теплоснабжения.

Цель работы заключается в разработке методики проведения испытаний на фактические потери тепловой энергии тепловых сетей централизованного теплоснабжения, находящихся в режиме эксплуатации.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Получение, систематизация фактических и нормативных данных об изменениях параметров тепловой энергии по участкам сетей централизованного теплоснабжения.

2. Сравнение фактических и нормативных данных о параметрах тепловой энергии по участкам тепловых сетей, выявление факторов, влияющих на потери тепловой энергии в нестационарном режиме.

3. Выявление зависимостей и построение графиков зависимости изменения фактических потерь тепловой энергии от скорости изменения температуры теплоносителя в тепловой сети.

4. Разработка и апробация методики проведения испытаний на фактические потери тепловой энергии тепловых сетей централизованного теплоснабжения, находящихся в режиме эксплуатации.

Научная новизна.

1. Определен критерий для расчета тепловых потерь через теплоизоляционные конструкции трубопроводов тепловых сетей в нестационарном режиме.

2. Определена математическая зависимость изменения тепловых потерь на участке трубопроводов от скорости изменения температуры теплоносителя в теплосети для нестационарного режима работы.

3. Разработана и апробирована методика проведения испытаний на фактические потери тепловой энергии тепловых сетей централизованного теплоснабжения, находящихся в нестационарном режиме эксплуатации (в режиме реального времени без ограничения теплоснабжения потребителей).

4. Решена задача цифровизации мониторинга потерь тепловой энергии по участкам действующей теплосети.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что параметры тепловой энергии, полученные с использованием средств измерений и системы дистанционной передачи показаний приборов, позволили определить критерий для расчета тепловых потерь через теплоизоляционные конструкции трубопроводов тепловых сетей в нестационарном режиме; позволили разработать методический подход для определения фактических потерь тепловой энергии на участках тепловых сетей с изменяющейся температурой теплоносителя; разработать методику проведения испытаний на фактические потери тепловой энергии тепловых сетей централизованного теплоснабжения, находящихся в нестационарном режиме эксплуатации (в режиме реального времени без ограничения теплоснабжения потребителей).

Практическая значимость работы.

1. Разработана методика проведения испытаний на фактические потери тепловой энергии в тепловых сетях централизованного теплоснабжения, находящихся в режиме эксплуатации, позволяет обеспечить выполнение следующих мероприятий:

- мониторинг сверхнормативных потерь тепловой энергии по участкам действующей теплосети;
- проведение испытаний тепловых сетей на фактические потери тепловой энергии без ограничения теплоснабжения потребителей.

Методика внедрена в теплоснабжающих организациях коммунального комплекса АО «Татэнерго», АО «Казэнерго» (Акты внедрения).

2. Разработаны программные продукты на основании предложенных автором алгоритма и методического подхода к определению фактических потерь тепловой энергии в тепловых сетях централизованного теплоснабжения (Свидетельства о регистрации).

Положения, выносимые на защиту:

1. Критерий для расчета тепловых потерь через теплоизоляционные конструкции трубопроводов тепловых сетей в нестационарном режиме - скорость изменения температуры теплоносителя в начале участка теплосети.

2. Зависимость изменения тепловых потерь на участке трубопроводов от скорости изменения температуры теплоносителя в теплосети для нестационарного режима работы.

3. Методика проведения испытаний на фактические потери тепловой энергии тепловых сетей централизованного теплоснабжения, находящихся в нестационарном режиме эксплуатации (в режиме реального времени без ограничения теплоснабжения потребителей).

Методология и методы исследования. В процессе исследования применялись теоретические и экспериментальные методы, в том числе методы эмпирического исследования, математической статистики, экспертных оценок, а также общенаучные методы исследования в рамках сравнительного, логического, статистического анализа. База данных, принятая за основу исследования, состоит из статистических и отчетных информационных данных, материалов, характеризующих производственно-хозяйственную деятельность теплоснабжающих организаций Республики Татарстан, экспертные заключения, законодательные акты и другие нормативно-правовые документы.

Достоверность и обоснованность результатов работы обусловлены применением стандартных методик расчетов показателей теплоснабжения с применением современных прикладных программных продуктов и справочных данных, использованием аттестованной измерительной техники; обусловлены исследованиями фактических параметров тепловой энергии в тепловых сетях с использованием системы дистанционного сбора показаний приборов учета тепловой энергии на источниках теплоты и у потребителей, а также

применением нормативных методик расчетов нормативных потерь тепловой энергии и справочных данных о нормах потерь тепловой энергии.

Личное участие автора.

Результаты всех проведенных теоретических и экспериментальных исследований получены лично автором под руководством д.т.н., доцента Ахметовой Ирины Гареевны.

Автором получены, систематизированы фактические и нормативные данные об изменениях параметров тепловой энергии по участкам сетей централизованного теплоснабжения г. Казани. Выполнено сравнение фактических и нормативных данных о параметрах тепловой энергии по участкам тепловых сетей, выявлены факторы, влияющие на потери тепловой энергии в нестационарном режиме теплоснабжения. Выявлена зависимость и построены графики зависимости изменения фактических потерь тепловой энергии от скорости изменения температуры теплоносителя в тепловой сети. Разработана и апробирована методика проведения испытаний на фактические потери тепловой энергии тепловых сетей централизованного теплоснабжения, находящихся в режиме эксплуатации.

Автор принимал участие в обсуждении результатов, написании статей и представлении докладов на конференциях.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

По тематике и методам исследования диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.4.5. – Энергетические системы и комплексы в части пунктов:

П. 1 – «Разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств и принципов функционирования и методов расчета, алгоритмов и программ выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии в целом и их основного и вспомогательного оборудования» (п. 3 научной новизны – методика проведения испытаний на фактические потери тепловой энергии тепловых сетей централизованного теплоснабжения, находящихся в нестационарном режиме эксплуатации»).

П. 2 – «Математическое моделирование, численные и натурные исследования физико-химических и рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии, их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии» (п.п.1,2 научной новизны – определен критерий для расчета тепловых потерь через теплоизоляционные конструкции трубопроводов тепловых сетей в нестационарном режиме; – определена математическая зависимость изменения тепловых потерь на участке трубопроводов от скорости изменения температуры теплоносителя в теплосети для нестационарного режима работы).

П. 5 – «Разработки и исследования в области энергосбережения и ресурсосбережения при производстве тепловой и электрической энергии, при транспортировке тепловой, электрической энергии и энергоносителей в энергетических системах и комплексах» (п.4 научной новизны – решена задача цифровизации мониторинга потерь тепловой энергии по участкам действующей теплосети).

Апробация работы.

Основные положения работы, результаты теоретических и расчетных исследований обсуждались на 91-м и 92-м заседаниях Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (Узбекистан, г. Ташкент, 2019 г., Россия, г. Казань, 2020 г.); 92-м научном заседании «Надежность энергоснабжения потребителей в условиях их цифровизации» (Россия, г. Казань, 2020 г.); на Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения – 2022 «Энергетика и цифровая трансформация» (Россия, г. Казань, 2022 г.) и др.

Публикации.

По результатам диссертационного исследования опубликовано 11 работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, 2 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных цитирования Scopus.

Структура и объем работы.

Диссертация изложена на 166 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения. Основной текст диссертации содержит 17 рисунков и 15 таблиц (без учета приложений), список использованных источников содержит 154 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи исследования, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также основные положения, выносимые на защиту, проведена краткая характеристика работы.

В первой главе рассмотрены проблемы расчета фактических тепловых потерь на участках трубопроводов тепловых сетей с изменяющимися параметрами работы в нестационарном режиме. В системах централизованного теплоснабжения, из-за изменяющейся во времени температуры наружного воздуха в осенне-зимний период и в силу значительной протяженности и разветвленности тепловых сетей, существует нестационарный режим теплоснабжения, характеризующийся постоянным изменением температуры теплоносителя во всех точках тепловой системы.

Вследствие чего, на протяжении времени потери тепловой энергии от теплоносителя в окружающую среду имеют переменное значение – в таком

случае нестационарного режима расчет фактических потерь тепловой энергии в эксплуатируемых тепловых сетях в каждый момент времени по классическим формулам расчета теплопередачи затруднен.

Существующие нормативные документы по расчетам потерь тепловой энергии от сетей теплоснабжения и методики испытаний тепловых сетей на фактические тепловые потери предполагают расчет и наведение стационарного режима работы теплосети. Следовательно, результаты испытаний тепловых сетей на фактические потери дают статические значения для расчета потерь. В реальности исходя из постоянных теплофизических изменений в работе системы теплоснабжения, значения фактических потерь и результаты испытаний (поправочные коэффициенты к нормативным значениям потерь) должны иметь динамический характер для случая нестационарного режима.

Для решения вопроса разработки методики проведения испытаний на фактические потери тепловой энергии, находящихся в режиме эксплуатации, обосновано использование систем дистанционного сбора показаний средств измерений.

Вторая глава посвящена предложениям по решению поставленной задачи, для чего использованы методы исследования фактических потерь тепловой энергии на участках тепловых сетей с изменяющимися параметрами во времени (нестационарный режим) на основе сравнения значений потерь тепловой энергии во времени в расчетной и фактической моделях.

В качестве предмета исследования выбрана система теплоснабжения, состоящая из источника тепловой энергии РК «Савиново», тепловых энергоустановок потребителей, технологически связанных тепловыми сетями в Ново-Савиновском районе г. Казани. Данные об измерениях температуры теплоносителя в начале и в конце исследуемых участков тепловой сети фиксировались в системе дистанционного сбора показаний.

Построены модели расчетных (нормативных) и фактических тепловых потерь на участках теплосети в системе теплоснабжения. Сформирована расчетная база параметров теплоносителя по участкам трубопроводов, ранжированная относительно температуры теплоносителя во всем диапазоне применяемого температурного графика регулирования расхода тепловой энергии (на каждый градус Цельсия температуры теплоносителя).

Величина фактических потерь тепловой энергии для исследуемых участков тепловой сети в отопительном периоде 2021/2022 гг. рассчитана путем вычисления соотношения фактических потерь к нормативным (коэффициент К) по формуле:

$$K = \frac{T_{\tau_0}^{mn.нач} - T_{\tau_k}^{mn.кон}}{T_{\tau_0}^{mn.нач} - T_{norm}^{mn.кон}} \quad (1)$$

где $T_{\tau_0}^{mn.нач}$ - фактическая температура теплоносителя в начале исследуемого участка в подающей магистрали во время измерений (в момент

времени τ_0) по данным системы дистанционного сбора показаний, °С; $T_{\tau_k}^{тн.кон}$ - фактическая температура теплоносителя в конце исследуемого участка в подающей магистрали во время измерений (в момент времени τ_k) по данным системы дистанционного сбора показаний, °С; $T_{норм}^{тн.кон}$ - нормативная температура теплоносителя в конце исследуемого участка в подающей магистрали, °С.

Определение времени τ_k производится по формуле:

$$\tau_k = \tau_0 + W \quad (2)$$

где W – время прохождения температурной волны от начала участка теплосети до его конца, ч.

В процессе исследования определен критерий для расчета тепловых потерь через теплоизоляционные конструкции трубопроводов тепловых сетей в нестационарном режиме – скорость изменения температуры теплоносителя в начале участка теплосети.

Сравнение экспериментальных и нормативных данных о температуре теплоносителя в конце исследуемого участка тепловой сети показал то, что соотношение фактических и нормативных тепловых потерь изменяется во времени (установлено наличие случаев перехода сверхнормативных потерь тепловой энергии в состояние ниже норматива и наоборот). При этом наблюдается ряд переходных моментов, когда соотношение $K = 1$ соответствует количеству случаев изменения математического знака (с минуса на плюс и наоборот) скорости изменения температуры в начале участка теплосети.

Выполнено исследование взаимосвязи температурной волны и фактических потерь тепловой энергии (корреляционный анализ экспериментальных данных) исходя из полученной матрицы парных коэффициентов корреляции: 1) соотношение фактических и нормативных потерь тепловой энергии; 2) скорость изменения температуры теплоносителя в начале участка теплосети.

Согласно данным корреляционного анализа установлено:

- графическим методом то, что изменение во времени соотношения фактических и нормативных потерь тепловой энергии на участке трубопроводов зависит от скорости изменения температуры теплоносителя в теплосети, между коэффициентами корреляции существует сильная линейная зависимость (рисунок 1);



Рисунок 1 - Графики пары коэффициентов корреляции

- математическим методом статистического исследования путем аппроксимации данных методом наименьших квадратов получена математическая функция линейной регрессии, выражающая зависимость между собой коэффициентов корреляции (зависимость соотношения фактических и нормативных потерь тепловой энергии от скорости изменения температуры теплоносителя в теплосети для нестационарного режима), рисунок 2.

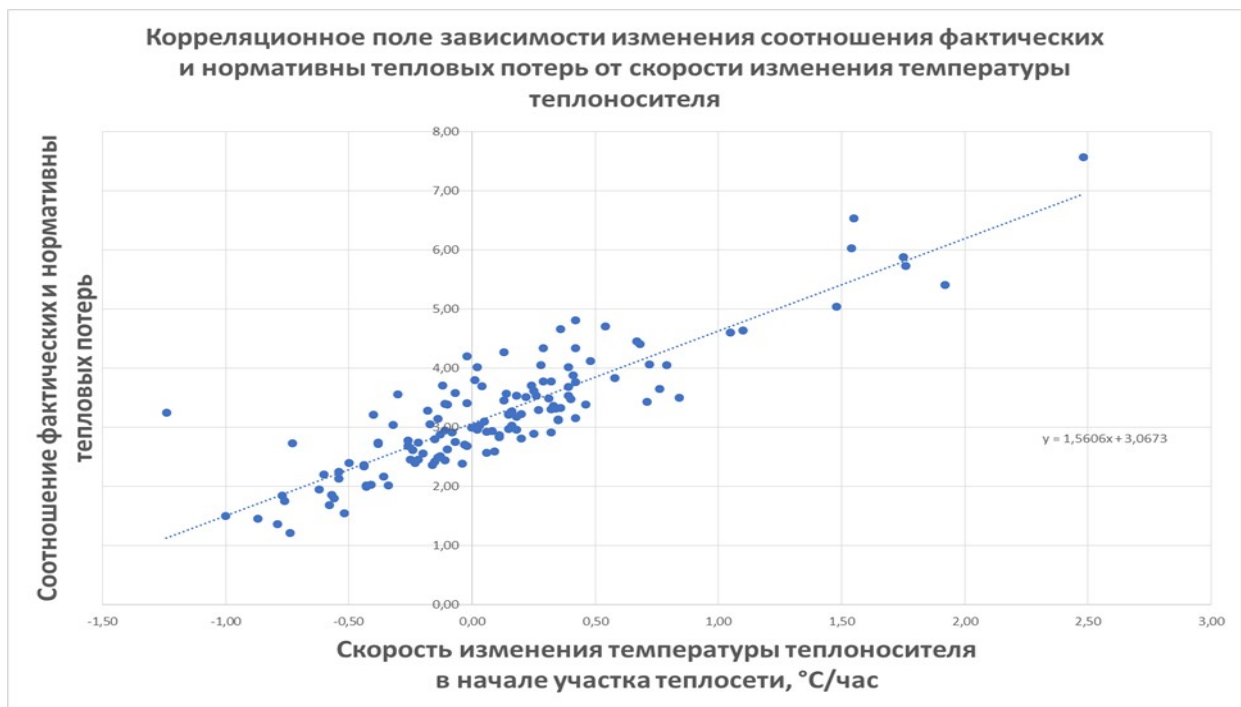


Рисунок 2 - График зависимости потерь тепловой энергии от скорости изменения температуры теплоносителя

Полученная линейная зависимость соотношения фактических и нормативных тепловых потерь от скорости изменения температуры теплоносителя в начале исследуемого участка теплосети от источника до конечного потребителя, полученная с использованием системы дистанционного съема показаний средств измерения температуры теплоносителя, имеет вид:

$$K = f(\Delta T_{\tau_0}^{mn.нач}) = A \times \Delta T_{\tau_0}^{mn.нач} + B \quad (3)$$

где A - коэффициент, характеризующий степень влияния скорости изменения температуры теплоносителя в начале участка теплосети $\Delta T_{\tau_0}^{mn.нач}$, $^{\circ}\text{C}$, на соотношение фактических и нормативных тепловых потерь тепловой энергии (для нестационарного процесса), $A > 0$; B - соотношение фактических и нормативных тепловых потерь при отсутствии изменения температуры теплоносителя в начале участка тепловой сети (при $\Delta T_{\tau_0}^{mn.нач} = 0$) для стационарного процесса, $B > 0$.

Регрессионный анализ показал то, что в нестационарном режиме работы теплосети изменение соотношения фактических и нормативных тепловых потерь тепловой энергии на участке теплосети (зависимая величина) обусловлено влиянием скорости изменения температуры теплоносителя. Когда $\Delta T_{\tau_0}^{mn.нач} \neq 0$ во времени, происходит усвоение либо отдача тепловой энергии материала теплоизоляции, металла и оболочки трубопровода, а также от окружающей теплосеть среды теплоносителю.

В третьей главе на основании полученных результатов исследования предложена к применению методика проведения испытаний на фактические потери тепловой энергии в тепловых сетях централизованного теплоснабжения, находящихся в эксплуатации.

В методике представлен следующий порядок проведения испытаний:

1. Выбор участков сети, подвергающихся испытаниям. При этом подготовка участков теплосети к испытаниям не требуется, тепловые пункты потребителей не отсоединяются от сети. Подготовка средств измерений температуры также не требуется, так как приборы учета на источнике тепловой энергии и в тепловых пунктах потребителей находятся в режиме коммерческой эксплуатации.

2. Фиксация измеренных фактических значений температуры теплоносителя в теплосети на выходе из источника тепловой энергии, в тепловых камерах теплосети и в тепловых пунктах потребителей.

3. Выполнение расчетов: скорости изменения фактической температуры теплоносителя в начале испытываемого участка; значения нормативной температуры теплоносителя в конце участка тепловой сети с учетом нормативной величины тепловых потерь; соотношения фактических и нормативных тепловых потерь;

4. Обработка результатов испытаний.

5. Составление уравнения, описывающего зависимость соотношения величины фактических и нормативных тепловых потерь от скорости изменения температуры теплоносителя в тепловой сети путем аппроксимация данных одной переменной методом наименьших квадратов. Согласно методики аппроксимация данных по функции линейной регрессии с использованием программных комплексов MS Excel.

6. Оценка результатов испытаний на предмет выявления увлажнения, подтопления, затопления участков трубопроводов качества тепловой изоляции.

Предложенная методика испытаний на фактические потери тепловой энергии в тепловых сетях централизованного теплоснабжения с использованием систем дистанционного сбора показаний средств измерений решает следующие проблемы испытаний:

- проблема расчета тепловых потерь в осенне-зимний период в нестационарных условиях при постоянно изменяющейся температуре теплоносителя;

- проблема проведения испытаний тепловых сетей на фактические потери тепловой энергии без ограничения теплоснабжения потребителей.

Разработанная методика имеет ряд преимуществ в сравнении с действующей методикой: математическое описание нестационарного режима теплообмена между теплоносителем и окружающей теплотрассу средой; отсутствие необходимости подготовки тепловых сетей к испытаниям; испытания проводятся во время эксплуатации сетей в осенне-зимний период; высокий охват испытаниями участков сетей; результаты испытаний более достоверны ввиду большего количества данных для обработки.

В четвертой главе представлены данные по апробированию методики проведения испытаний на фактические потери тепловой энергии тепловых сетей централизованного теплоснабжения, находящихся в эксплуатации.

Апробация методики выполнена в отношении 16 участков теплосети от РК «Савиново». По результатам обработки параметров испытаний путем аппроксимации данных (выполнено в MS Excel) получены функции линейной регрессии по каждому испытываемому участку теплосети.

Полученные в ходе апробации функции линейной зависимости соотношения фактических и нормативных тепловых потерь от скорости изменения температуры теплоносителя в начале исследуемого участка теплосети имеют предложенный в исследовании вид, описывающий изменения значения потерь тепловой энергии в условиях нестационарного режима теплообмена между теплоносителем и окружающей средой.

По результатам обработки параметров получены функции линейной регрессии по каждому участку теплосети, данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Функции линейной регрессии испытываемых участков теплосети

№ уч.	Функция линейной регрессии
1	$K = 0,3466 * \Delta T_{\tau_0}^{тн.нач} + 1,2097$
2	$K = 0,6709 * \Delta T_{\tau_0}^{тн.нач} + 1,2907$
3	$K = 0,7652 * \Delta T_{\tau_0}^{тн.нач} + 1,5020$
4	$K = 0,6540 * \Delta T_{\tau_0}^{тн.нач} + 1,1616$
5	$K = 0,8346 * \Delta T_{\tau_0}^{тн.нач} + 1,1647$
6	$K = 0,8881 * \Delta T_{\tau_0}^{тн.нач} + 3,6344$
7	$K = 1,0572 * \Delta T_{\tau_0}^{тн.нач} + 3,0621$
8	$K = 0,8661 * \Delta T_{\tau_0}^{тн.нач} + 1,7598$
9	$K = 0,3018 * \Delta T_{\tau_0}^{тн.нач} + 1,2549$
10	$K = 0,3476 * \Delta T_{\tau_0}^{тн.нач} + 0,9637$
11	$K = 0,3486 * \Delta T_{\tau_0}^{тн.нач} + 1,4848$
12	$K = 0,2845 * \Delta T_{\tau_0}^{тн.нач} + 1,7055$
13	$K = 1,2826 * \Delta T_{\tau_0}^{тн.нач} + 2,1776$
14	$K = 1,5606 * \Delta T_{\tau_0}^{тн.нач} + 3,0673$
15	$K = 0,9437 * \Delta T_{\tau_0}^{тн.нач} + 1,9876$
16	$K = 0,655 * \Delta T_{\tau_0}^{тн.нач} + 1,5815$

Оценка полученных результатов апробации методики на предмет выявления увлажнения, подтопления, затопления теплотрассы в стационарном режиме работы теплосети приведена в таблице 2.

Таблица 2 - Оценка результатов апробации методики

№ уч.	Наименование участка теплосети от РК «Савиново»	Коэффициент К при $\Delta T_{\tau_0}^{тн.нач} = 0$	Оценка состояния грунта	Оценка тепловой изоляции
1	до ИТП по ул. Гаврилова, 4	1,2097	Увлажнение грунта отсутствует	Увлажнение отсутствует
2	до ИТП по пр. Амирхана, 2	1,2907	Увлажнение грунта отсутствует	Увлажнение отсутствует
3	до ИТП по ул. Чуйкова, 93	1,502	Увлажнение грунта $\approx 12\%$	Увлажнение отсутствует
4	до ИТП по ул. Лаврентьева, 26	1,1616	Увлажнение грунта отсутствует	Увлажнение отсутствует
5	до ИТП по ул. Гаврилова, 54	1,1647	Увлажнение грунта отсутствует	Увлажнение отсутствует
6	до ИТП по ул. Чистопольская, 43	3,6344	Частичное затопление	Увлажнение имеется
7	до ИТП по ул. Четаева, 46	3,0621	Частичное затопление	Увлажнение имеется
8	до ИТП по ул. Ямашева, 65	1,7598	Увлажнение грунта $\approx 20\%$	Увлажнение отсутствует
9	до ИТП по ул. Мусина, 53	1,2549	Увлажнение грунта отсутствует	Увлажнение отсутствует

Продолжение таблицы 2 - Оценка результатов апробации методики

№ уч.	Наименование участка теплосети от РК «Савиново»	Коэффициент К при $\Delta T_{\tau_0}^{mn.nach} = 0$	Оценка состояния грунта	Оценка тепловой изоляции
10	до ИТП по ул. Ямашева, 74а	0,9637	Увлажнение грунта отсутствует	Увлажнение отсутствует
11	до ИТП по пр. Амирхана, 55	1,4848	Увлажнение грунта $\approx 10\%$	Увлажнение отсутствует
12	до ИТП по ул. Чуйкова, 26	1,7055	Увлажнение грунта $\approx 20\%$	Увлажнение отсутствует
13	до ИТП по ул. Меридианная, 11	2,1776	Имеется подтопление	Увлажнение имеется
14	до ИТП по ул. Четаева, 36	3,0673	Частичное затопление	Увлажнение имеется
15	до ИТП по ул. Абсалямова, 14	1,9876	Имеется подтопление	Увлажнение отсутствует
16	до ИТП по ул. Адоратского, 35а	1,5815	Увлажнение грунта $\approx 15\%$	Увлажнение отсутствует

На основании оценки результатов апробации методики на предмет выявления увлажнения, подтопления, затопления теплотрассы сотрудниками теплоснабжающей организации выполнены обходы тепловых сетей исследуемых участков с осмотром тепловых камер и взятием проб грунта в зоне залегания трубопроводов.

Обследование участков №1, 2, 4, 5, 9, 10, где результаты оценки не прогнозируют увлажнение (подтопление) тепловых сетей, показало отсутствие увлажнения грунта в тепловых камерах и в зоне залегания тепловых сетей.

Обследование участков №3, 8, 11, 12, 16, где результаты оценки прогнозируют сверхнормативные потери ввиду увлажнения тепловых сетей (до 30%), показало наличие увлажнения (подтопления) грунта в тепловых камерах и в зоне залегания тепловых сетей талыми и ливневыми водами:

- по тепловоду №17 увлажнение происходит по квартальным тепловым камерам №2а, 3а, 4 (кв. 57-2), №2, 11 (кв. 58-11а), №16 (кв. 59), №1, 8 (кв. 71);

- по тепловоду №18 увлажнение происходит по магистральной тепловой камере №18-12/1, по квартальным камерам №3 (кв. 18-2), №5 (кв. 17-1), №1а (кв. 25-1), №5, 6, 10 (кв. 27-2), №11 (кв. 27-3), №6 (кв. 38-2), №2 (кв. 38-А).

Обследование участков №6, 7, 13, 14, 15 с высокими сверхнормативными потерями, где результаты оценки прогнозируют затопление тепловых сетей, подтвердило частичное затопление (подтопление) грунта и тепловой изоляции:

- по тепловоду №17 в квартальных тепловых камерах №2, 3, 5, 6 (кв. 57-2), №3 (кв. 57-1), №9а (кв. 65-1), №1, 2, 3, 16 (кв. 65-2), №1, 3, 8 (кв. 71);

- по тепловоду №18 в квартальных тепловых камерах №1, 5, 12 (кв. 17-1), №2 (кв. 17-2), №1, 3 (кв. 25-1), №10, 11 (кв. 25-3), №3 (кв. 26-3), №5, 6, 10 (кв. 27-2), №6, 10 (кв. 38-2), №2 (кв. 38-А).

Таким образом, результаты апробации методики подтверждены натурным исследованием состояния тепловой изоляции и грунта в зоне залегания трубопроводов теплосети.

Описываемые вышеуказанными функциями потери тепловой энергии в нестационарном режиме работы теплосети подтверждают ранее выдвинутую гипотезу о следующих, спрогнозированных исследованиями, научных данных:

1. При увеличении температуры теплоносителя ($\Delta T_{\tau_0}^{mn.nach} > 0$) фактические потери тепловой энергии увеличиваются за счет влияния теплового состояния окружающей трубопровод среды. В случае уменьшения температуры теплоносителя наблюдается обратная ситуация;

2. Выполняется физическое условие $A > 0$, что подтверждает то, что A – коэффициент теплового состояния теплотрассы, ч/°С, характеризующий влияние скорости изменения температуры теплоносителя в начале участка теплосети на соотношение фактических и нормативных тепловых потерь на участке теплосети;

3. Множество полученных значений коэффициента теплового состояния теплотрассы A по каждому апробируемому участку теплосети свидетельствуют о разной степени теплоусвоения, окружающей трубопровод среды;

4. При $\Delta T_{\tau_0}^{mn.nach} = 0$, функция принимает вид $K = B = const$, где всегда выполняется условие о том, что $B > 0$ для стационарного процесса, в котором имеется постоянство соотношения фактических и нормативных тепловых потерь при отсутствии изменения температуры теплоносителя.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В нестационарном режиме работы теплосети соотношение фактических и нормативных тепловых потерь изменяется во времени. При этом наблюдается ряд переходных моментов, когда достигается равенство фактических и нормативных потерь, соответствующих количеству случаев изменения математического знака скорости изменения температуры теплоносителя.

При положительной скорости изменения температуры теплоносителя в трубопроводах теплосети ($\Delta T_{\tau_0}^{mn.nach} > 0$) фактические потери тепловой энергии увеличиваются за счет влияния теплового состояния окружающей трубопровод среды. При снижении температуры теплоносителя ($\Delta T_{\tau_0}^{mn.nach} < 0$) фактические потери тепловой энергии уменьшаются за счет отдачи тепловой энергии теплоносителю от материала теплоизоляции и окружающей теплосеть среды.

2. Полученная модель изменения соотношения фактических и нормативных потерь тепловой энергии на участке трубопроводов в зависимости от скорости изменения температуры теплоносителя является регрессионной моделью, которая позволяет установить зависимость изменения

тепловых потерь от скорости изменения температуры теплоносителя для нестационарного режима работы.

3. Разработана методика проведения испытаний на фактические потери тепловой энергии тепловых сетей централизованного теплоснабжения, находящихся в эксплуатации. Методика позволяет проводить испытания тепловых сетей в отопительный период без ограничения теплоснабжения потребителей, результаты испытаний обладают достаточной достоверностью. Применимость методики подтверждена натурным исследованием теплосети.

4. Применение методики решает задачу цифровизации мониторинга потерь тепловой энергии по участкам действующей теплосети, повышает точность полученных данных о фактических потерях и позволяет организации планировать работу по снижению потерь тепловой энергии.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

- теоретическом аспекте актуально проведение исследований режимной управляемости энергетической системы для разработки критериев оценки надежности системы теплоснабжения, исследования устойчивости энергетической системы в случае отказа источника тепловой энергии, расчет интервала времени сохранения минимально-допустимого режима теплоснабжения, исследования возможностей ограничения теплоснабжения потребителей при дефиците мощности или топлива на источнике тепловой энергии

- в практическом аспекте цифровизация мониторинга потерь тепловой энергии в действующей теплосети для заблаговременной разработки теплоснабжающей организации мероприятий по снижению технологических потерь тепловой энергии в межотопительный период, а также осуществление мониторинга качества теплоснабжения потребителей.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ

1. Лапин, К.В. Применение современных информационных технологий учета тепловой энергии для оперативного поиска мест увлажнения тепловой изоляции / И.Г. Ахметова, К.В. Лапин, Т.Р. Ахметов, Е.Ю. Бальзамова // Теплоэнергетика. 2021. № 5. С. 89–96 (общий объем – 8 с., личный вклад – 3 с.).

2. Лапин, К.В. Исследование нестационарных процессов теплообмена в тепловых сетях централизованного теплоснабжения / И.Г. Ахметова, К.В. Лапин // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Том 14. № 3. С. 13-26 (общий объем – 14 с., личный вклад – 8 с.).

3. Лапин, К.В. Оптимальная периодичность изменения температуры теплоносителя на источнике теплоты и влияние скорости её изменения на потери тепловой энергии / И.Г. Ахметова, К.В. Лапин // Известия высших

учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. 25(3). С. 139-149 (общий объем – 11 с., личный вклад – 7 с.).

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS

4. Lapin, K.V. Improving of the heat supply energy efficiency in Russian cities through the individual heat points introduction / N.D. Chichirova, I.G. Akhmetova, A.R Gilmanova, K.V. Lapin, I.O.N. Ion // В сборнике: E3S Web of Conferences. 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019. С. 04009 (общий объем – 4 с., личный вклад – 1 с.).

5. Lapin, K.V. Digitalization of heat energy accounting as a means of improving the reliability of heat supply / I.G. Akhmetova, E.Y. Balsamova, K.V. Lapin, T.R. Akhmetov // В сборнике: E3S Web of Conferences. Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2019). 2019. С. 01011. (общий объем – 5 с., личный вклад – 2 с.).

Публикации в других научных изданиях

6. Лапин, К.В. Цифровизация учета тепловой энергии как средство повышения надежности теплоснабжения / И.Г. Ахметова, К.В. Лапин, Т.Р. Ахметов, Е.Ю. Бальзамова // 91-е заседание Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики»: сборник трудов. Ташкент, 2019. С. 125-134 (общий объем – 10 с., личный вклад – 4 с.).

7. Лапин, К.В. Цифровые технологии мониторинга качества поставляемой тепловой энергии потребителям / И.Г. Ахметова, К.В. Лапин, Т.Р. Ахметов, Е.Ю. Бальзамова // 92-е заседание Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики»: сборник материалов. Казань, 2020. С. 39-47 (общий объем – 9 с., личный вклад – 4 с.).

8. Лапин, К.В. Выбор оптимального типа теплоизоляционной конструкции на основе нейросетевого моделирования / И.Г. Ахметова, Е.Ю. Бальзамова, В.В. Бронская, Д.С. Бальзамов, К.В. Лапин, О.С. Харитоновна // 92-е заседание семинара учрежденного при ИСЭМ СО РАН «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики»: сборник трудов. Казань, 2020. С. 186-190 (общий объем – 5 с., личный вклад – 1 с.).

9. Лапин, К.В. Использование средств измерений температуры теплоносителя для поиска мест затопления трубопроводов теплосети // Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения – 2022 «Энергетика и цифровая трансформация»: сборник статей. Казань, 2022. Том 2. С. 151-155 (общий объем – 6 с., личный вклад – 6 с.).

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

10. Запольская И.Н., Лапин К.В., Вовченко И.Г. Модуль мониторинга качества теплоснабжения потребителей // Регистрационный номер №2023662329. 2023.

11. Ваньков Ю.В., Запольская И.Н., Лапин К.В., Шаповалов С.К., Измайлова Е.В. Transition2ITP // Регистрационный номер № 2021680212. 2021.

Подписано в печать 27.09.2024. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать ЦИФРОВАЯ.
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100. Заказ № 2709/6.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)
420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: 292-98-92
e-mail: westfalika@inbox.ru
