

**МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Объект авторского права
УДК 620.179.18

ГЕРАСИМЕНКО
Никита Васильевич

**СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО ДИСТАНЦИОННОГО
КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПЕНОПОЛИУРЕТАНОВОЙ
ИЗОЛЯЦИИ ТРУБ НА ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНОЙ
РЕФЛЕКТОМЕТРИИ И ЦИФРОВЫХ ДАТЧИКОВ
ВЛАЖНОСТИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий»

Могилев 2023

Научная работа выполнена в Межгосударственном образовательном учреждении высшего образования «Белорусско-Российский университет»

Научный руководитель

Болотов Сергей Владимирович,
кандидат технических наук, доцент,
декан электротехнического факультета
Межгосударственного образовательного учре-
ждения высшего образования «Белорусско-
Российский университет», г. Могилев

Официальные оппоненты:

Холодилов Олег Викторович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Вагоны»
УО «Белорусский государственный универси-
тет транспорта», г. Гомель

Максимович Елена Степановна,
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник лаборатории радиотомографии Ин-
ститута прикладной физики НАН Беларуси,
г. Минск

Оппонирующая организация

**Белорусский национальный технический
университет**, г. Минск

Защита состоится «25» сентября 2023 г. в 11:00 на заседании Совета по защите диссертаций К 02.18.01 при Межгосударственном образовательном учреждении высшего образования «Белорусско-Российский университет» по адресу: 212022, г. Могилев, пр-т Мира, 43, ауд. 323. Телефон ученого секретаря: +375(222)71-22-12, e-mail: etf@bru.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусско-Российского университета.

Автореферат разослан

«25» августа 2023 г.

Ученый секретарь

Совета по защите диссертаций,
кандидат технических наук, доцент



С. С. Сергеев

ВВЕДЕНИЕ

Трубы с пенополиуретановой теплоизоляцией широко применяются при прокладке новых тепловых сетей и замене существующих как в Республике Беларусь, так и за ее пределами. Теплоизоляция стальной трубы осуществляется слоем пенополиуретана, который обладает низким коэффициентом теплопроводности, хорошей механической прочностью и долговечностью. Производители такого типа труб определяют их рабочий ресурс в среднем до 30 лет, а потери тепловой энергии при транспортировке в 2 раза ниже, чем в трубопроводах с другими типами теплоизоляции.

При длительных сроках эксплуатации трубопроводов, часто превышающих нормативные, а также специфических условиях прокладки в ходе замены старых трубопроводов особую актуальность приобретает разработка и освоение современных методов контроля и диагностики состояния трубопроводов с теплоизоляцией из пенополиуретана как в процессе изготовления, так и в процессе эксплуатации. Повреждение изоляции, вызванное утечкой теплоносителя через стальную трубу или нарушением целостности защитной полиэтиленовой оболочки, приводит к существенному увеличению тепловых потерь в теплосетях, а впоследствии к авариям, нарушению теплоснабжения объектов и дополнительным затратам на восстановления повреждений.

Согласно СТБ 2252–2012 и ГОСТ 30732–2020 для определения места увлажнения теплоизоляции используется система оперативного дистанционного контроля. Такие системы обладают широкими возможностями, в частности, возможностью дистанционной локализации мест повреждений. При этом на процесс контроля влияет множество факторов, что приводит к снижению точности обнаружения повреждений. Анализ опыта эксплуатации систем оперативного дистанционного контроля показывает необходимость разработки теоретической базы для режима импульсной рефлектометрии, позволяющей прогнозировать результаты и выбирать оптимальные параметры контроля. К тому же использование импульсной рефлектометрии оказывается недоступным в гибких трубах с пенополиуретановой изоляцией, поэтому в качестве альтернативного решения следует использовать систему контроля, основанную на других способах измерения влажности теплоизоляционного слоя.

Разработка современной системы оперативного дистанционного контроля на основе цифровых датчиков влажности и методов импульсной рефлектометрии является актуальной задачей, поскольку непрерывный контроль позволит избежать повышенных энергетических потерь в теплосетях при повреждении теплоизоляции.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами) и темами

Тема диссертационной работы соответствует пункту 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы» перечня приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы в соответствии с Указом Президента Республики Беларусь № 156 от 07.05.2020 г.

Исследования, результаты которых вошли в диссертацию, проводились в Межгосударственном образовательном учреждении высшего образования «Белорусско-Российский университет» при непосредственном участии автора в рамках следующих НИР: **ХД1447ф** «Разработать и исследовать систему контроля состояния изоляции трубопроводов на основе цифровых датчиков влажности и температуры» (№ гос. регистрации 20143679); **ГБ1605** «Теоретические и технологические основы повышения качественных показателей систем автоматизации, в том числе с компьютерным и микропроцессорным управлением» (№ гос. регистрации 20161926); **ГБ1801ф** «Исследование систем оперативного дистанционного контроля состояния изоляции трубопроводов тепловых сетей на основе цифровых датчиков влажности и методов рефлектометрии» (№ гос. регистрации 20180996); **ГБ2121ф** «Исследование плазменных токов индуцированных солитонами и нелинейными волнами. Параметрическое возбуждение нелинейных волн» (№ гос. регистрации 20211736); **ГБ2101** «Развитие физических основ и создание эффективных технологий и средств неразрушающего контроля промышленных объектов» (№ гос. регистрации 20210533).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационного исследования является разработка системы оперативного дистанционного контроля (СОДК) пенополиуретановой теплоизоляции труб тепловых сетей на основе импульсной рефлектометрии и цифровых датчиков влажности.

Для выполнения цели потребовалось решить следующие **задачи**.

1. Установить наиболее распространенные виды дефектов труб тепловых сетей с пенополиуретановой теплоизоляцией, а также причины их образования. Выполнить анализ методов и технических средств контроля состояния трубопроводов тепловых сетей.
2. Установить закономерности изменения диэлектрической проницаемости и электрического сопротивления пенополиуретановой изоляции трубопроводов тепловых сетей при изменении ее плотности и влагосодержания.
3. Разработать математическую модель измерительного тракта систе-

мы оперативного дистанционного контроля в режиме импульсной рефлектометрии, с помощью которой исследовать эволюцию зондирующих импульсов при наличии пространственных неоднородностей диэлектрической проницаемости и электрического сопротивления теплоизоляции, установить основные факторы, влияющие на результаты диагностики, и дать практические рекомендации, направленные на повышение точности обнаружения повреждений теплоизоляционного слоя.

4. Разработать цифровые датчики влажности теплоизоляции из пенополиуретана и систему оперативного дистанционного контроля ее состояния на основе этих датчиков, предназначенную как для мониторинга состояния традиционных, так и гибких труб.

Объектом исследования является пенополиуретановая изоляция труб тепловых сетей с измерительным трактом системы оперативного дистанционного контроля ее состояния. **Предметом исследования** являются физические характеристики пенополиуретановой изоляции, влияющие на эффективность работы систем оперативного дистанционного контроля пенополиуретановой изоляции труб.

Методы исследования: методы математической физики и численного моделирования, натурального моделирования физических процессов с применением современных измерительных приборов. Достоверность полученных теоретических результатов оценивалась путем их сопоставления с результатами экспериментов.

Научная новизна

Впервые получена математическая модель линии системы оперативного дистанционного контроля состояния пенополиуретановой (ППУ) изоляции труб в режиме импульсной рефлектометрии, *позволяющая* на основе выявленных закономерностей изменения диэлектрической проницаемости и электрического сопротивления ППУ-изоляции в широком диапазоне плотностей материала и его влажности для разных сочетаний компонентов пенополиуретана, исследовать временную эволюцию зондирующих импульсов при заданных параметрах измерительного тракта системы оперативного дистанционного контроля, определить оптимальные значения длительности зондирующих импульсов, а также получить аналитические формулы, связывающие амплитуду отраженного импульса с параметрами измерительного тракта, что *позволяет* повысить точность обнаружения повреждений теплоизоляции.

Впервые предложена система оперативного дистанционного контроля на основе цифровых датчиков влажности, *отличающаяся* непосредственным контролем динамики увлажнения теплоизоляционного слоя из пенополиуретана и *позволяющая* на основе экспериментально полученных закономерностей

увлажнения слоя пенополиуретановой изоляции при наличии локализованного дефекта, через который осуществляется утечка теплоносителя, или нарушения целостности гидрозащитной оболочки, уменьшить задержку реакции системы на появление повреждения теплоизоляции и повысить точность его обнаружения.

Положения, выносимые на защиту

1. Установлено, что максимальная скорость изменения влажности в плоском слое пенополиуретановой изоляции для образцов плотностью 60 кг/м^3 на основе компонентов Эластопор Н2130 + IsoPMDI 92140 и Изолан А350 + Voranate М225 наблюдается через 0,8 и 1,0 ч, для образцов плотностью 80 кг/м^3 на основе данных компонентов максимальная скорость изменения влажности наблюдается через 3,5 и 6,0 ч соответственно, при этом значение максимальной скорости в 3,8 раза выше для меньшей плотности пенополиуретана на основе компонентов Изолан А350 + Voranate М225 и в 5,9 раза выше для компонентов Эластопор Н2130 + IsoPMDI 92140, что *позволяет* оперативно выявлять утечки теплоносителя или увлажнения изоляции в случае нарушения герметичности гидрозащитной оболочки и предотвратить аварийные ситуации.

2. Математическая модель измерительного тракта — линии системы оперативного дистанционного контроля на основе телеграфных уравнений, *отличающаяся* учетом неоднородности диэлектрической проницаемости в диапазоне $\varepsilon = 1,2 \dots 1,4$ и снижения электрического сопротивления $R_{\text{из}} < 1 \text{ МОм}$ при массовом содержании влаги $W_m > 4 \%$, *позволяющая* исследовать временную эволюцию зондирующих импульсов и процесс формирования отраженных импульсов, с помощью которой *установлен* оптимальный диапазон длительности зондирующего импульса $t_{\text{и}} = 20 \dots 40 \text{ нс}$ для импульсной рефлектометрии в линиях с коэффициентом укорочения $k = 1,09 \dots 1,18$ и волновым сопротивлением $Z_{\text{в}} = 308 \dots 350 \text{ Ом}$, *обеспечивающий* точность локации увлажненных участков изоляции до 1,5 м.

3. Новая система оперативного дистанционного контроля, *основанная* на использовании цифровых датчиков влажности и температуры с термической устойчивостью до $120 \text{ }^\circ\text{C}$, *обеспечивающая* непосредственный контроль влажности пенополиуретановой изоляции и *позволяющая* повысить скорость реакции на появление утечки вследствие повреждения теплонесущей трубы или гидрозащитной оболочки до 10 раз по сравнению с импульсной рефлектометрией, определить характер повреждения: дефект теплонесущей трубы или дефект гидрозащитной оболочки по результатам анализа информации, поступающей от датчика температуры, а также обеспечить контроль состояния теплоизоляции гибких труб.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные результаты, представленные в диссертации, получены автором лично. Научному руководителю, канд. техн. наук, доц. С. В. Болотову принадлежит основная идея работы и постановка задачи исследования. Совместно с канд. физ.-мат. наук, доц. Ф. М. Трухачевым обсуждались математические модели и вопросы развития численных методов анализа волновых процессов, их применение к решению нелинейных задач. Методика и средства исследования диэлектрических свойств пенополиуретановой изоляции были разработаны автором под руководством д-ра физ.-мат. наук, проф. В. И. Борисова. Первостепенное участие автора заключается в проведении теоретических и экспериментальных исследований, постановке экспериментов и последующей обработке полученной информации.

Апробация результатов диссертации

Результаты, полученные в ходе исследований по теме диссертации, докладывались на международных конференциях «Приборы и методы неразрушающего контроля композиционных материалов» (Санкт-Петербург, 2014 г.); «Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании» (Брянск, 2014 г.); «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» (Могилев, 2017, 2020 гг.); «Энергетика, информатика, инновации» (Смоленск, 2014 г.); «Конгресс физиков Беларуси» (Минск, 2017, 2023 гг.); «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 2015, 2016, 2018 гг.); «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Могилев, 2018, 2022 гг.); «Progress Through Innovations» (Новосибирск, 2019 г.); Отраслевой конгресс «Вода и тепло 2019» (Минск, 2019 г.); «Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве» (Минск, 2019, 2020 гг.); «Интеллектуальные информационные технологии, энергетика и экономика» (Смоленск, 2020 г.).

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 4 статьях в изданиях, включенных в перечень ВАК, 2 статьях в других рецензируемых изданиях, одна из которых входит в реферативную базу данных Scopus, 7 статьях в сборниках научных трудов и 14 тезисах докладов на международных научно-технических конференциях. Общий объем опубликованного материала составляет 4,3 авторских листа. Получен патент Республики Беларусь на полезную модель и свидетельство о регистрации программного обеспечения.

Структура и объем диссертации

Диссертация включает в себя оглавление, перечень условных обозначений, введение, общую характеристику работы, четыре главы, заключение с

рекомендациями по практическому использованию полученных результатов и список использованных источников. Полный объем диссертации составляет 119 страниц. Диссертация содержит 48 рисунков, 7 таблиц и 2 приложения. Библиографический список содержит 104 наименования и занимает 13 страниц.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе рассмотрены основные характеристики жестких и гибких труб с пенополиуретановой (ППУ) теплоизоляцией, выпускаемых на предприятиях в Республике Беларусь и Российской Федерации. Изучены виды дефектов и повреждений (рисунок 1), характерных для трубопроводов с теплоизоляцией из ППУ при бесканальной прокладке [2, 22].



Рисунок 1 – Наиболее распространенные дефекты и повреждения трубопроводов с ППУ-изоляцией

Из приведенной диаграммы следует, что наиболее характерным дефектом трубопроводов в ППУ-изоляции является нарушение целостности защитной полиэтиленовой оболочки (61 %). Часто причиной образования такого вида дефектов является разгерметизация муфтовых соединений на стыках труб и фасонных изделий, что, в свою очередь, приводит к проникновению в слой теплоизоляции влаги из почвы и ускоренному развитию коррозионных повреждений стальной трубы. Дефекты элементов СОДК составляют вторую по распространенности категорию (29 %), а оставшаяся часть дефектов приходится на повреждения теплонесущей трубы.

Отмечено, что длительное присутствие влаги в теплоизоляционном слое ведет к увеличению энергетических потерь в системе. По данным существующих исследований, потери в трубопроводах с влажной пенополиуретановой изоляцией могут достигать до 128 Вт/м, что в десятки раз превышает нормативные показатели для некоторых типов трубопроводов.

Выполнен аналитический обзор современных методов и технических средств контроля и диагностики состояния теплоизоляции трубопроводов тепловых сетей. Показано, что в трубах с ППУ-изоляцией наиболее рациональным является использование систем оперативного дистанционного контроля для диагностики их состояния.

Отмечено, что широкое применение в условиях городской инфраструктуры находят гибкие трубы с теплоизоляцией из ППУ, представляющие собой совершенно иной с точки зрения методов диагностики объект. Реализация дистанционного контроля традиционными методами в таких трубах затруднена по причине плохой электропроводности материала основной трубы и отсутствия возможности центрировать проводники СОДК в пространстве между основной трубой и гидрозащитной оболочкой.

Таким образом, построение теории, математической модели и разработка новой системы оперативного контроля труб с ППУ-изоляцией на базе современных технологий — актуальные задачи, вклад в решение которых представлен в данном диссертационном исследовании.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований динамики диффузии влаги в слое теплоизоляции из ППУ при наличии локализованной утечки, а также исследования диэлектрической проницаемости и электрического сопротивления теплоизоляционного слоя при различных значениях влагосодержания по массе W_m , %.

Для определения коэффициентов диффузии влаги изготовлены специальные образцы из ППУ различной плотности, полученные с помощью двух наборов реактивов: Изолан А350(ф) + Voranate M225 и Эластопор Н2130 + IsoPMDI 92140. Плотность предварительно определена по методике, изложенной в ГОСТ 409–2017. Выбранные образцы подвергались испытанию на водопоглощение согласно ГОСТ 4650–2015 [6]. По методике, описанной в ГОСТ 4650–2014, выполнен расчет коэффициентов диффузии влаги для образцов ППУ-изоляции, изготовленных из указанных выше реактивов.

С помощью коэффициентов диффузии $D(\rho)$ и классического уравнения диффузии получены зависимости, характеризующие скорость изменения концентрации влаги в слое ППУ-изоляции [6]. Данные зависимости представлены на рисунке 2.

Анализ зависимостей позволяет установить следующее. Максимальная скорость увлажнения ППУ наблюдается через $t_1 = 1,0$ ч для ППУ на основе Изолан + Voranate плотностью $\rho_1 = 60$ кг/м³ и $t_2 = 3,5$ ч, если плотность материала составляет $\rho_2 = 80$ кг/м³, при этом значение максимальной скорости в случае ППУ меньшей плотности примерно в 3,8 раза выше. Аналогичные показатели для ППУ на основе Эластопор + IsoPMDI $t_1 = 0,8$ ч и $t_2 = 5,9$ ч

соответственно, максимальная скорость увлажнения ППУ меньшей плотности в этом случае примерно в 5,9 раза выше [6].

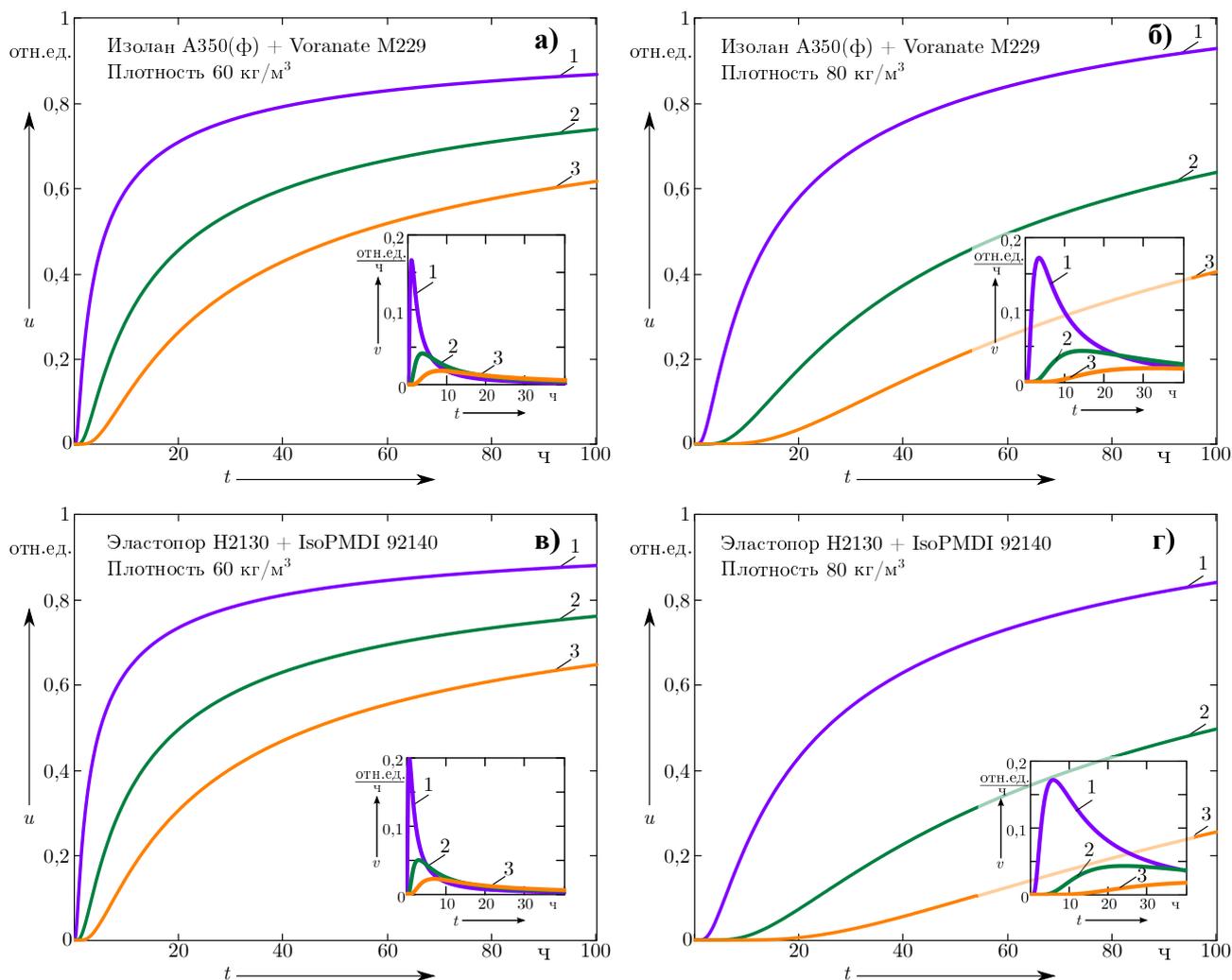
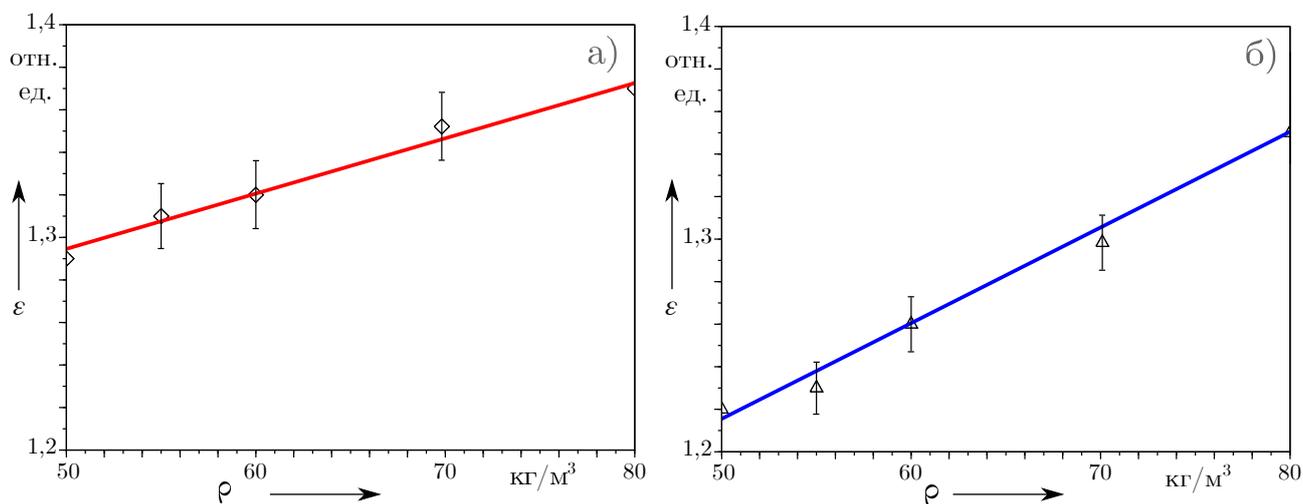


Рисунок 2 – Динамика изменения влажности в слое ППУ-изоляции на основе компонентов Изолан А350(ф) + Voranate M225 (а, б) и Эластопор Н2130 + IsoPMDI (в, г) на предполагаемом расстоянии размещения элементов СОДК – 20 мм (кривая 1); 40 мм (кривая 2); 60 мм (кривая 3) (на вставках к рисункам представлены кривые изменения скорости диффузии)

Выполнено измерение диэлектрической проницаемости образцов ППУ-изоляции. Диэлектрическая проницаемость пенополиуретана оказывает влияние на результаты поиска повреждений методом импульсной рефлектометрии. Как известно, скорость распространения электромагнитной волны (зондирующего импульса) в диэлектрике рассчитывается по формуле $v = c/k$, где c – скорость света в вакууме; k – коэффициент укорочения (показатель преломления), $k = \sqrt{\epsilon}$. Расстояние до поврежденного участка рассчитывают с учетом постоянства скорости распространения электромагнитной волны, зависящей от диэлектрической проницаемости материала.

Для экспериментального исследования диэлектрической проницаемости ППУ предварительно изготовлены прямоугольные образцы различной плотности. Измерения диэлектрической проницаемости выполнены двумя методами — емкостным (на частоте $f = 1$ кГц) и методом неоднородных волн (на частоте $f = 10$ ГГц). Зависимости диэлектрической проницаемости ППУ от плотности представлены на рисунке 3 [12, 13, 16].



а – метод плоского конденсатора ($f = 1$ кГц); б – метод неоднородных волн в диэлектрическом волноводе ($f = 10$ ГГц)

Рисунок 3 – Зависимость диэлектрической проницаемости ППУ от кажущейся плотности материала при температуре 23 °С

Исследовано изменение диэлектрической проницаемости ППУ при различном значении влагосодержания W_m в образцах ППУ. Показано, что при значении влагосодержания $W_m > 4$ % диэлектрическая проницаемость возрастает в 5,7–6,6 раза, что обусловлено высоким значением диэлектрической проницаемости воды.

Измерение электрического сопротивления образцов ППУ-изоляции реализовано при помощи контрольно-монтажного прибора Robin KMP 3050 DL, соединенного с электродами, погруженными в ППУ. Полученные экспериментальные зависимости представлены на рисунке 4 [12, 13].

Анализ полученных зависимостей показывает, что при влагосодержании $W_m > 4$ % значение электрического сопротивления оказывается менее 1 МОм, что ниже допустимого предела по ГОСТ 56380–2015 и может расцениваться пороговыми детекторами (измерителями сопротивления) как наличие дефекта. Результаты, полученные в этой главе, использованы в дальнейшем для разработки математической модели линии СОДК в режиме импульсной рефлектометрии и при разработке цифровых систем.

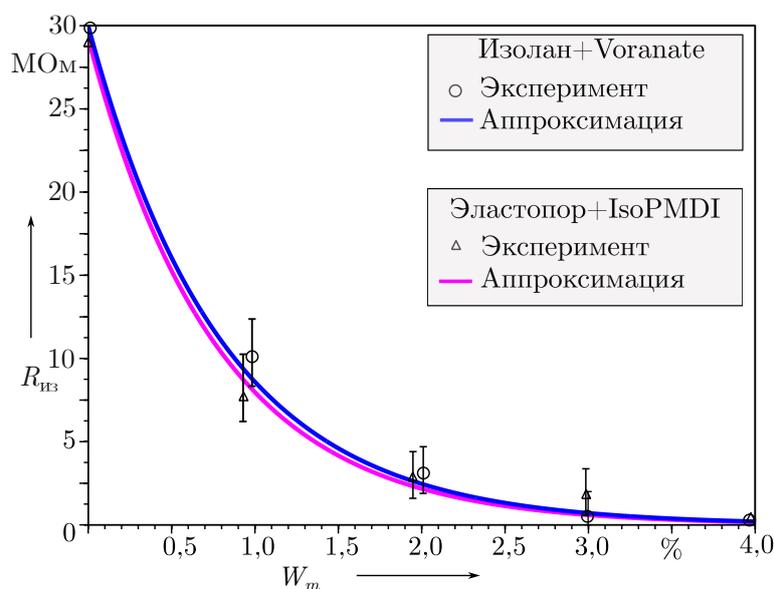


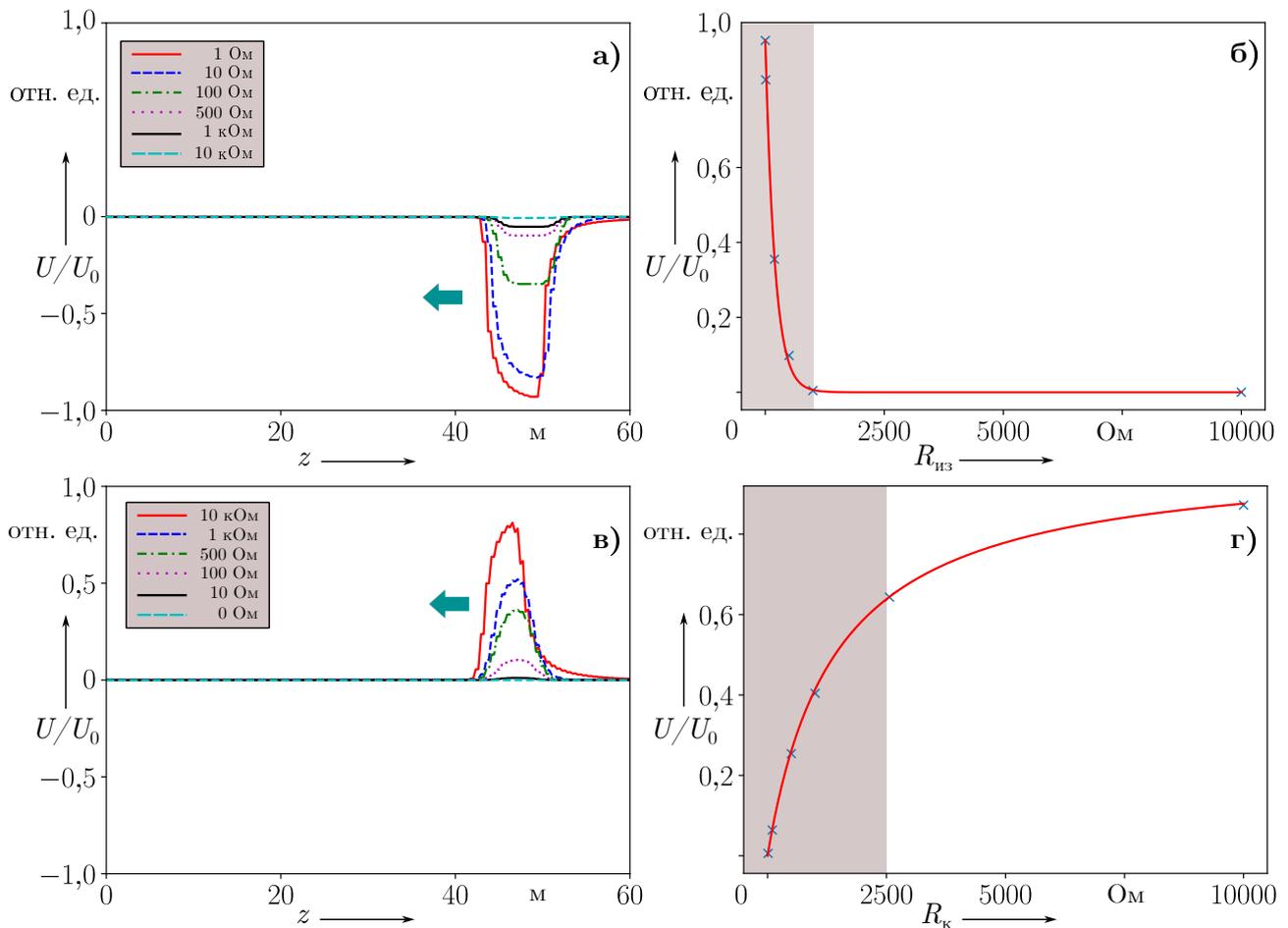
Рисунок 4 – Зависимость электрического сопротивления ППУ-изоляции на основе компонентов Изолан + Voramate и Эластопор + IsoPMDI от массовой доли влаги в образце

В третьей главе показано, что измерительный тракт — линия системы оперативного дистанционного контроля (СОДК), устанавливаемая в трубы с ППУ-изоляцией на этапе производства — является ТЕМ-структурой [5] и может быть описана математически в терминах телеграфных уравнений:

$$\begin{cases} -\frac{\partial U}{\partial z} = L_0 \frac{\partial I}{\partial t} + R_0 I; \\ -\frac{\partial I}{\partial z} = C_0 \frac{\partial U}{\partial t} + G_0 U. \end{cases}$$

На основе данных уравнений разработана математическая модель и методика численного интегрирования полученной системы, позволяющая исследовать временную и пространственную эволюцию зондирующего импульса в линии. С помощью разработанной модели изучены процессы распространения, затухания и отражения импульса при наличии неоднородностей параметров линии [5, 10, 11, 12, 13, 25, 27].

Исследованы отраженные импульсы, возникающие при наличии дефектов (неоднородностей) в виде участка теплоизоляции с повышенной влажностью и участка линии СОДК с повышенным переходным сопротивлением, возникающим, как правило, вследствие некорректного монтажа стыковых соединений. Виды отраженных сигналов и зависимости их амплитуды от величины сопротивления теплоизоляционного слоя $R_{из}$ и переходного сопротивления R_k представлены на рисунке 5 [5].



Сплошная кривая – результаты численного моделирования; символы \times – расчет по полученным аналитическим формулам

Рисунок 5 – Результат моделирования процесса импульсной рефлектометрии при наличии локализованной области с повышенной влажностью (а) и сопротивлением (в). Зависимости амплитуды отраженного сигнала от величины сопротивления изоляции (б) и переходного сопротивления (г)

С помощью математической модели получены приближенные аналитические формулы, связывающие амплитуду отраженного импульса, ширину области неоднородности и значения электрического сопротивления теплоизоляционного слоя и контакта. Формула для случая области с неоднородностью $R_{из}$ представляет наибольший интерес и имеет вид [5]

$$\frac{|U|}{U_0} = \frac{Z_B^2}{Z_B^2 + 2\kappa Z_B R_{из}},$$

где κ – положительная вещественная константа, учитывающая ширину области неоднородности, $\kappa = 2$ для точечного дефекта;

Z_B – волновое сопротивление линии СОДК, $Z_B = 308 \dots 350$ Ом.

Можно отметить, что в случае увлажнения теплоизоляционного слоя имеет место обратная зависимость ($\sim 1/R_{\text{из}}$), и наибольшая чувствительность метода импульсной рефлектометрии достигается при $R_{\text{из}} \leq 1$ кОм, что возможно лишь при значительном увлажнении, $W_m \gg 4$ % (закрашенная область на рисунке 5, б), и зависит как от ширины зондирующего импульса, так и от ширины дефектного участка. Ряд численных экспериментов позволил установить оптимальный диапазон длительности импульса $t_{\text{и}} = 20 \dots 40$ нс, обеспечивающий соотношение U/U_0 , достаточное для интерпретации дефекта на рефлектограммах [5, 25, 27].

Разработанная модель позволила показать, что влияние затухания в линии, вызванное омическим сопротивлением проводников и (или) токами утечки через теплоизоляционный слой ППУ при нормальном функционировании СОДК, оказывается пренебрежимо малым.

Влияние неоднородности диэлектрической проницаемости ППУ, являющееся следствием неравномерного пенообразования, приводит к искажению зондирующего импульса в процессе распространения, а также к искажению отраженных сигналов. Это может стать причиной неправильной интерпретации рефлектограмм или ложного срабатывания прибора из-за многочисленных переотражений. Устранить такую проблему можно только на стадии изготовления труб, что учтено в практических рекомендациях. Корректность математической модели подтверждена экспериментально при помощи рефлектометра РЕЙС-105 на участке трубопровода длиной 140 м с увлажненным участком теплоизоляции, сопротивление которого $R_{\text{из}} = 4$ кОм. Теоретическая и экспериментальная рефлектограммы хорошо согласуются [25].

Сформулированы практические рекомендации, содержащие оптимальные параметры настройки рефлектометров. Математическая модель может быть использована для прогнозирования развития дефектов и корректной интерпретации рефлектограмм в условиях старения ППУ-изоляции или других изменений ее свойств. Предварительное моделирование трубопровода в сочетании с данными рекомендациями позволяет на практике достичь точности обнаружения повреждений до 1,5 м. Разработанная модель и макет рефлектометра внедрены в образовательный процесс на кафедре «Физические методы контроля», что позволило студентам выполнять изучать электрические цепи с распределенными параметрами и возможности диагностики длинных линий. Предложенная методика численного интегрирования уравнений также использовалась автором для исследования нелинейных волновых процессов [4, 21].

Четвертая глава посвящена разработке новой системы оперативного дистанционного контроля на базе цифровых датчиков влажности. Концепция

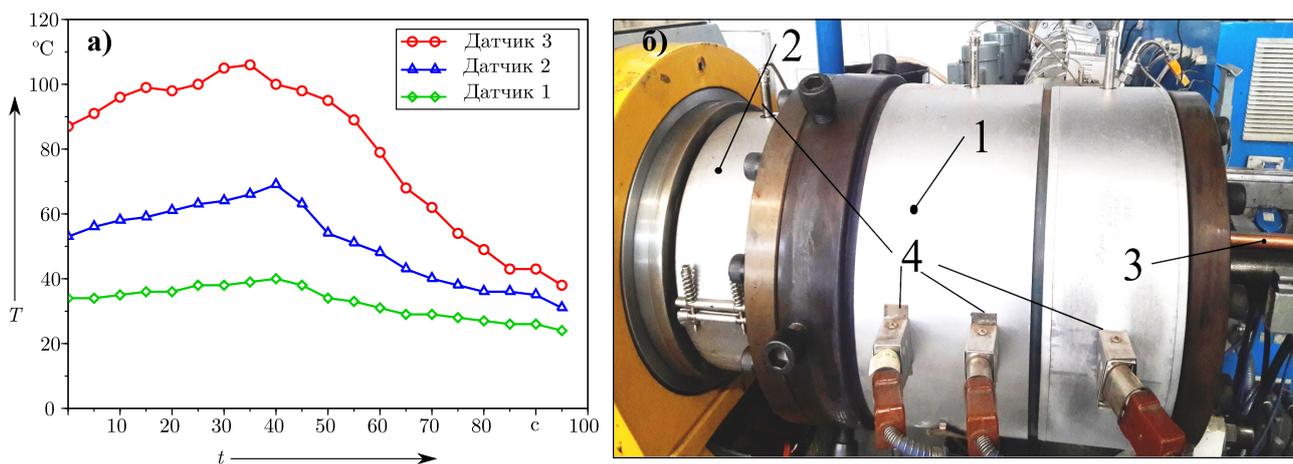
новых СОДК с цифровой обработкой данных и непосредственным измерением влажности теплоизоляционного слоя предложена впервые, базируется на выполненных исследованиях свойств ППУ-изоляции и нацелена в первую очередь на применение в составе трубопроводов, где эксплуатация традиционной СОДК невозможна или затруднена [1, 3, 7, 9, 17]. К такому типу относятся гибкие трубы Smitflex. Цифровая СОДК может дополнять традиционную на особо важных участках, стыковых соединениях и др.

Выбор электронных узлов цифровой СОДК основан на проведенных экспериментах, включающих исследование температурных режимов реакции компонентов ППУ, температурных режимов в процессе экструдирования гибких труб. Исследование температурных режимов в процессе реакции ППУ были выполнены при помощи контактного измерения температуры в сочетании с инфракрасной фотосъемкой.

Установлено, что максимальная температура в процессе реакции компонентов ППУ достигается спустя 90 с для стандартных труб и 50 с для фасонных изделий после начала процесса вспенивания. Это значение превышает время старта компонентов Изолан-350 ($t_s = 48$ с) и время старта компонента Изолан-350ф, используемого при производстве фасонных изделий ($t_s = 40$ с). Максимальная температура реакции ППУ-компонентов достигает 120 °С и зависит от объема состава, конфигурации изделия, расстояния от места ввода компонентов, внешних температурных условий. Таким образом, максимальная рабочая температура датчиков, преобразователей и электронных компонентов должна быть не менее 120 °С [1, 8].

Для исследования температурных режимов при изготовлении гибких труб проведены эксперименты непосредственно на экструдере для их производства (рисунок 6). Были установлены датчики температуры в трех зонах экструдера. Датчик 1 находился в канале подачи проводника СОДК, вне экструдера, датчик 2 — в средней части экструдера, датчик 3 располагался в области нагревательного элемента. Через 40 с после начала эксперимента температура, регистрируемая датчиком 3 достигла значения 105 °С. Температура, регистрируемая датчиками 2 и 1, не превышала 70 °С и 40 °С соответственно [3, 23]. С учетом этих результатов, в качестве основы для разработки цифрового датчика влажности выбраны емкостные чувствительные элементы серии SHТ21, удовлетворяющие всем требованиям и способные работать в условиях кратковременного повышения температуры до 120 °С.

Цифровая СОДК состоит из трубной части, включающей проводники с цифровыми датчиками влажности и блок управления, осуществляющий обработку информации и передачу сигналов на устройство оператора.



1 – экструдер гибких труб с ППУ-изоляцией (область установки датчика 2);
 2 – нагревательный элемент (область установки датчика 3); 3 – канал подачи проводника СОДК (область установки датчика 1); 4 – разъемы для подключения электронного оборудования экструдера

Рисунок 6 – Температурные кривые (а) и установка (б) для их исследования в процессе производства гибких труб с ППУ-изоляцией

Цифровой датчик влажности (ЦДВ) представляет собой компактное электронное устройство, смонтированное на одной плате (рисунок 7, а).

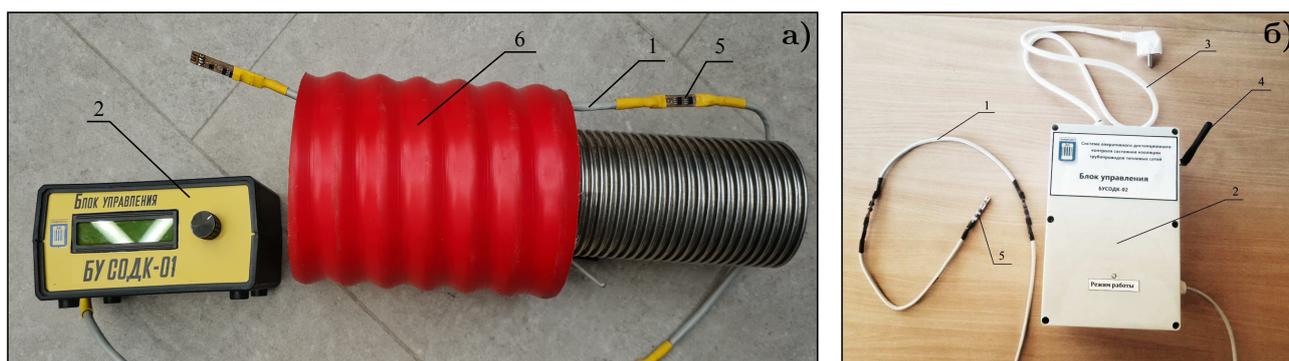


Рисунок 7 – Внешний вид цифрового датчика влажности для стандартных труб (а) и модифицированного для применения в составе гибких труб (б)

Основными элементами цифрового датчика влажности являются чувствительный элемент и микроконтроллер. Поскольку в процессе реакции ППУ-состав заполняет внутреннее пространство между металлической или полимерной трубой и защитной оболочкой, датчик, расположенный в этой области, оказывается в непосредственном контакте с ППУ-изоляцией и регистрирует изменение ее влажности. Микроконтроллер обеспечивает первичную обработку измерительной информации. Данные о состоянии изоляции передаются на плату преобразователя интерфейса, откуда далее поступают по проводникам системы контроля на блок управления.

Для адаптации цифровой СОДК к применению в составе гибких труб решены следующие задачи: проводники системы контроля, соединяющие ЦДВ с блоком управления изготовлены в виде ленты, уменьшены габариты датчиков для свободного прохождения по специальному каналу экструдера, улучшена защита контактов и чувствительных элементов датчика (рисунок 7, б).

Назначение блока управления цифровой СОДК (рисунок 8) — сбор, обработка и передача по каналам беспроводной связи информации о состоянии теплоизоляции трубопровода на сервер, а также световая или текстовая индикация состояния контролируемого участка трубопровода.



1 – проводники системы контроля; 2 – корпус блока управления; 3 – сетевой шнур блока питания; 4 – антенна модуля беспроводной передачи данных; 5 – цифровой датчик влажности; 6 – образец гибкой трубы с ППУ-изоляцией

Рисунок 8 – Внешний вид блоков управления БУСОДК-01 (а) и БУСОДК-02 (б)

Испытания разработанной СОДК при наличии увлажнения, вызванного утечкой теплоносителя через сквозной дефект в стальной трубе, проведены на базе лаборатории ЗАО «Завод полимерных труб». В предварительно изготовленный участок трубы диаметром 159 мм и длиной 1 м с искусственно созданным дефектом установлена линия цифровой СОДК, состоящая из трех датчиков, расположенных на расстоянии 300 мм друг от друга и на расстоянии 20 мм от поверхности металлической трубы, что соответствует стандартному расположению проводников традиционной СОДК.

Образец трубы был изготовлен в заводских условиях, проводники с датчиками влажности установлены до ввода реактивов ППУ. Испытания проводились в течение 20 ч. В процессе испытаний температура теплоносителя составляла 75 °С, давление теплоносителя — 1,8 МПа. Эксперимент показал (рисунок 9), что реакция датчика, расположенного непосредственно над дефектом, наблюдается менее чем через 1 ч и далее значение регистрируемой влажности увеличивается. При этом скорость изменения влажности на

начальном этапе составляет 12 %/ч, спустя 5 ч наблюдения скорость изменения влажности снижается до 2 %/ч, далее скорость не превышает 0,8 %/ч. Датчики, расположенные на расстоянии 300 мм от дефекта, регистрируют изменение влажности спустя 3 ч после начала испытаний, скорость изменения влажности при этом составляет 0,2 %/ч. Эти результаты хорошо согласуются с расчетами, представленными во второй главе [1, 3, 9, 18]. Следует отметить, что данные характеристики позволяют уменьшить задержку реакции системы на появление утечки (дефекта) до 10 раз по сравнению с традиционной системой на основе измерения электрического сопротивления теплоизоляции.

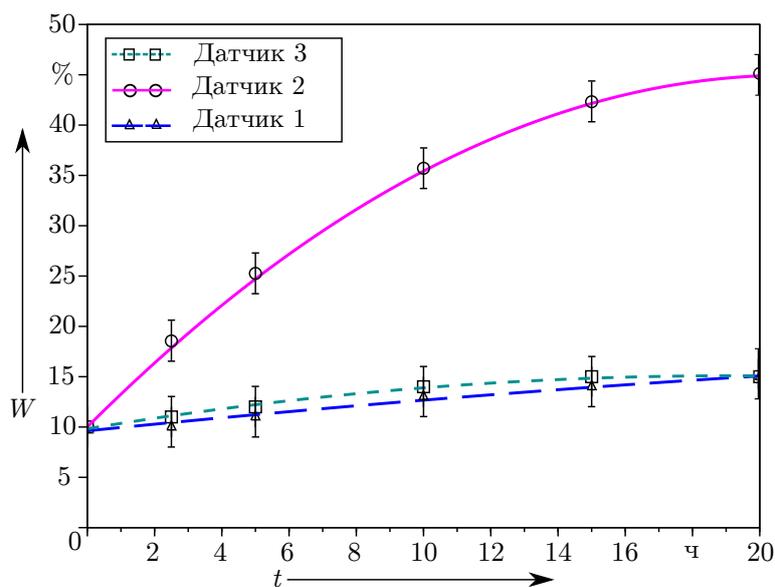


Рисунок 9 – Кривые изменения влажности ППУ-изоляции в процессе испытания цифровой СОДК. Датчик 2 расположен на расстоянии 20 мм, непосредственно над дефектом, датчики 1 и 3 расположены на расстоянии 20 мм от поверхности трубы и на расстоянии 300 мм слева и справа от дефекта соответственно

Ключевыми преимуществами разработанной цифровой СОДК по сравнению с традиционной являются непосредственное измерение влажности и температуры вместо электрического сопротивления ППУ-изоляции, что позволяет улучшить реакцию системы на появление утечки (дефекта трубы или гидрозащитной оболочки), дает возможность осуществлять мониторинг состояния теплоизоляции гибких труб и применять функции GPS для поиска поврежденных участков на местности [19]. Разработанные технические средства и программное обеспечение защищены патентом на полезную модель [28] и свидетельством о регистрации программного обеспечения соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Анализ дефектов труб с пенополиуретановой изоляцией и трубопроводов на их основе показал, что наиболее распространенными являются дефекты гидрозащитной оболочки, а также повреждения, связанные с системой оперативного дистанционного контроля вследствие ошибок при изготовлении и монтаже. Экспериментальное исследование водопоглощения жестких пенополиуретанов (ППУ), используемых в качестве теплоизоляции труб, позволило рассчитать коэффициенты диффузии и исследовать динамику увлажнения ППУ-слоя. Установлено, что максимальная скорость диффузии влаги, обусловленная наличием локализованного дефекта основной трубы или защитной оболочки, наблюдается спустя 1 ч после начала утечки для сочетания компонентов ППУ Изолан А350 + Voranate М225 и 0,8 ч для сочетания компонентов Эластопор Н2130 + IsoPMDI 92140 [1, 2, 6, 26].

2. Экспериментальное исследование показало, что диэлектрическая проницаемость образцов пенополиуретановой изоляции в неувлажненном состоянии составляет $\varepsilon = 1,2 \dots 1,4$ на частотах 1 кГц и 10 ГГц в диапазоне плотностей ППУ $\rho = 60 \dots 80 \text{ кг/м}^3$ и не зависит от типа компонентов ППУ. Электрическое сопротивление составляет более 20 МОм в сухом состоянии, при этом с увеличением влагосодержания в образцах диэлектрическая проницаемость значительно увеличивается, а электрическое сопротивление $R_{\text{из}} < 1 \text{ МОм}$ при содержании влаги более 4 %. На основе этих данных определены параметры для математической модели системы оперативного дистанционного контроля (СОДК) в режиме импульсной рефлектометрии, рассчитаны коэффициенты укорочения и волновое сопротивление линии измерительного тракта СОДК [6, 16, 18, 22].

3. Показано, что измерительный тракт (линия) системы оперативного дистанционного контроля является структурой, в которой распространяются электромагнитные волны ТЕМ-типа, и разработана математическая модель измерительного тракта СОДК в режиме импульсной рефлектометрии на основе телеграфных уравнений. Модель учитывает волновое сопротивление линии в диапазоне $Z_{\text{в}} = 308 \dots 350 \text{ Ом}$ и коэффициент укорочения в диапазоне $k = 1,09 \dots 1,18$, а также пространственную неоднородность свойств ППУ, что в совокупности позволило исследовать эволюцию зондирующего импульса во временной области и сформулировать практические рекомендации, направленные на повышение точности обнаружения повреждений теплоизоляционного слоя до 1,5 м [5, 4, 10, 11, 12, 13, 21, 25, 27].

4. Анализ результатов экспериментальных исследований температурных режимов в процессе изготовления жестких и гибких труб с ППУ-изоляцией показал, что максимальное значение температуры в зоне установки датчиков СОДК в процессе производства труб с пенополиуретановой изоляцией составляет 120 °С и наблюдается спустя 90 с после старта реакции компонентов пенополиуретана. При производстве гибких труб максимальное значение температуры не превышает 105 °С. На основе полученных данных определены требования к типу электронных компонентов цифровой системы оперативного дистанционного контроля [3, 8, 17].

5. Разработана новая система оперативного дистанционного контроля, обеспечивающая непосредственный контроль влажности теплоизоляционного слоя при помощи цифровых датчиков влажности, расположенных в слое пенополиуретановой изоляции жестких или гибких труб, позволяющая уменьшить задержку реакции на появление дефекта до 10 раз по сравнению с традиционной системой на основе измерения электрического сопротивления. Разработано программное обеспечение цифровых датчиков влажности и блока управления цифровой системой, включающее возможность использования GPS для локализации поврежденных участков на местности, а также беспроводную передачу информации на устройство оператора [1, 3, 7, 9, 14, 15, 18, 19, 20, 23, 24, 28].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Экспериментальные результаты, полученные в диссертационном исследовании, могут быть использованы производителями технических средств и узлов систем оперативного дистанционного контроля.

Математическая модель и способ численного интегрирования уравнений могут быть использованы для дальнейшего развития теоретической базы оперативного дистанционного контроля трубопроводов с пенополиуретановой изоляцией. Математическая модель, лабораторная установка и методика численного интегрирования внедрены в образовательный процесс Белорусско-Российского университета.

Разработанная цифровая система оперативного дистанционного контроля внедрена в производство на ЗАО «Завод полимерных труб» для использования в составе гибких труб с ППУ-изоляцией. Система также может быть использована в качестве альтернативного или дополнительного решения для мониторинга ответственных участков тепловых сетей.

Разработанная математическая модель и технические средства рекомендованы к практическому использованию в МГКУП Теплоэнергетики.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Болотов, С. В. Система оперативного дистанционного контроля состояния пенополиуретановой изоляции трубопроводов тепловых сетей с цифровыми датчиками влажности / С. В. Болотов, Н. В. Герасименко // Вестник Белорусско-Российского университета. — 2016. — № 2(51). — С. 30–36.

2. Болотов, С. В. Предотвращение образования дефектов в трубопроводах тепловых сетей в пенополиуретановой изоляции / С. В. Болотов, Н. В. Герасименко, А. В. Лупачев // Энергия и менеджмент. — 2017. — № 4(97). — С. 30–36.

3. Болотов, С. В. Цифровая система оперативного дистанционного контроля состояния изоляции гибких ПИ-труб / С. В. Болотов, Н. В. Герасименко, В. Н. Почуйко // Неразрушающий контроль и диагностика. — 2018. — № 1. — С. 13–19.

4. One-dimensional nonlinear parametric instability of inhomogeneous plasma: Time Domain Problem / N. V. Gerasimenko [et. al.] // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. — 2021. — Т. 24(3). — С. 272–279.

5. Герасименко, Н. В. Импульсная рефлектометрия в системах оперативного дистанционного контроля предварительно изолированных труб / Н. В. Герасименко // Неразрушающий контроль и диагностика. — 2022. — № 3. — С. 14–20.

6. Герасименко, Н. В. Исследование водопоглощения и динамики увлажнения пенополиуретановой изоляции трубопроводов тепловых сетей / Н. В. Герасименко // Вестник Белорусско-Российского университета. — 2022. — № 4(11). — С. 66–74.

Статьи в сборниках научных трудов

7. Болотов, С. В. Контроль состояния ППУ изоляции трубопроводов тепловых сетей цифровыми датчиками влажности / С. В. Болотов, Н. В. Герасименко, В. Н. Почуйко // Неразрушающий контроль композиционных материалов: сборник трудов 1-й дистанционной научно-технической конференции НККМ-2014 «Приборы и методы неразрушающего контроля композиционных материалов». — Санкт-Петербург, 2015. — № 1. — С. 177–183.

8. Болотов, С. В. Контроль температуры полимерного покрытия при производстве ПИ-труб / С. В. Болотов, Н. В. Герасименко, В. Н. Почуйко // Неразрушающий контроль композиционных материалов: сборник трудов

1-й дистанционной научно-технической конференции НККМ-2014 «Приборы и методы неразрушающего контроля композиционных материалов». — Санкт-Петербург, 2015. — № 1. — С. 172–176.

9. Болотов, С. В. Испытание системы оперативного дистанционного контроля с цифровыми датчиками влажности / С. В. Болотов, Н. В. Герасименко, В. Н. Почуйко // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов. — Могилев, 2017. — № 1. — С. 412–417.

10. Герасименко, Н. В. Математическая модель ПИ-трубопровода тепловой сети для контроля мест повреждения методом рефлектометрии / Н. В. Герасименко // Интеллектуальные информационные технологии, энергетика и экономика: сборник трудов XIV Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. — Смоленск, 2020. — № 3. — С. 29–33.

11. Герасименко, Н. В. Математическое моделирование системы оперативного дистанционного контроля на основе телеграфных уравнений / Н. В. Герасименко, С. В. Болотов // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов. — Могилев, 2020. — № 1. — С. 57–60.

12. Болотов, С. В. Повышение точности обнаружения повреждений пенополиуретановой изоляции предварительно изолированных труб методом импульсной рефлектометрии / С. В. Болотов, Н. В. Герасименко // Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве: сборник трудов I Международной научно-практической конференции. — Минск, 2019. — № 2. — С. 240–244.

13. Болотов, С. В. Повышение точности локации повреждений ПИ-труб методом импульсной рефлектометрии / С. В. Болотов, Н. В. Герасименко // Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве: сборник трудов. — Минск, 2020. — № 1. — С. 75–81.

Материалы конференций

14. Болотов, С. В. Программно-аппаратный комплекс управления освещением спортивных объектов / С. В. Болотов, Ф. М. Трухачев, Н. В. Герасименко // Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании: материалы 6-й Международной научно-практической конференции. — Брянск, 2014. — С. 163–165.

15. Герасименко, Н. В. Система автоматизированного управления освещением и контроля параметров электроэнергии / Н. В. Герасименко // Энергетика, информатика, инновации-2014: материалы 4-й Международной научно-технической конференции. — Смоленск, 2014. — С. 15–17.

16. Болотов, С. В. Определение диэлектрической проницаемости пенополиуретановой изоляции методом волноводной СВЧ-интерферометрии / С. В. Болотов, Н. В. Герасименко // 51 студенческая научно-техническая конференция Белорусско-Российского университета. — Могилев, 2015. — С. 36.

17. Болотов, С. В. О возможности использования датчиков влажности для контроля состояния трубопроводов тепловых сетей / С. В. Болотов, Н. В. Герасименко, М. Акпануром // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Международной научно-технической конференции. — Могилев, 2015. — С. 281.

18. Герасименко, Н. В. Исследование скорости увлажнения пенополиуретановой изоляции / Н. В. Герасименко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Международной научно-технической конференции молодых учёных. — Могилев, 2015. — С. 167.

19. Болотов, С. В. Локация мест увлажнения изоляции трубопроводов / С. В. Болотов, Ф. М. Трухачев, Н. В. Герасименко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Международной научно-технической конференции. — Могилев, 2016. — С. 243.

20. Герасименко, Н. В. Разработка программного обеспечения цифровой системы оперативного дистанционного контроля трубопроводов тепловых сетей / Н. В. Герасименко // Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке и образовании. — Брянск, 2017. — С. 225.

21. Численное моделирование одномерной нестационарной нелинейной параметрической неустойчивости / Ф. М. Трухачев, Е. З. Гусаков, Л. В. Симончик, Н. В. Герасименко // VI Конгресс физиков Беларуси. — Минск, 2017. — С. 284.

22. Герасименко, Н. В. Анализ методов и технических средств контроля состояния изоляции трубопроводов тепловых сетей / Н. В. Герасименко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Международной научно-технической конференции молодых учёных. — Могилев, 2017. — С. 238.

23. Герасименко, Н. В. Испытание цифровой системы контроля в процессе изготовления гибких полимерных труб / Н. В. Герасименко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Международной научно-технической конференции. — Могилев, 2018. — С. 341.

24. Герасименко, Н. В. Цифровая система оперативного дистанционного контроля гибких труб с полимерной изоляцией / Н. В. Герасименко,

В. Н. Почуйко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых. — Могилев, 2018. — С. 3–4.

25. Herasimenko, N. V. Pre-insulated pipes leakage positioning accuracy using time domain reflectometry / N. V. Herasimenko // Progress Through Innovations: VIII International Conference, March 28, 2019. — 2019. — P. 196–197.

26. Герасименко, Н. В. Исследование водопоглощения жесткого пенополиуретана / Н. В. Герасименко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Международной научно - технической конференции молодых учёных. — Могилев, 2021. — С. 141.

27. Герасименко, Н. В. Анализ отраженных сигналов в линии СОДК / Н. В. Герасименко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых. — Могилев, 2022. — С. 17–18.

Патенты

28. Система оперативного дистанционного контроля состояния теплоизоляции трубопроводов тепловых сетей : полез. модель ВУ 12887 / Н. В. Герасименко, С. В. Болотов. — Оpubл. 30.06.2022.

РЭЗЮМЭ

Герасіменка Мікіта Васільевіч

СІСТЭМА АПЕРАТЫЎНАГА ДЫСТАНЦЫЙНАГА КАНТРОЛЮ СТАНУ ПЕНАПОЛІЎРЭТАНАВАЙ ІЗАЛЯЦЫІ ТРУБ НА АСНОВЕ ІМПУЛЬСНАЙ РЭФЛЕКТАМЕТРЫ І ЛІЧБАВЫХ ДАТЧЫКАЎ ВІЛЬГОТНАСЦІ

Ключавыя словы: пенаполіўрэтан, аператыўны дыстанцыйны кантроль, маніторынг, вільготнасць, рэфлектаметрыя, трубаправод.

Мэта даследавання: распрацоўка сістэмы аператыўнага дыстанцыйнага кантролю пенаполіўрэтанавай цеплаізаляцыі труб цеплавых сетак на аснове імпульснай рэфлектаметрыі і лічбавых датчыкаў вільготнасці.

Метады даследавання: метады матэматычнай фізікі і лікавага мадэлявання, апрацоўкі эксперыментальных дадзеных. Эксперыментальныя даследаванні праводзіліся шляхам натурнага мадэлявання фізічных працэсаў з ужываннем сучаснай кантрольна-вымяральной тэхнікі і апісаных у ДАСТ методик. Дакладнасць атрыманых тэарэтычных вынікаў ацэньвалася шляхам іх супастаўлення з вынікамі эксперыментаў.

Асноўныя вынікі і іх навізна: даследаваны ўласцівасці пенаполіўрэтанавай ізаляцыі трубаправодаў цеплавых сетак пры розных значэннях вільгацезместу, упершыню атрымана матэматычная мадэль лініі сістэмы аператыўнага дыстанцыйнага кантролю ў рэжыме імпульснай рэфлектаметрыі. Вызначаны аптымальныя параметры імпульсаў і даследаваны ўплыў уласцівасцей пенаполіўрэтанавай ізаляцыі на вынікі дыягностыкі, распрацаваны практычныя рэкамендацыі, накіраваныя на павышэнне эфектыўнасці сістэм аператыўнага дыстанцыйнага кантролю ў рэжыме рэфлектаметрыі. Распрацавана новая сістэма аператыўнага дыстанцыйнага кантролю на аснове лічбавых датчыкаў вільготнасці і тэмпературы. Распрацаваная сістэма забяспечвае непасрэднае вымярэнне вільготнасці і тэмпературы, што павялічвае дакладнасць кантролю і дазваляе кантраляваць стан цеплаізаляцыі гнуткіх труб.

Ступень выкарыстання: вынікі даследаванняў укаранёны ў вытворчасць на ЗАТ «Завод палімерных труб», у адукацыйны працэс Беларуска-Расійскага ўніверсітэта і рэкамендаваны да практычнага выкарыстання ў МДКУП Цеплаэнергетыкі г. Магілёва.

Вобласць выкарыстання: маніторынг стану цеплаізаляцыі труб, папярэдне ізаляваных пенаполіўрэтанам.

РЕЗЮМЕ

Герасименко Никита Васильевич

СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПЕНОПОЛИУРЕТАНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРУБ НА ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ И ЦИФРОВЫХ ДАТЧИКОВ ВЛАЖНОСТИ

Ключевые слова: пенополиуретан, оперативный дистанционный контроль, мониторинг, влажность, рефлектометрия, трубопровод.

Цель исследования: разработка системы оперативного дистанционного контроля пенополиуретановой теплоизоляции труб тепловых сетей на основе импульсной рефлектометрии и цифровых датчиков влажности.

Методы исследования: методы математической физики, численного моделирования и обработки экспериментальных данных. Экспериментальные исследования проводились путем натурального моделирования физических процессов с применением современной контрольно-измерительной техники и описанных в ГОСТ методик. Достоверность полученных теоретических результатов оценивалась путем их сопоставления с результатами экспериментов.

Основные результаты и их новизна: исследованы свойства пенополиуретановой изоляции трубопроводов тепловых сетей при различных значениях влагосодержания, впервые получена математическая модель линии системы оперативного дистанционного контроля в режиме импульсной рефлектометрии. Определены оптимальные параметры зондирующих импульсов и исследовано влияние свойств пенополиуретановой изоляции на результаты диагностики, разработаны практические рекомендации, нацеленные на повышение эффективности систем оперативного дистанционного контроля в режиме рефлектометрии. Разработана новая система оперативного дистанционного контроля на основе цифровых датчиков влажности и температуры. Разработанная система обеспечивает непосредственное измерение влажности и температуры, что повышает достоверность контроля и позволяет контролировать состояние теплоизоляции гибких труб.

Степень использования: результаты исследований внедрены в производство на ЗАО «Завод полимерных труб», в образовательный процесс Белорусско-Российского университета и рекомендованы к практическому использованию в МГКУП Теплоэнергетики г. Могилева.

Область использования: мониторинг состояния теплоизоляции труб, предварительно изолированных пенополиуретаном.

SUMMARY

Gerasimenko Nikita Vasilievich

REMOTE POLYURETHANE FOAM PIPE INSULATION CONDITION MONITORING SYSTEM BASED ON TIME DOMAIN REFLECTOMETRY AND DIGITAL MOISTURE SENSORS

Keywords: polyurethane foam, operational remote control, monitoring, humidity, reflectometry, pipeline.

Aim of the research: development of a system based on time-domain reflectometry and digital humidity sensors for remote monitoring of polyurethane foam pipe insulation.

Research methods: methods of mathematical physics, numerical modeling, and experimental data processing. Experimental research is carried out by means of full-scale modeling of physical processes using modern measuring equipment and methods described in GOST. The reliability of the theoretical results obtained is evaluated by comparing them with the results of experiments.

Main results and their novelty: the properties of polyurethane foam insulation of pipelines of heat networks at different values of moisture content are studied; for the first time a mathematical model of the measuring circuit of the insulation remote monitoring system in the time-domain reflectometry mode is obtained. The optimal parameters of test pulses are determined and the influence of the electrical properties of the polyurethane foam on diagnostic results is studied. Practical recommendations aimed at increasing the efficiency of operational remote monitoring systems in the time-domain reflectometry mode are developed. A new remote monitoring system based on digital humidity and temperature sensors is developed. The developed system provides direct measurement of humidity and temperature, which increases the reliability of control and allows to control the state of thermal insulation of flexible pipes.

Degree of implementation: the results of the research are implemented in production at the CJSC «Polymer Pipe Plant», in the educational process at the Belarusian-Russian University and recommended for practical use in MGKUP Teploenergetiki, Mogilev.

Scope of application: monitoring of the condition of heat insulation of pipes pre-insulated with polyurethane foam.



ГЕРАСИМЕНКО
Никита Васильевич

**СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО ДИСТАНЦИОННОГО
КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПЕНОПОЛИУРЕТАНОВОЙ
ИЗОЛЯЦИИ ТРУБ НА ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНОЙ
РЕФЛЕКТОМЕТРИИ И ЦИФРОВЫХ ДАТЧИКОВ
ВЛАЖНОСТИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий»

Подписано в печать 24.08.2023. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,79. Тираж 60 экз. Заказ № 900.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.