

На правах рукописи



Попова Алёна Ивановна

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ
ОБЕТОНИРОВАННЫХ ТРУБ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА
НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ

25.00.19 – Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ухта – 2013

Диссертация выполнена на кафедре "Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов" ФБГОУ ВПО "Ухтинский государственный технический университет"

Научный руководитель: *Вишневецкая Надежда Семеновна*
кандидат технических наук, доцент кафедры ПЭМГ, Ухтинский государственный технический университет

Официальные оппоненты: *Шарыгин Александр Михайлович*
доктор технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов, Ухтинский государственный технический университет, ведущий научный сотрудник отдела прочности и надежности магистральных газопроводов ОАО «Газпром» МИНТОПЭНЕРГО

Кративский Евгений Исаакович
доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры транспорта и хранения нефти и газа, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»

Ведущая организация: филиал ООО "Газпром ВНИИГАЗ" в г. Ухта

Защита состоится 30 октября 2013 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д.212.291.02 в Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, г. Ухта, Республика Коми, ул. Первомайская, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ухтинского государственного технического университета

Автореферат диссертации разослан " ____ " _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



М. М. Бердник

Введение

Актуальность темы

Доля обетонированных труб используемых в трубопроводном строительстве неуклонно возрастает. Это связано с увеличением объемов строительства трубопроводов, сооружаемых по дну морей и в речных акваториях.

Балластное покрытие трубы изначально может иметь дефекты, снижающие его работоспособность, или получить их в процессе доставки и хранения. Между тем, существующие методы обследования бетона не могут быть использованы для оценки качества балластного слоя обетонированной трубы и требуют адаптации к условиям стройплощадки с учетом конструкции бетонного покрытия. Поэтому совершенствование методов оценки технического состояния обетонированных труб при строительстве нефтегазопроводов является важной и неотложной задачей. Особенно это актуально при организации входного контроля поступающих на трассу строительных конструкций, изделий и материалов.

Цель работы

Совершенствование методов входного контроля обетонированных труб для строительства нефтегазопроводов.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели в работе требуется решить следующие задачи:

- провести анализ существующих методов входного контроля обетонированных труб для выявления возможных дефектов, снижающих работоспособность конструкции;
- сформировать методический комплекс для проведения исследования;
- выполнить теоретические и экспериментальные исследования по совершенствованию методов входного контроля обетонированных труб;
- усовершенствовать методику входного контроля обетонированной трубы;
- оценить результаты промышленного применения методики.

Научная новизна

1. Установлено, что для построения градуировочной зависимости при настройке ультразвукового дефектоскопа граничные условия Пирсона $r \geq 0,7$ и отношение среднеквадратического отклонения к средней прочности $S/R_{cp} \leq 0,15$ соблюдаются при числе испытаний методом отрыва со скалыванием не менее 6 и числе ультразвуковых замеров не менее 12;

2. Установлена зависимость расстояния L между точками акустического контакта датчиков на поверхности бетонного слоя от глубины H выявляемости дефекта, имеющая линейный характер и описываемая уравнением $L = 102,9H - 9,6$;

3. Найдена зависимость минимального размера полостных дефектов d_{\min} от относительного изменения времени распространения колебаний ξ_t , вызываемых дефектом, и расстояния между искателями Z . При использовании искателей с сухим точечным контактом зависимость имеет вид $d_{\min} = Z(\xi_t^2 - 1)^{0,5}$;

4. Установлено, что проведение замеров сквозь полимерный слой позволяет снизить погрешность определения размера подповерхностного дефекта до 2 раз.

Практическая значимость

1. Разработана методика построения градуировочной зависимости для настройки УЗ приборов, не прибегая к кернированию;

2. Предложены схема предварительной разметки бетонной поверхности и усовершенствование конструкции устройства, удерживающего конусные преобразователи, для обследования участка на всю глубину и, при одновременном использовании 4 искателей, сократив время проведения контроля в 3 раза;

3. Предложен способ ультразвукового зондирования бетона сквозь слой полимерной ленты для определения прочности бетона, обнаружения полостных и дефектных участков;

4. Разработан алгоритм обследования бетонного слоя;

5. Предложены математические зависимости для определения размеров единичных включений и дефектных зон способом поверхностного прозвучивания при одностороннем доступе к объекту;

6. Разработаны методы для входного контроля качества обетонированных труб, позволяющие произвести их домонтажную отбраковку и повысить надежность магистрального трубопровода;

7. Методика построения градуировочной зависимости для контроля прочности бетона ультразвуковым дефектоскопом в сочетании с методом отрыва со скалыванием и другие результаты исследований внедрены в практику работы предприятий ООО "Точность", ООО "Эксперт Коми", ООО "Ростехконтроль";

8. Разработана "Методика входного контроля обетонированной трубы" и внедрена на предприятии "Проектный институт нефти и газа Ухтинского государственного технического университета". Результаты исследования использованы при разработке учебного пособия.

Методология и методы исследования

Методология исследования базируется на общенаучных стандартных методах анализа и обобщения фактического материала.

На теоретическом уровне исследования использовались такие методы, как формализация процессов и явлений, принятие гипотезы, создание теории на основе известных математических подходов и приемом.

Для изучения процессов и явлений применялся модельный эксперимент в лабораторных условиях и натурный эксперимент на конструкции обетонированной трубы.

Положения, выносимые на защиту

Разработанная методика построения градуировочной зависимости, предназначенная для настройки ультразвукового дефектоскопа при контроле качества бетонного слоя (заявка №2013121163 от 07.05.2013 г).

Установленная зависимость расстояния между точками акустического контакта датчиков от глубины выявления дефекта, определяющая необходимое расстояние между искателями.

Разработанный метод ультразвукового контроля, позволяющий в условиях одностороннего доступа выявить пустоты в бетонном слое и определить размеры этих пустот.

Предложенный способ ультразвукового контроля, позволяющий обнаружить единичные дефекты (посторонние включения) и дефектные зоны (зоны с нарушенной структурой) способом ультразвукового зондирования сквозь слой полимерной ленты.

Усовершенствованная методика входного контроля, включающая контроль бетонного слоя обетонированных труб.

Достоверность полученных результатов обеспечивается повторяемостью результатов, использованием для исследования образцов, по своему строению и характеру дефектов максимально приближенных к фактическому строению бетонного покрытия трубы, репрезентативным количеством выполненных измерений, корректным применением современных теоретических и экспериментальных методов исследований, а также использованием поверенного исследовательского оборудования, приборов и средств измерений и привлечением аттестованных специалистов.

Апробация результатов исследования

Основные результаты диссертационного исследования были представлены: на научно-технической конференции (13–15 апреля 2010 г., УГТУ, г. Ухта); на межрегиональном семинаре Рассохинские чтения (3-4 февраля 2011 г., УГТУ, г. Ухта); на 8-м Международном Молодежном Нефтегазовом Форуме, (16-17 апреля 2011 г., КазНТУ, г. Алматы); на научно-технической конференции преподавателей и сотрудников (12-15 апреля 2011 г., УГТУ, г. Ухта); на научно-технической конференции (17–20 апреля 2012 г., УГТУ, г. Ухта); на 4-ой научно-практической конференции "Республика Коми: вчера, сегодня, завтра. Перспективы развития в XXI века" (26-27 октября 2011 г., УГТУ, г. Ухта); на VIII Международной учебно-научно-практической конференции "Трубопроводный транспорт - 2012" (8-9 ноября 2012 г., УГНТУ, г. Уфа); на межрегиональной научно-технической конференции "Актуальные проблемы разработки нефтяных месторождений" (24-25 октября 2012 г., ООО "ЛУКОЙЛ-Инжиниринг" "ПечорНИПИнефть", г. Ухта); на Всероссийской конференции "Развитие инженерного образования в России" в "Выставке молодежных научно-исследовательских проектов. Санкт-Петербургский образовательный форум – 2012" (с 28 марта по 1 апреля 2012 г., г. Санкт-Петербург); на IV Всероссийском конкурсе молодых ученых (с 16-18 октября 2012 г., г. Миасс).

Публикации

По теме диссертации опубликованы 22 научные работы, в том числе 9 в изданиях, включенных в "Перечень ..." ВАК Минобрнауки России.

Автор глубоко признателен научному руководителю - кандидату технических наук, доценту кафедры ПЭМГ Н.С. Вишневской за помощь в выборе

темы исследования, внимательное руководство и всестороннюю помощь при завершении работы над диссертацией.

Автор выражает глубокую благодарность доктору технических наук, профессору И.Ю. Быкову, чьи рекомендации способствовали более качественному изложению материалов, за неоценимую помощь и научные консультации.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти частей, заключения, библиографического списка из 108 наименований и 10 приложений. Основное содержание и общие выводы изложены на 190 страницах машинописного текста, содержащих 44 рисунка и 27 таблиц.

Содержание работы

Во введении обосновывается выбор и актуальность темы, место исследования в современной науке, освещаются цели и задачи работы, теоретическая и практическая значимость, научная новизна, методы исследования.

В первой главе диссертации проанализирован существующий уровень техники в области входного контроля обетонированных труб. В процессе работы использованы фундаментальные положения и результаты, полученные в работах известных исследователей, таких как Г. Б. Гершкович, В. В. Гулунов, А. К. Гурвич, О. О. Карапетян, А. В. Ковалев, В. Н. Козлов, М. Г. Коревицкая, Б. А. Круглов, В. Г. Липник, А. В. Мотовилов, В. Е. Поляков, К. Н. Попов, А. И. Потапов, Г. Я. Почтовик, Л. М. Пухонто, Ю. М. Рапопорт, Г. Н. Руфферт, А. А. Самокрутов, А. М. Филонидов В. Г. Шевалдыкин, Д. С. Шрайбер, В. Г. Штенгель, Л. М. Яблоник, Н. Н. Яковлев и др.

Для проведения входного контроля обетонированных труб применяется визуально-измерительный контроль. Оценка качества бетона сводится к простукиванию для обнаружения пустот и к определению массы конструкции в воздушной и водной средах. Но для выявления таких дефектов бетона как ненормативная прочность бетона, недостаточная упругость или неоднородность необходимо использовать приборные методы контроля. Данные о технической возможности приборов различного способа действия приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Техническая возможность методов контроля

Контролируемый параметр	Метод НК	Техническая возможность
Отклонение положения арматуры	Магнитный метод	+
Наличие трещин	Ультразвуковой импульсный метод	+
Наличие полостных дефектов	Ультразвуковой импульсный метод	+
Определение прочности бетона	Ультразвуковой импульсный метод	+
	Ударный метод	+
	Отрыва со скалыванием	+
	Упругого отскока	+
	Резонансный	+
Определение размера дефектов при одностороннем доступе	Ультразвуковой импульсный метод	не установлено
Дефектоскопия сквозь ленточное покрытие	Ультразвуковой импульсный метод	не установлено

По результатам анализа установлено:

- недостаточно исследовано влияние качественных характеристик бетона на параметры ультразвуковой (УЗ) волны при одностороннем доступе;
- не изучено влияние стальной арматуры и ленточного покрытия на результаты УЗ контроля бетона;

- глубина прозвучивания переносных УЗ дефектоскопов составляет 4-5 см и является недостаточной для контроля бетонного слоя толщиной до 15 см.

Классификация возможных дефектов бетонного слоя представлена на рисунке 1.

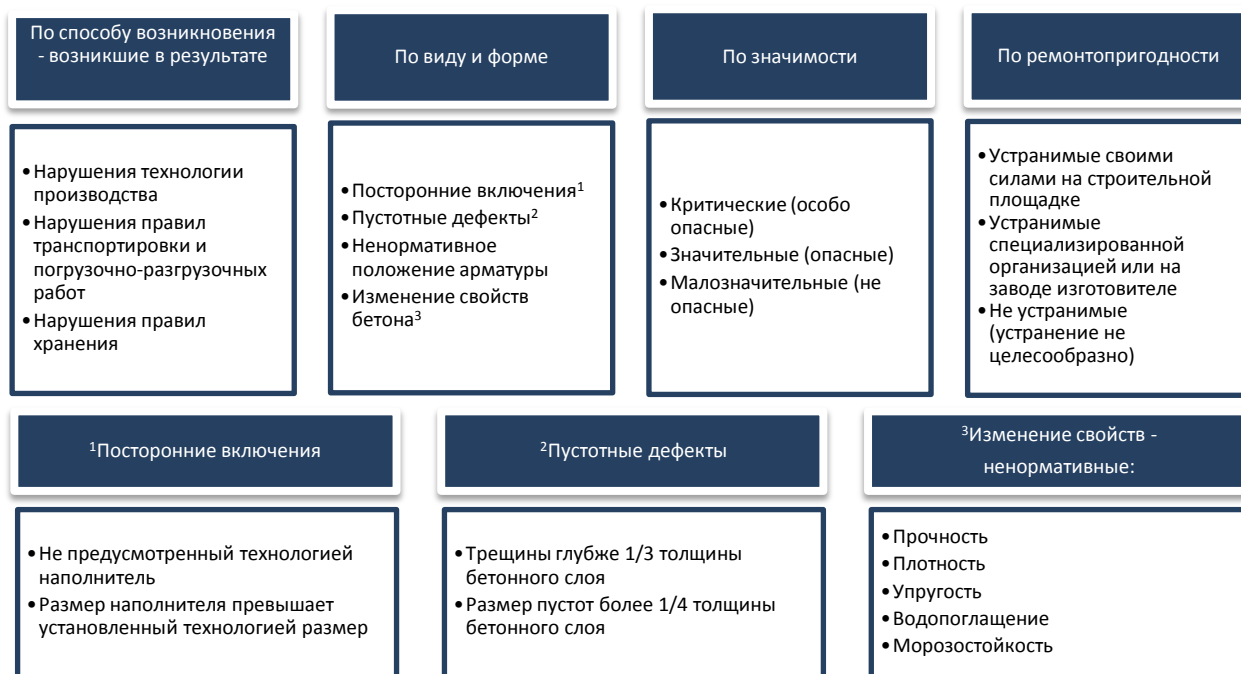


Рисунок 1 – Классификация вероятных дефектов бетонного слоя

Применяемые методики обследования элементов конструкции обетонированной трубы основаны на действующей нормативно-технической документации. Контроль качества металла и сварных швов проводится согласно ГОСТ 14782-86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые; РД 03-606-03. Инструкция по визуальному и измерительному контролю; СТО Газпром 2-3.7-050-2006. Морской стандарт DNV-OS-F10. Подводные трубопроводные системы. Наружный диаметр концов труб, толщина стенки и другие геометрические параметры проверяются по методике СТО Газпром 2-2.1-131-2007. Инструкция по применению стальных труб на объектах ОАО "Газпром" и сопоставляются с техническими условиями изготовителя. Толщина, диэлектрическая сплошность антикоррозионной изоляции, адгезия к стали, прочность при ударе и сопротивление вдавливанию определяются по ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. Для контроля толщины и расположения арматуры в бетоне строительных конструкций при обследованиях применяют магнитные, электромагнитные или вихревые методы по ГОСТ 22904-93. Конструкции железобетонные. Магнитный метод определения толщины защитного слоя бетона и расположения арматуры с выборочной контрольной проверкой получаемых результатов путем пробивки борозд.

Существуют разрушающие (метод стандартных образцов, использование выбуренных из конструкции кернов), частично разрушающие (отрыва со скалыванием и скалывание ребра) и неразрушающие (пластической деформации, упругого отскока, ударного импульса, ультразвуковой) методы контроля бетона на прочность. УЗ-метод при использовании индивидуальной градуировочной зависимости является точным и информативным, позволяя определять прочность, упругость, плотность и целостность структуры бетона. При использовании УЗ-метода непосредственно измеряемой величиной является физический показатель (скорость УЗ-сигнала, время прохождения УЗ-сигнала), связанный с измеряемой величиной корреляционной зависимостью.

По данным Шанхайского университета значительное число аварий на морских трубопроводах связано с коррозией, структурными дефектами и качеством материала (в сумме 39%), что свидетельствует о необходимости ужесточения входного мониторинга прочностных свойств бетонных покрытий. (см. рис. 2)

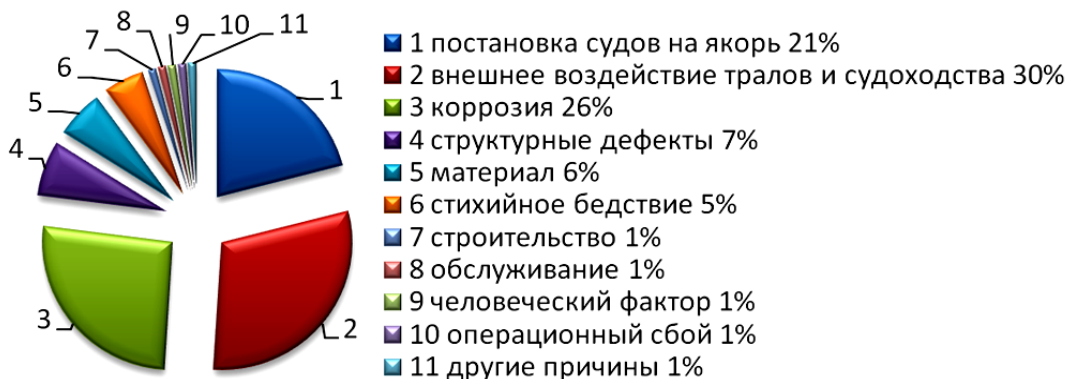


Рисунок 2 – Ранжирование причин аварий стальных морских трубопроводов

Аналогичные сведения содержатся в базе PARLOC 2001, где сообщается о 13 происшествиях в Северном море, при этом покрытие повреждено на 3 трубопроводах. Одной из вероятных причин является недостаточная прочность бетонного слоя.

Между тем, методики по оценке прочности бетонного покрытия трубы в составе сложной конструкции до настоящего времени не существует. Стандартный методический комплекс не учитывает особенностей входного контроля обетонированных труб: отсутствуют образцы для испытаний при построении градуировочной зависимости; недостаточна толщина бетонного слоя для изъятия кернов; отсутствует двусторонний доступ к поверхности бетона; наличие защитного покрытия на поверхности бетона; потребность в оснащении передвижной лаборатории неразрушающего контроля простыми в обслуживании приборами небольшой массы и габаритов.

Исходя из перечисленных проблем, определены задачи настоящего исследования.

Во второй главе представлен комплекс методик для проведения исследования, включающий: государственные стандарты и инструкции в области входного контроля и контроля качества бетона, рекомендованные к применению Госстроем России, НИИ ЖБ и Службой передового опыта ОРГНРЭС.

Поскольку комплекс методик входного контроля обетонированных труб до настоящего времени не разработан, предложено обобщить методические рекомендации по построению индивидуальных градуировочных зависимостей и оценки погрешности определения прочности ГОСТ 17624-87 и рекомендации НИИЖБ МДС 62-2.01, метод определения размера пустотных дефектов при сквозном прозвучивании, предложенный Ю. М. Рапопортом, правила обработки результатов ультразвукового контроля прочности бетона по СНиП 52-01-2003 и ГОСТ Р 53231-2008.

Тогда методический порядок оценки структурных показателей бетонных покрытий представляется следующим:

– при выполнении условия

$$R_{\max} - R_{\min} \leq 2\bar{R}_{\phi} (60 - \bar{R}_{\phi}) / 100, \quad (1)$$

где \bar{R}_{ϕ} – средняя прочность бетонов, испытанных методом отрыва со скалыванием при установлении градуировочной зависимости; R_{\max} , R_{\min} – максимальное и минимальное значения прочности по результатам ультразвукового замера, градуировочные зависимости принимают линейный вид

$$R_i = a_0 + a_1 x, \quad (2)$$

где R_i – прочность в i -м участке конструкции; a_0 и a_1 – коэффициенты искомой зависимости; x – скорость (время) распространения ультразвука

$$a_0 = \bar{R}_{\phi} - a_1 \bar{x}, \quad (3)$$

где \bar{R}_{ϕ} – средняя прочность бетонов, испытанных методом отрыва со скалыванием; \bar{x} – средняя скорость (время) распространения ультразвука

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^p (\bar{R}_{\phi} - R_{i\phi}) (\bar{x} - x_i)}{\sum_{i=1}^p (\bar{x} - x_i)^2}, \quad (4)$$

где p – число участков, испытанных при установлении градуировочной зависимости; $R_{i\phi}$, x_i – значения фактической прочности (по результатам испытаний) и скорости (времени) распространения ультразвука в i -м участке конструкции;

– проводят корректировку градуировочной зависимости отбраковкой единичных результатов испытаний, не удовлетворяющих условию

$$|R_{i\phi} - R_{i\phi}| / S \leq 2, \quad (6)$$

где $R_{i\phi}$ – прочность бетона, определенная по градуировочной зависимости в i -м участке конструкции; S – остаточное среднее квадратическое отклонение, определенное по формуле

$$S = \left[\sum_{i=1}^p (R_{i\phi} - R_{i\phi})^2 / p - 2 \right]^{0,5}; \quad (7)$$

– определяется линейный коэффициент корреляции по формуле Пирсона

$$r = \text{cov}_{R_{\phi}, x} / \sigma_{R_{\phi}} \sigma_x = \frac{\sum_{i=1}^p (R_{i\phi} - \bar{R}_{\phi})(x_i - \bar{x})}{\left[\sum_{i=1}^p (R_{i\phi} - \bar{R}_{\phi})^2 \sum_{i=1}^p (x_i - \bar{x})^2 \right]^{0,5}}. \quad (8)$$

При выполнении условия $r \geq 0,7$ и $S/R_{cp} \leq 0,15$, где R_{cp} – средняя прочность бетона конструкции по данным УЗ замеров, установленная градуировочная зависимость не отвергается;

– определяют среднеквадратическую ошибку градуировочной зависимости

$$S_{\tau} = (S^2 + S_{\text{мет}}^2)^{0,5}, \quad (9)$$

где $S_{\text{мет}}$ – среднеквадратическая ошибка метода отрыва со скалыванием, принимаемая 0,04 от средней прочности бетона участков использованных для построения зависимости при анкерном устройстве с глубиной заделки 48 мм, 0,05 средней прочности – глубиной 35 мм, 0,06 средней прочности – глубиной 30 мм, и 0,07 средней прочности – глубиной 20 мм;

– рассчитывают фактическую прочность бетона в конструкции

$$R_m = \sum_{i=1}^n R_i / n, \quad (10)$$

где n – количество участков УЗ замеров;

– рассчитывают коэффициент вариации прочности бетона в конструкций

$$V_m = 100 S_m / R_m, \quad (11)$$

где S_m – среднеквадратическое отклонение прочности

$$S_m = (S + S_{\tau} / (n - 1)^{0,5}) \cdot (1 / (0,7r + 0,3)); \quad (12)$$

– находят требуемую прочность бетона

$$R_T = K_T B, \quad (13)$$

где K_T – коэффициент, принимаемый по таблице 2 ГОСТ 53231-2008; B – нормируемое значение прочности бетона;

– определяется фактический класс бетона

$$B_{\phi} = R_m / K_T; \quad (14)$$

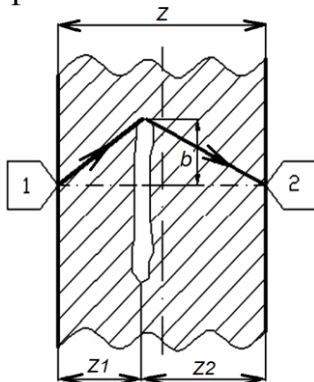
– при сквозном прозвучивании определяют расстояние между краем дефекта и осевой линией искателей (рис. 3) по формуле Ю.М. Рапопорта

$$b = (Z / 2 \xi_t) [(\xi_t^2 - 1)(\xi_t^2 - n^2)]^{0,5}, \quad (15)$$

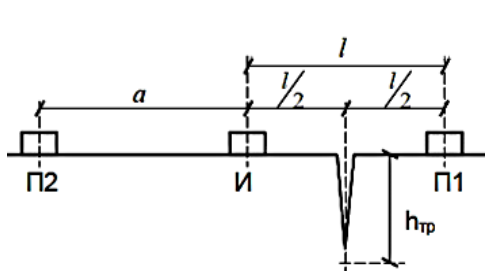
где Z – толщина изделия; ξ_t – увеличением времени распространения УЗ колебаний, вызванное наличием дефекта; n – коэффициент, характеризующий положение дефекта по толщине изделия

$$\xi_t = t_d / t_0, \quad n = |Z_2 - Z_1| / Z;$$

Рисунок 3 – Расчетная схема чувствительности временно-го теневого метода дефектоскопии для сквозного прозвучивания



– определяется глубина трещин в бетонной поверхности (рис.4)



$$h_{\text{тр}} = a((t_1 / t_a)^2 - 1)^{0,5} / 2. \quad (16)$$

l – база измерения на бетоне через трещину (положение датчиков И-П1), a – база измерения на «чистом» бетоне (положение датчиков И-П2); $h_{\text{тр}}$ – глубина трещины, мм, при обязательном условии, $a=1$

Рисунок 4 – Схема установки датчиков для определения глубины трещины

В третьей главе освещены теоретические и экспериментальные исследования связанные с порядком, методами и средствами контроля технического состояния балластного покрытия стальных труб.

Согласно ГОСТ 17624-87 использование УЗ-приборов требует их тарировки по индивидуальной градуировочной зависимости, построенной с испытанием кернов, что в условиях строительной площадки практически не возможно. Рекомендации НИИЖБ МДС 62-2.01 позволяют для тарировки проводить испытания методом отрыва со скалыванием, но методика по сопоставлению результатов УЗ замеров и испытаний отрывом со скалыванием не отработана, нет рекомендаций по необходимому и достаточному количеству замеров и испытаний. На рисунке 5 и 6 показан характер разрушения бетонов при извлечении керна из балластного слоя и при вырыве анкерного устройства.

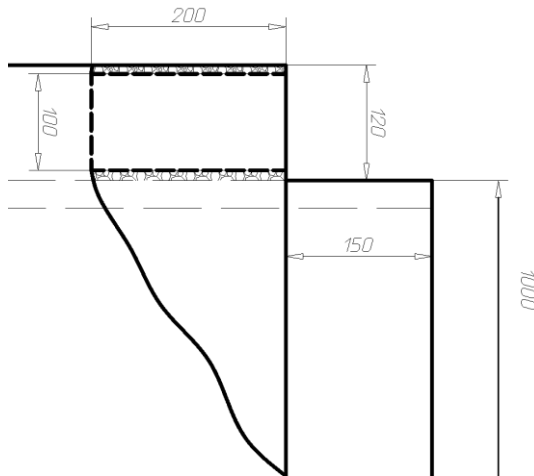


Рисунок 5 – Характер разрушения при отборе образцов для прессования с помощью технологии алмазного бурения

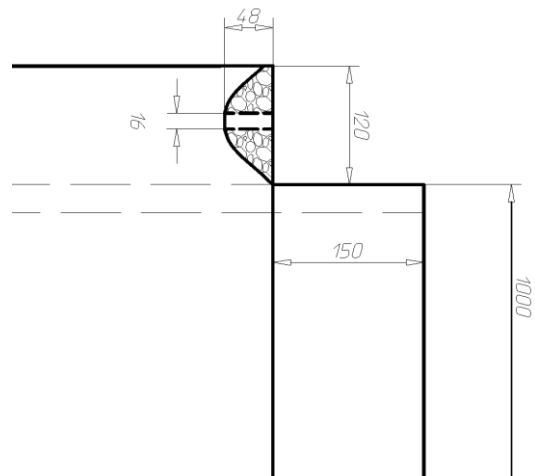


Рисунок 6 – Характер разрушения при вырыве анкера для определения прочности методом отрыва со скалыванием

Исследования показали, что для реализации этого способа следует выполнить не менее 12 УЗ-замеров и не менее шести замеров способом отрыва со скалыванием в торцевой поверхности покрытия (см. рис.7 и 8) на одной трубе из партии. Автором оформлена заявка на изобретение "Способ ультразвукового контроля прочности бетона в конструкциях малых толщин" зарегистриро-ванная под номером №2013121163 от 07.05.2013 г.

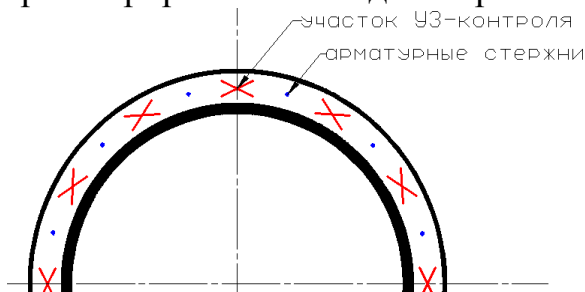


Рисунок 7 – Схема размещения участков УЗ контроля на торцевой поверхности обетонированной трубы

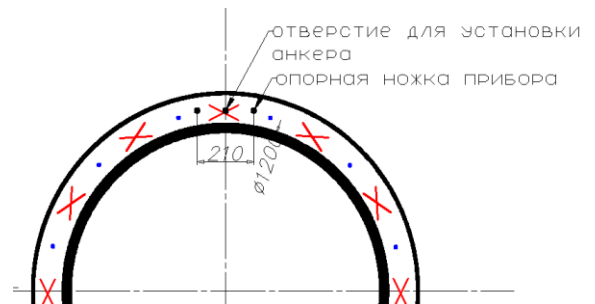
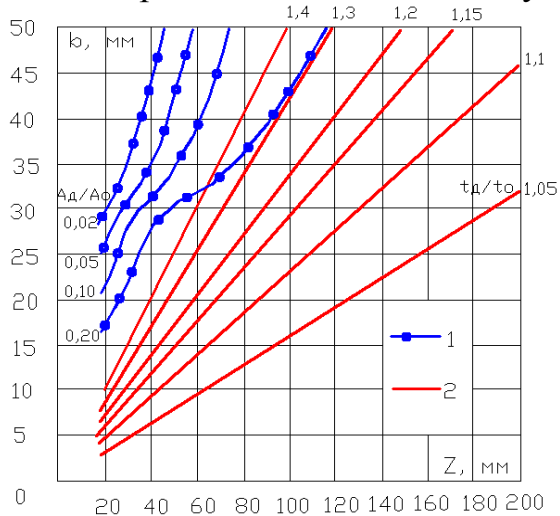


Рисунок 8 – Схема размещения прибора "ОНИКС-ОС" на торцевой поверхности обетонированной трубы

Для построения экспериментальной градуировочной зависимости было сформировано 10 бетонных образцов 220x220x120, подвергнутых УЗ замерам и испытаниям методом отрыва со скалыванием. В ходе эксперимента использовались прибор "ОНИКС-ОС" и прибор "Пульсар 1.2", имеющий встроенные универсальные линейные зависимости в виде графика, построенного по

уравнению линейного вида $R = a_0 + a_1 v$. Коэффициенты a_1 и a_0 вычислены по формулам ГОСТ 17624-87 (3, 4) при соблюдении условия (2). По результатам экспериментальных замеров и проведенных расчетов получена индивидуальная градуировочная зависимость $R = 1,9 + 0,005v$.

По результатам опытного сопоставления чувствительности амплитудного, временного и эхо-метода, проведенного М.Ю. Рапопортом (1975 г.) сделан выбор оптимального метода ультразвуковой дефектоскопии.



Эхо-метод на низких УЗ-частотах выявил наличие реверберационных помех и неконтролируемой зоны. В интересующем диапазоне толщин (80-150 мм) чувствительность амплитудного метода оказалась значительно ниже, чем чувствительность временного (рис.9).

1 – чувствительность амплитудного теневого метода (бетон); 2 – чувствительность временного теневого метода

Рисунок 9 – Сопоставление чувствительности амплитудного и временного теневых методов дефектоскопии

Возможность проводить контроль поверхностными датчиками в условиях одностороннего доступа определила выбор в пользу последнего.

Для исследования влияния пустотных включений и стальной арматуры в бетоне на изменение времени прохождения импульса созданы модели многослойной конструкции обетонированной трубы, максимально приближенные к своим аналогам по расположению и толщине слоев и вероятным дефектам. Модель №1 состояла послойно из стального листа, антикоррозионного слоя, слоя бетона, армированного арматурой (рис. 10). Модель №2 покрыта полимерной пленкой, аналогично конструкции балластного покрытия трубы производства ООО "Бредеро Шо Архангельск". Модель №3 включает три отверстия диаметром 53 мм на различной глубине (см. рис. 11).

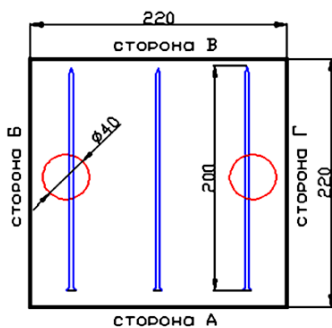


Рисунок 10 – Схема заложения имитаций "пор" и "арматуры" в опытной модели №1

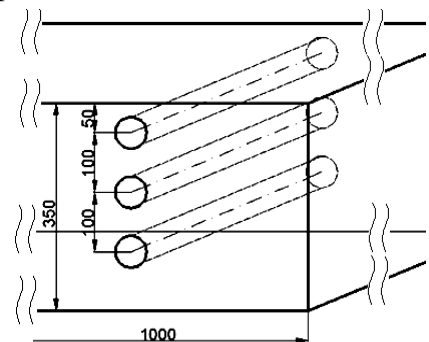
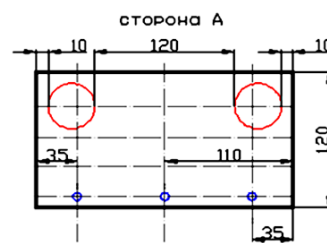


Рисунок 11 – Схема бетонного блока модели №3

Вначале исследовался механизм *сквозного* прозвучивания модели №1 по заранее размеченным точкам (рис. 12). График изменения времени прозвучивания в направлении А-В иллюстрирует эффект огибания "поры" ультразвуковым импульсом. При этом установлено, что в случае совпадения оси прутков и линии прозвучивания, скорость его увеличивается, а время прохождения импульса уменьшается (рис. 13).

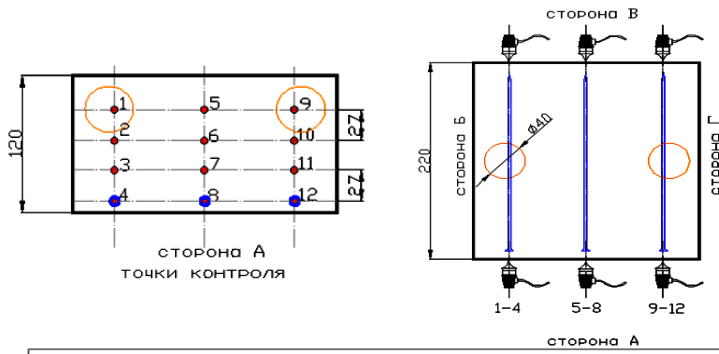


Рисунок 12 – Схема расположения участков контроля при проведении замеров способом сквозного прозвучивания



Рисунок 13 – График изменения времени прохождения УЗ сигнала по результатам сквозного прозвучивания по боковым поверхностям модели №1 по стороне А-В

Далее проведены опыты по выявлению искусственных пустот при *поверхностном* прозвучивании. Замеры произведены прибором "Пульсар" по представленной схеме (см. рис. 14).

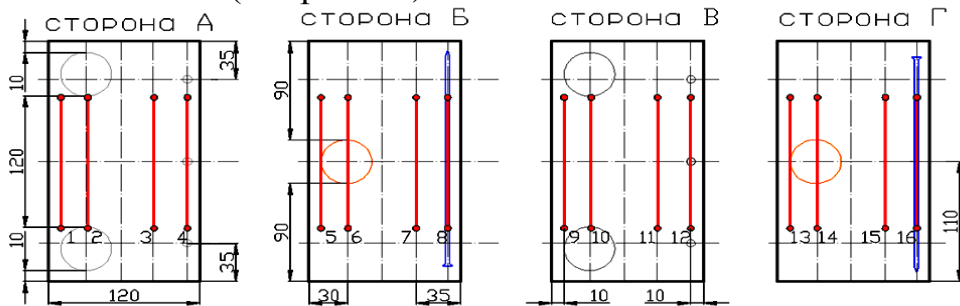


Рисунок 14 – Схема расположения участков контроля при проведении замеров способом поверхностного прозвучивания

График изменения времени прохождения сигнала иллюстрирует эффект огибания "поры" зондирующим импульсом (см. рис. 15).



Рисунок 15 – График изменения времени прохождения УЗ сигнала по результатам поверхностного прозвучивания по боковым поверхностям модели №1

Точки 6 и 13 соответствуют местам заложения "поры" диаметром 40 мм. Точки 8 и 16 соответствуют местам заложения "арматуры" (стальные пруты длиной 200 мм диаметром 3,5 мм). Зафиксированные отклонения превышают допустимую погрешность прибора, равную $\pm(0,01t + 0,1)$, где t - измеренное

время, мкс. Т.о. по изменению времени прохождения импульса определяется место нахождения пустотных дефектов и наличие и направление арматуры.

Сопоставление и обработка результатов исследований Ю.М. Рапопорта и собранной экспериментальной базы позволили получить выражение для определения диаметра пустотного включения по результатам поверхностного прозвучивания при одностороннем доступе к объекту:

$$d_{\min} = Z(\xi_t^2 - 1)^{0,5}, \quad (17)$$

Например в точке 13 размер полости составит:

$$\xi_t = t_d/t_o = 36,15/34,06 = 1,06; \quad d_{\min} = Z(\xi_t^2 - 1)^{0,5} = 120(1,06^2 - 1)^{0,5} = 42,2 \text{ мм.}$$

Получен размер "поры" равный 42,2 мм, что отличается от фактического на 5,5 %.

Бетонная поверхность труб производства ООО "Бредеро Шо Архангельск" скрыта под слоем полимерной липкой ленты. Для эксперимента использовалась модель №2, замеры проводились по схеме на рис. 16: по открытой поверхности бетона (условие 1), по полимерному покрытию толщиной 1 мм (условие 2) и 2 мм (условие 3). Результаты исследования характеризуются графиком, представленным на рисунке 17.

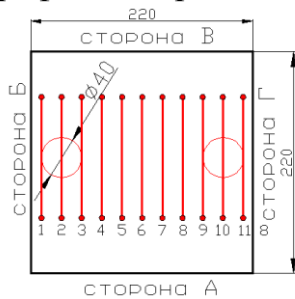


Рисунок 16 – Схема установки датчиков

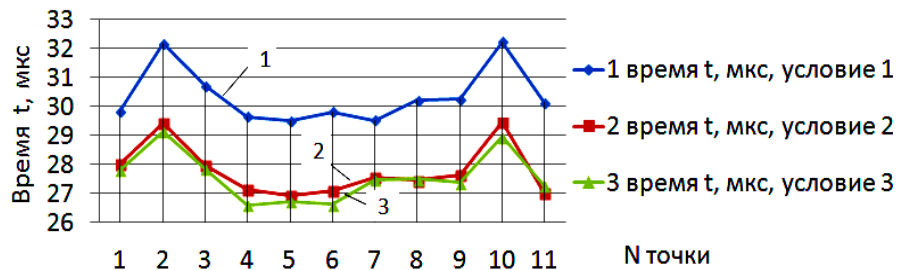


Рисунок 17 – График изменения времени прохождения сигнала в контролируемых точках

По графику видно, что на линиях замеров 2 и 10, где размещены искусственные "поры", время прохождения сигнала увеличилось. При этом характер линий графика в условии 1 и условиях 2 и 3 сохраняется, а значит доказана возможность определения местоположения и размера пустотных включений через полимерную пленку толщиной до 2 мм. Результат расчета представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Результат расчета величины пустот для условий 1-3

	Ср.знач	Откл., Δt, мкс		Отн.изм., ξt, д.е.		d _{min} , мм		Откл. от факт., %	
	1-11	2	10	2	10	2	10	2	10
1	30,4	1,8	1,9	1,0591	1,0611	41,8608	42,5752	4,65	6,44
2	27,8	1,6	1,7	1,0582	1,0596	41,5289	42,0540	3,82	5,13
3	27,6	1,6	1,4	1,0564	1,0503	40,8835	38,5282	2,21	3,48

Сопоставив расчетные значения d_{min} и фактический размер поры, равный 40 мм, отметим, что отклонения находятся в пределах 6,5÷2,2%, что вполне удовлетворительно. При этом погрешность определения размера подповерхностного дефекта сквозь слой полимерной пленки снижается до 2 раз.

Для определения зависимости глубины выявляемости дефекта Н от расстояния между точками акустического контакта датчиков (базы измере-

ния L) были проведены экспериментальные замеры на бетоном блоке с высверленными на разной глубине отверстиями (рис. 11). УЗ замеры производились дефектоскопом "Пульсар" методом поверхностного прозвучивания с использованием датчиков с точечным акустическим контактом. Точки контроля, где величина ξ_t составляла более, чем 1,05 выявляли границы пустотного включения и определяли чувствительность прибора (рис.18). Затем сопоставлялись глубина обнаружения дефекта H и база измерения на поверхности бетонного слоя L, при котором это изменение было зафиксировано (рис. 19). По результатам замеров установлена зависимость глубины выявляемости дефекта H от расстояния между точками акустического контакта датчиков на поверхности бетонного слоя L: $L = 102,9H - 9,6$. Установленная зависимость позволяет размещать искатели так, чтобы контролировать бетонный слой на всю его глубину.

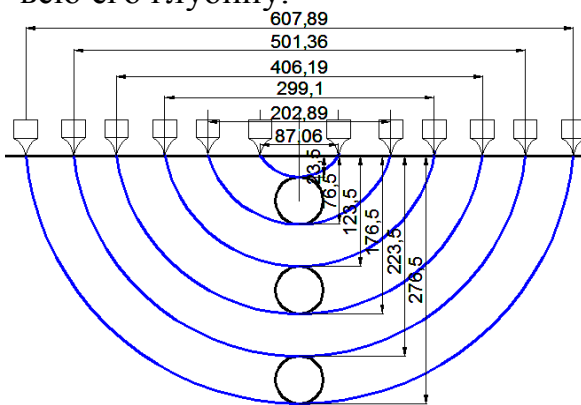


Рисунок 18 – Схема проведения замеров для определения чувствительности прибора



Рисунок 19 – График чувствительности временного метода

Для минимизации необследованных участков предлагается располагать участки контроля в шахматном порядке (шаг 4x24 см) так, чтобы они перекрывали друг друга (рис. 20). Совершенствование конструкции устройства для удержания конусных преобразователей (рис. 21) и предложенная схема разметки позволяют обследовать участок на всю глубину и при одновременном использовании 4 искателей сократить время проведения контроля в 3 раза.

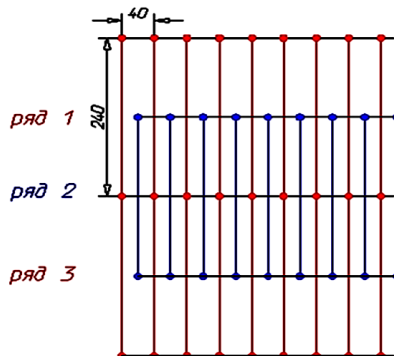


Рисунок 20 – Расположение участков контроля бетонной поверхности

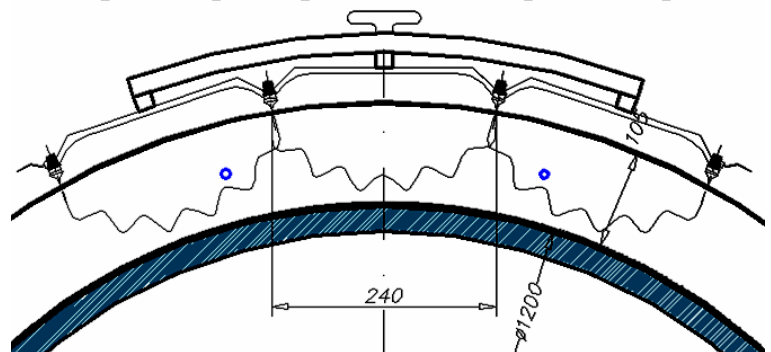


Рисунок 21 – Схема установки устройства для поверхностного прозвучивания на бетонную поверхность трубы

Методика входного контроля обетонированных труб включает: требования к процессу и методы входного контроля, организационное обеспечение и требования к безопасности, рекомендации по организации работ и контролю

качества обетонированной труб, подбор оборудования для входного контроля, и программу обследования сложной конструкции обетонированной трубы.

Обследование бетонного слоя проводится поэтапно в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 22.

Первым этапом является 10% визуальный контроль, остальные трубы подвергаются наружному осмотру. При обнаружении дефектов они фиксируются и назначаются к более детальному изучению. Карбонизацию бетона выявляют визуально, простукиванием, либо смачиванием раствором фенолфталеина.

На втором этапе на 10 % труб контролируются геометрические параметры и масса конструкции в воде и на воздухе, для определения ее фактической балластирующей способности и объемов пустот в бетоне.

На третьем этапе определяют прочность бетона на 10 % труб. УЗ замеры прочности бетона рекомендуется производить на торцевых участках бетонного слоя. Измерения косвенного показателя (времени или скорости распространения УЗ волны), необходимо проводить на расстоянии не ближе 50 мм от арматурного стержня в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Градуировочную зависимость следует строить, принимая за единичное значение среднее значение косвенных показателей в участке и фактическую прочность бетона участка, определенную методом отрыва со скалыванием по формулам (1-8) на основе не менее чем 6 испытаний и не менее, чем 12 УЗ замеров.

Следующим этапом УЗ дефектоскопом проверяется прочность материала, его плотность и модуль упругости, которые сопоставляются с пределами допустимых значений по техническим условиями завода изготовителя.

Последним этапом проводится дефектоскопия приповерхностных слоев на участках, назначенных к детальному обследованию по результатам ВК и замеров прочности. Место нахождения дефектов и их размер определяется по аномальному изменению времени прохождения УЗ волны. Если дефект имеет вытянутую форму при небольшой ширине, его проекция может быть определена путем перемещения искателя по линии наибольшего относительного отклонения времени распространения колебаний. Размеры подповерхностных полостных дефектов, в том числе и сквозь слой полимерной ленты, следует определять расчетным путем по предложенной автором формуле (17). Глубина трещин при их наличии определяется по методике, предложенной НПП "Интерприбор" или РД 153-34.1-21.326-2001 по изменению времени распространения ультразвука методом продольного профилирования при условии, что плоскость трещинообразования перпендикулярна линии прозвучивания (16).

Обработка результатов контроля проводится согласно действующим нормативным документам с учетом предложений автора по совершенствованию методов контроля по формулам (9-17).

Правила выбраковки балластного слоя включают следующие основные положения:

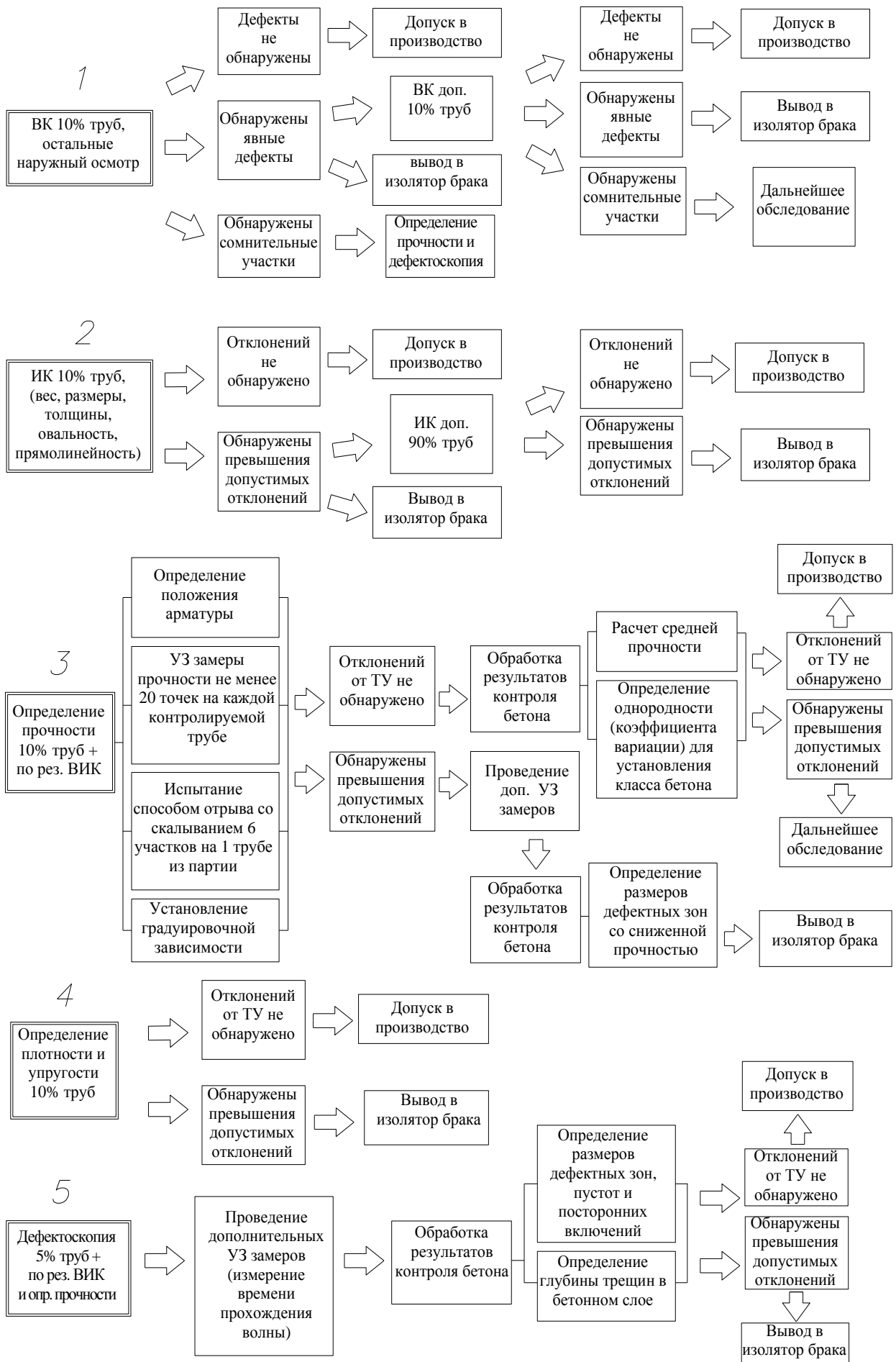


Рисунок 22 – Алгоритм обследования бетонного слоя обетонированной трубы

– минимальная толщина защитного слоя бетона над арматурой должна быть не менее 20 мм. Арматурные стержни должны отвечать требованиям ГОСТ 5781 при их минимальном диаметре 6 мм. Расстояние между кольцами круговой арматуры должно быть не более 120 мм;

– значения действительных отклонений от линейного размера по длине $\pm 10,0$ мм, от прямолинейности на длине 1000 мм $\pm 2,5$ мм и на всей длине трубы $\pm 5,0$ мм, от перпендикулярности торцевых поверхностей 5,0 мм, если иное не предписано техническими условиями завода изготовителя;

– расчетная плотность и толщина балластного покрытия должна быть в пределах $2200 \div 3400$ кг/м³ и $25 \div 150$ мм. Прочность на сжатие на 28 день после производства должна быть не менее 40 МПа;

– максимальный размер трещин не должен превышать 1/3 толщины бетонного слоя, а пустот 1/4 толщины бетонного слоя. Технические требования к трубам для подводного использования нормируют так же водопоглощение ≤ 8 % и ударную прочность покрытия ≥ 5 кДж.

В четвертой главе приведен пример построения градуировочной зависимости по результатам замеров на модели конструкции обетонированной трубы по формулам (1-4).

Результаты замеров представлены в таблицах 3-5.

Таблица 3 – Результаты замеров прочности УЗ-методом, МПа

Измеряемый параметр	Результаты замеров прочности УЗ-методом, МПа											
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10	№11	№12
Скорость, v м/с	3320	3966	3100	3329	3457	3655	3856	3339	3587	3176	2810	2678
Прочность, R МПа	19,9	23,7	18,6	19,9	20,7	21,9	23,1	20,0	21,5	19,0	16,7	15,9
Определение предельных значений	R _{cp}	R _{max}	-	-	-	-	R _{max}	R _{cp}	-	-	R _{min}	R _{min}

Таблица 4 – Результаты замера прочности методом отрыва со скалыванием, МПа

Контролируемый участок	Результаты замера прочности методом отрыва со скалыванием, МПа					
	№ 1	№2	№7	№8	№11	№12
Фактическая прочность, R _ф МПа	10,7	19,2	18,9	16,2	12,8	14,6

Таблица 5 – Результаты расчета прочности по градуировочной зависимости, МПа

Контролируемый участок	Результаты расчета прочности по градуировочной зависимости, МПа					
	№ 1	№2	№7	№8	№11	№12
Фактическая прочность, R _н МПа	15,3	18,1	17,6	15,4	13,0	12,4

Расчет производится в следующем порядке:

$$\bar{R} = (19,9 + 23,7 + \dots + 15,9) / 12 = 20,1 \text{ МПа}, \quad \bar{R}_\phi = (10,7 + 19,2 + \dots + 14,6) / 12 = 15,4,$$

$$\bar{v} = (3320 + 3966 + \dots + 2678) / 12 = 3356,$$

$$a_1 = \frac{(15,4 - 10,7)(3356 - 3320) + (15,4 - 19,2)(3356 - 3966) + \dots + (15,4 - 14,6)(3356 - 2678)}{(3356 - 3320)^2 + (3356 - 3966)^2 + \dots + (3356 - 2678)^2},$$

$$a_1 = 0,0044,$$

$$a_0 = 15,4 - 0,0044 \cdot 3356 = 0,6336, \quad R_i = 0,6636 + v0,0044.$$

Остаточное среднее квадратическое отклонение (7)

$$S = \left((10,7 - 15,3)^2 + (19,2 - 18,1)^2 + \dots + (14,6 - 12,4)^2 \right) / (6 - 2)^{0,5} = 2,7 \text{ МПа}.$$

Корректировку установленной градуировочной зависимости и проверку граничных условий проводим по формуле (6).

$$\begin{aligned} |15,3 - 10,7| / 2,7 &= 1,7 \leq 2, & |15,4 - 16,2| / 2,7 &= 0,3 \leq 2, \\ |18,1 - 19,2| / 2,7 &= 0,4 \leq 2, & |13,0 - 12,8| / 2,7 &= 0,1 \leq 2, \\ |17,6 - 18,9| / 2,7 &= 0,5 \leq 2, & |12,4 - 14,6| / 2,7 &= 0,9 \leq 2. \end{aligned}$$

Условие ГОСТ 17624-87 выполняется для всех участков.

$$S/R_{cp} = 2,7/20,1; 0,13 \leq 0,15.$$

Условие МДС 62-2.01 выполняется.

Линейный коэффициент корреляции (коэффициент Пирсона) (8)

$$r_{R_{ф,v}} = \frac{(10,7 - 15,4)(3320 - 3356) + (19,2 - 15,4)(3966 - 3356) + \dots + (14,6 - 15,4)(2678 - 3356)}{\sqrt{((10,7 - 15,4)^2 + (19,2 - 15,4)^2 + \dots + (14,6 - 15,4)^2) \cdot ((3320 - 3356)^2 + (3966 - 3356)^2 + \dots + (2678 - 3356)^2)}} \\ r_{R_{ф,v}} = 0,92, \quad r_{R_{ф,v}} \geq 0,7.$$

Условие МДС 62-2.01 выполняется.

Среднеквадратическая ошибка St (9)

$$S_{мет} = 15,4 \cdot 0,04 = 0,62, \quad S_{\tau} = \sqrt{2,7^2 + 0,62^2} = 2,77.$$

Среднеквадратическое отклонение прочности S_m (12)

$$S_m = (2,7 + 2,77 / (12 - 1)^{0,5}) \cdot (1 / (0,7 \cdot 0,92 + 0,3)) = 3,0.$$

Коэффициент вариации (11)

$$V_m = 100 \cdot 3 \cdot 6 / (15,3 + 18,1 + 17,6 + 15,4 + 13,0 + 12,4) = 19,6.$$

Т.к. коэффициент вариации находится в интервале от 10% до 20% то неоднородность информации относится к средней (приемлемой).

Фактический класс бетона опытной модели (14)

$$B_{ф} = 15,3 / 1,43 = 10,7.$$

График полученной зависимости приведен на рисунке 23.



Рисунок 23 - График полученной градуировочной зависимости

Предлагаемая методика дает возможность получить сведения о прочности бетонного слоя конструкции в условиях строительной площадки, не прибегая к изъятию кернов с минимальным количеством проведенных замеров. Соблюдение всех граничных условий гарантирует получение достоверного результата определения прочности.

Результаты диссертационного исследования внедрены в практику экспертных организаций г. Ухты для обследования строительных ответственных конструкций из бетона и железобетона на опасных производственных объектах, что позволило: сократить затраты на проведение натуральных испытаний, минимизировать разрушения конструкций.

Основы комплексной методики входного контроля обетонированных труб рекомендуются к использованию службам, занимающимся контролем качества труб и оборудования, поставляемого на строительство магистральных трубопроводов. Предлагаемый способ применим для контроля прочности бетонных оболочек иных ответственных конструкций, для которых так же нежелательно разрушение при отборе образцов по ГОСТ 28570-90. Кроме того, результаты исследования могут быть использованы для дефектоскопии бетонных оболочек различных строительных конструкций в области промышленного и гражданского строительства.

Выводы

1. Актуальность совершенствования методов входного контроля обетонированных труб обоснована увеличением доли морского строительства, вероятностью производственных дефектов, получением повреждений балластного слоя при транспортировке и хранении и невозможностью использовать существующие методы обследования бетона.

2. Комплекс методик для проведения исследования включает: государственные стандарты и инструкции в области входного контроля и контроля качества бетона, правила обследования строительных конструкций, методические указания по обследованию строительных конструкций, методические рекомендации по контролю прочности бетона монолитных конструкций УЗ-методом способом.

3. Теоретические и экспериментальные исследования по совершенствованию методов входного контроля обетонированных труб привели к следующим результатам.

Для построения градуировочной зависимости при настройке УЗ дефектоскопа для контроля бетона рекомендовано проведение 6 испытаний способом отрыва со скалыванием и 12 УЗ замеров прочности.

Получена зависимость $d_{\min} = Z(\xi_t^2 - 1)^{0,5}$ минимального размера полосных дефектов d_{\min} от относительного изменения времени распространения колебаний ξ_t^2 , вызываемого дефектом и расстояния между излучателями Z , разработан алгоритм вычисления размера подповерхностных пустот в бетонном слое в условиях одностороннего доступа и алгоритм обследования бетонного слоя.

Установлено, что слой полимерной ленты толщиной до 2 мм не препятствует прохождению УЗ волн и улучшает акустический контакт между излучателем и бетоном, сокращая время прохождения сигнала, при этом погрешность определения размера подповерхностного дефекта снижается в 2 раза.

Установлена зависимость расстояния L между точками акустического контакта датчиков на поверхности бетонного слоя от глубины H выявляемости дефекта, описываемая уравнением $L=102,9H-9,6$, при достоверности

аппроксимации $R^2 = 0,9994$. Установленная зависимость позволяет так разместить искатели на удерживающем устройстве, чтобы контролировать бетонный слой на всю его глубину и при одновременно использовании 4 искателей сократить время проведения контроля в 3 раза.

4. Предложенная методика входного контроля обетонированной трубы позволяет произвести отбраковку несоответствующих установленным требованиям обетонированных труб и повысить надежность магистрального трубопровода.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. Попова А.И., Вишневская Н.С. Российские технологии нанесения теплоизолирующего и утяжеляющего покрытия на трубы для подводных переходов : Сборник научных трудов [Текст] : Материалы научно-технической конференции (13-15 апреля 2010 г.) : в 3 ч. ; ч. I/ под ред. Н. Д. Цхадая. - Ухта : УГТУ, 2010. - С. 267-272;

2. Попова А.И., Вишневская Н.С. Российские технологии изготовления труб для подводных переходов : Рассохинские чтения [Текст] : Материалы межрегионального семинара (3-4 февраля 2011 г.) / под ред. Н. Д. Цхадая. - Ухта: УГТУ, 2011. - С. 325-329;

3. Попова А.И., Вишневская Н.С. Французская технология обетонирования труб (компания EUPES в Мукране на острове Рюген) : Рассохинские чтения [Текст] : Материалы межрегионального семинара (3-4 февраля 2011 г.) / под ред. Н. Д. Цхадая. - Ухта: УГТУ, 2011. - С. 329-332;

4. Попова А.И., Вишневская Н.С. Повышение точности при продлении срока эксплуатации нефтегазового оборудования с помощью применения нелинейных методов расчета : Сборник тезисов [Текст] : Материалы 8-го Международного Молодежного Нефтегазового Форума (16-17 апреля 2011 г.). - Алматы: КазНТУ 2011. - С. 154-158;

5. Попова А.И., Вишневская Н.С. Классификация методов НК для обследования бетонного покрытия труб : Сборник научных трудов [Текст] : Материалы конференции Преподавателей и сотрудников (12-13 апреля 2011 г.) / под ред. Н. Д. Цхадая. - Ухта : УГТУ, 2011. - С. 106-111;

6. Попова А.И., Вишневская Н.С. Ультразвуковой метод для контроля прочности бетонного покрытия : Сборник научных трудов [Текст] : Материалы конференции Преподавателей и сотрудников (12-13 апреля 2011 г.) / под ред. Н. Д. Цхадая. - Ухта : УГТУ, 2011. - С. 111-116;

7. Попова А.И., Вишневская Н.С. Влияние полимерного слоя на поверхности бетона на параметры распространения ультразвуковых волн : Сборник научных трудов [Текст] : Материалы научно-технической конференции (17-20 апреля 2012 г.) : в 3 ч. ; ч. I/ под ред. Н. Д. Цхадая. - Ухта : УГТУ, 2012. - С. 201-204;

8. Попова А.И., Вишневская Н.С. Влияние пустот и арматуры в бетоне на параметры распространения ультразвуковых волн : Сборник научных трудов [Текст] : Материалы научно-технической конференции (17-20 апреля 2012 г.) : в 3 ч. ; ч. I я/ под ред. Н. Д. Цхадая. - Ухта : УГТУ, 2012. - С. 204-209;

9. Попова А.И., Вишневская Н.С. Проблемы применения классических методик для контроля обетонированных труб : Республика Коми: вчера, сегодня, завтра. Перспективы развития в XXI веке: Международная научно-практическая конференция (27-28 октября 2011 года.): Материалы конференции / Под общей редакцией М.Е. Рожкина. - М.: Издательство "Спутник+", 2012. - 229 с. - С. 202-208;

10. Попова А.И. Влияние полимерного покрытия и включений в бетон на изменение параметров распространения ультразвуковых волн // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". - 2012. №2. - С. 336-350. - URL: http://www.ogbus.ru/authors/Popova/Popova_1.pdf

11. Попова А.И. Практическая реализация ультразвукового метода определения прочности бетона в сочетании с методом отрыва со скалыванием для входного контроля обетонированной трубы // "Трубопроводный транспорт: теория и практика". - 2012. №2 (30). - С. 18-21;

12. Попова А.И. Предложения по совершенствованию входного контроля труб с бетонным покрытием // "Инженер-нефтяник". - 2012. №2. - С. 51-54;

13. Попова А.И., Вишневская Н.С. Контроль прочности бетона ультразвуковым методом в рамках входного контроля обетонированных труб в условиях строительной площадки // "Газовая промышленность". - 2012, №11. - С. 91-93;

14. Попова А.И. Применение ультразвукового метода определения прочности бетона для входного контроля обетонированной трубы // "Газовая промышленность". - 2012. №8 (август). - С. 81-84;

15. Попова А.И. Построение градуировочной зависимости для контроля прочности бетонных оболочек // "Трубопроводный транспорт: теория и практика". - 2012. №6 (34). - С. 8-13;

16. Попова А.И., Вишневская Н.С. Определение размера пустотных включений в бетон сквозь полимерное ленточное покрытие : Трубопроводный транспорт - 2012: материалы VIII Международной учебно-научно-практической конференции / Редкол.: А.М. Шаммазов и др. - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2012. - 483 с. - С. 114-116;

17. Попова А.И., Вишневская Н.С. Определение глубины трещины по изменению времени прохождения ультразвукового сигнала : Трубопроводный транспорт - 2012: материалы VIII Международной учебно-научно-практической конференции / Редкол.: А.М. Шаммазов и др. - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2012. - 483 с. - С. 116-118;

18. Попова А.И., Вишневская Н.С. Определение качества бетонного слоя обетонированной трубы : Межрегиональная научно-техническая конференция "Актуальные проблемы разработки нефтяных месторождений" (24-25 октября 2012 г.). - Филиал ООО "ЛУКОЙЛ-Инжиниринг" "ПечорНИПИ-нефть" в г. Ухта. - 110 с. - С.109-110;

19. Попова А.И., Вишневская Н.С. Увеличение глубины прозвучивания ультразвуковых дефектоскопов // "Инженер-нефтяник". - 2013. №2 - С. 57-59;

20. Попова А.И. Практическое применение ультразвукового метода определения прочности бетона в сочетании с методом отрыва со скалыванием

для входного контроля обетонированной трубы : Итоги диссертационных исследований. Том 2. - Материалы IV Всероссийского конкурса молодых ученых. - М.: РАН, 2012. - 138 с. - С. 78-85;

21. Попова А.И. Определение качества бетонного слоя обетонированной трубы // "Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья". – 2013. вып.№1. – С. 28–34;

22. Попова А.И., Вишневская Н.С. Контроль качества бетонного слоя ударно-импульсным методом для осуществления входного контроля обетонированных труб // "Контроль. Диагностика". – 2013. №6 . – С. 46-52.