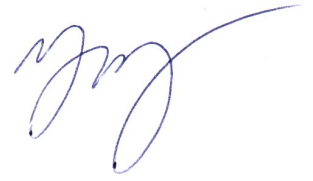


На правах рукописи



Федотов Александр Анатольевич

АКТИВНЫЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЙ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЙ СПОСОБ  
КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

Специальность: 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ,  
материалов и изделий

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Омск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения» (ОмГУПС (ОмИИТ))

Первый научный руководитель: доктор технических наук, профессор

**Епифанцев Борис Николаевич**

Второй научный руководитель: кандидат технических наук, профессор  
**Ахмеджанов Равиль Абдрахманович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики»  
ФГБОУ ВО ИжГТУ имени М.Т. Калашникова  
**Муравьева Ольга Владимировна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника, диагностика и сертификация», заведующий научно-исследовательской лабораторией «Физические методы контроля качества» ФГБОУ ВО СГУПС  
**Бехер Сергей Алексеевич**

Ведущая организация: Научно-производственный центр «Динамика», г. Омск

Защита состоится «25» декабря 2017 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.178.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет», по адресу: 644050, г. Омск, пр-т Мира, 11, корп. 8, ауд. 421.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ОмГТУ» и в сети интернет на сайте ФГБОУ ВО «ОмГТУ» - [www.omgtu.ru](http://www.omgtu.ru)

Автореферат разослан «   » \_\_\_\_\_ 2017 года.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Омский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.178.01.

Тел/факс: 8(3812) 65-35-09, e-mail: [asp\\_omgtu@omgtu.ru](mailto:asp_omgtu@omgtu.ru)

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.178.01  
доктор технических наук, доцент



В.Л. Хазан

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Аварии на объектах трубопроводного транспорта характеризуются экономическими и экологическими ущербами. Финансовые потери от несанкционированных врезок для бюджета страны по оценкам аналитиков составляют до 37 млрд рублей в год. Утечка в магистральном нефтепроводе «Усть-Балык-Нижевартовск» в феврале 2015 года стала причиной крупного загрязнения прилегающей территории площадью 8000 м<sup>2</sup>. По данным ПАО «Транснефть» в период с 2003 по 2012 год на объектах компании было выявлено 4779 незаконных подключений. За 2013 год только по Южному федеральному округу потери нефти составили 50 тыс. тонн, а количество обнаруживаемых врезок в нефтепроводы может составлять до четырех в сутки. В 2016 году в Краснодарском крае обнаружена подземная система из двух действующих трубопроводов протяженностью 5,6 км, которая позволяла преступной группе в течение пяти месяцев осуществлять хищение нефти из магистрального нефтепровода «Малгобек-Тихорецк-Туапсе».

Задача по сокращению несанкционированных воздействий на трубопровод и обнаружения утечек нефти продолжает оставаться актуальной, так как существующие способы обеспечения безопасности магистральных трубопроводов являются недостаточно эффективными.

**Основная идея работы** состоит в разработке способа, позволяющего обеспечить непрерывный контроль состояния магистрального трубопровода посредством периодической генерации упругих колебаний, накопления виброакустического сигнала на удаленном конце трубы и сравнения текущего сигнала с образцовым, соответствующим нормальному функционированию трубопровода.

**Объект исследования** – упругие колебания трубопровода, возникающие при ударном воздействии на его поверхность.

**Цель диссертационной работы:** разработка активного помехоустойчивого виброакустического способа контроля состояния магистрального трубопровода.

**Задачи диссертационной работы:**

1. Обзорное исследование существующих методов и способов обнаружения нарушений в магистральном трубопроводе с оценкой их потенциальных возможностей.
2. Разработка, теоретическое и экспериментальное исследования способа обнаружения несанкционированных воздействий на магистральный трубопровод.
3. Математическое моделирование виброакустического сигнала при ударном воздействии на поверхность трубопровода.
4. Математическое моделирование функционирования предложенного способа в условиях интенсивного шумового фона.
5. Оценка вероятностей ошибок обнаружения локальных несанкционированных изменений в магистральном трубопроводе.
6. Оценка влияния факторов окружающей среды на затухание колебаний трубопровода.
7. Определение информативных диапазонов частот амплитудного спектра виброакустического сигнала при возникновении нарушений в магистральном трубопроводе.

**Методы исследований.** В работе применялись методы теории вероятностей и математической статистики, физики контактных взаимодействий упругих тел, теории поперечных колебаний стержня, обнаружения сигналов.

**Научная новизна.** В процессе исследований получены следующие новые результаты:

1. Способ обнаружения несанкционированных воздействий на магистральный трубопровод, позволяющий зафиксировать отклонение его состояния от нормы, основанный на зондировании контролируемого участка виброакустическим сигналом, повышении отношения сигнал/шум, принятии решения по результатам сопоставления формы накопленного сигнала с образцовым.

2. Математические модели ударного воздействия на поверхность трубопровода, основанные на теории колебания стержня: базовая и полная, позволяющие моделировать виброакустический сигнал, фиксируемый на поверхности трубы.

3. Результаты математического моделирования функционирования предложенного способа в условиях интенсивного шумового фона.

4. Регрессионная модель затухания упругих колебаний при их распространении по заглубленному трубопроводу, позволяющая оценить степень влияния влажности грунта, глубины погружения трубопровода, частоты зондирующего сигнала.

5. Результаты оценки вероятностей ошибок первого и второго рода обнаружения нарушений на действующем трубопроводе разработанным способом.

6. Информативные диапазоны частот амплитудного спектра виброакустического сигнала при возникновении нарушений в магистральном трубопроводе.

**Достоверность полученных результатов** определяется корректным использованием математического аппарата при построении аналитических выражений, отсутствием противоречий между полученными результатами и выводами исследований, описанных в научной литературе, экспериментальной проверкой разработанного способа на метрологически поверенной аппаратуре с погрешностью не более 10%.

**Практическая значимость** заключается в доказанной возможности с помощью разработанного способа обнаруживать шурфы, врезки и несанкционированную установку объектов на магистральный трубопровод.

**Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Активный помехоустойчивый виброакустический способ контроля состояния магистрального трубопровода, позволяющий обнаруживать шурфы, врезки и несанкционированную установку объектов на его поверхность.

2. Математические модели виброакустического сигнала, возникающего при ударном воздействии на трубопровод.

3. Результаты математического моделирования функционирования разработанного способа в условиях интенсивного шумового фона.

4. Информативные диапазоны частот амплитудного спектра виброакустического сигнала при возникновении нарушений в магистральном трубопроводе.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях:

1. Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!», Омск, 2011.

2. Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании», Одесса, 2011.

3. IX Международная научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин», г. Омск, 2014.

4. III Международная научно-практическая конференция «Современная наука: теоретический и практический взгляд», г. Таганрог, 2015.

5. Международная научно-практическая конференция «Вопросы образования и науки», г. Тамбов, 2015.

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 13 работ, в том числе четыре статьи в журналах из Перечня ВАК, пять статей по материалам докладов на конференциях, два патента на изобретение, два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Все основные научные теоретические и экспериментальные исследования выполнены автором. Научный руководитель принимал участие в постановке целей и задач исследования, их предварительном анализе и обсуждении результатов.

Полученные научные результаты соответствуют пунктам 1,4,6 области исследований паспорта специальности 05.11.13.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 156 страницах машинописного текста, содержит 107 рисунков и 15 таблиц, состоит из введения, четырех глав, списка использованной литературы из 117 наименований и четырех приложений.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность проводимых исследований, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, представлены научная новизна, практическая значимость результатов и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведено обзорное исследование по проблеме обеспечения безопасности магистральных трубопроводов. Проанализированы данные, отражающие количество нарушений (4779 за 10 лет) на действующих трубопроводах. Сделан вывод о недостаточной эффективности существующих систем контроля. Отмечены вибрационный пассивный, оптический, оптоволоконный и вибрационный активный методы контроля, имеющие определенную значимость. Показаны причины, по которым они не могут в достаточной мере обеспечить выполнение поставленных задач, в частности, обеспечить безопасность магистральных трубопроводов. Выявлены основные недостатки, не позволяющие получить значительную распространенность таких систем на рынке. Сделан вывод о перспективности активного виброакустического способа контроля, позволяющего устранить выявленные недостатки.

**Вторая глава** посвящена математическому моделированию колебательного процесса трубопровода в результате ударного воздействия на его поверхность. Основой работы послужили исследования в области неразрушающего контроля и изу-

чения распространения упругих колебаний Клюева В.В., Бреховских Л.М., Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У., Гольдсмит В.

Обоснован подход к реализации способа контроля состояния магистрального трубопровода на основе генерации упругих колебаний источником на поверхности трубы. Получены полная и базовая математические модели виброакустического сигнала, фиксируемого на трубопроводе при ударном воздействии с заданными координатами. Проведены расчеты по полученным моделям, описывающим форму импульса при ударном воздействии на макете трубопровода длиной пять метров и на действующем участке трубопровода длиной 200 м с добавлением шумовой составляющей, соответствующей реальным условиям перекачки продукта. Определена оценка адекватности предложенных моделей на основе корреляционного анализа амплитудных спектров моделированных сигналов и экспериментальных данных с определением ошибки.

При разложении колебаний стержня по модам функция поперечных колебаний имеет вид:

$$X = C_1 \sin kx + C_2 \cos kx + C_3 \operatorname{sh} kx + C_4 \operatorname{ch} kx .$$

Постоянные  $C_1, C_2, C_3, C_4$  определяются в каждом случае, в зависимости от условий закрепления стержня. Всегда имеется возможность записать такие концевые условия, которым соответствуют определенные величины  $C_1, C_2, C_3, C_4$ , найдя которые можно определить частоты и формы резонансных колебаний. Результирующие перемещения могут быть представлены суммой нормальных форм при поперечных колебаниях стержня в виде:

$$X = C_1 (\cos kx + \operatorname{ch} kx) + C_2 (\cos kx - \operatorname{ch} kx) + \\ C_3 (\sin kx + \operatorname{sh} kx) + C_4 (\sin kx - \operatorname{sh} kx)$$

Для свободно опертого стержня постоянные  $C_1$  и  $C_2$  равняются нулю и  $C_3 = C_4$ . Для определения частот колебаний необходимо найти корни частотного уравнения:

$$\sin kx = 0 ;$$

положительные корни данного уравнения:

$$k_i x = i\pi = K_i ,$$

где  $i = 1, 2, 3, \dots, \infty$ .

Результирующие перемещения при поперечных колебаниях:

$$y = \sum_{i=1}^{\infty} X_i (A_i \cos \omega_i t + B_i \sin \omega_i t) . \quad (1)$$

Если представить распределение перемещений в виде функции  $y_0 = f_1(x)$ , а распределение начальных скоростей, придаваемых ударником частицам трубы в виде  $y = f_2(x)$ , то результирующее перемещение с использованием выражения (1) в момент времени  $t$ :

$$y = \frac{2}{L} \sum_{i=1}^{\infty} \sin \frac{i\pi x}{L} \left[ \cos \omega_i t \int_0^L f_1(x) \sin \frac{i\pi x}{L} dx + \frac{1}{\omega_i} \sin \omega_i t \int_0^L f_2(x) \sin \frac{i\pi x}{L} dx \right] ,$$

$$\text{где } A_i = \frac{2}{L} \int_0^L f_1(x) \sin \frac{i\pi x}{L} dx; B_i = \frac{2}{L\omega_i} \int_0^L f_2(x) \sin \frac{i\pi x}{L} dx.$$

Для описания динамического поперечного перемещения трубопровода длиной  $L$  в точке  $x_2$  вместо функции воздействия использована начальная скорость его частиц  $v$ , возникающая в трубе при воздействии генератором упругих колебаний с координатой  $x_1$ . В этом случае  $f_1(x_2) = 0$ , а  $f_2(x_1) = v$ , тогда:

$$A_i = 0;$$

$$B_i = \frac{2v}{L\omega_i} \sin \frac{i\pi x_2}{L}.$$

Выражение для динамического перемещения будет выглядеть следующим образом:

$$Y(t) = \frac{2v\delta}{L} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{\omega_i} \sin \frac{i\pi x_1}{L} \sin \frac{i\pi x_2}{L} \sin \omega_i t; \quad (2)$$

здесь частота колебаний трубы:

$$\omega_i = \sqrt{\frac{EJ}{ML}} K_i^4,$$

где  $K_i$  - корни частотного уравнения для моды с номером  $i$ ;  $M$  – погонная масса трубы;  $\delta$  – длина отрезка воздействия;  $L$  – длина трубы;  $E$  – модуль Юнга материала стенки трубы;  $J$  – момент инерции стенки трубы.

$$J = \frac{\pi}{8} d^3 h; M = \rho \pi d h,$$

где  $\rho$  - плотность материала стенки трубы;  $d$  - диаметр;  $h$  - толщина стенки.

Формула (2) описывает сформировавшиеся колебания системы без затухания. Трубопроводная система, функционирующая в реальных условиях, является волноводом с рассеянием, переотражением и поглощением колебаний внешней средой. С учетом данных явлений для получения затухающего импульса введены коэффициенты амплитудно-частотного и амплитудно-временного затухания. Упругие колебания в среде затухают, а фиксируемый полезный сигнал на поверхности трубопровода является зашумленным. Формула (2) модифицирована следующим образом:

$$Y(t) = \frac{2v}{L} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{\omega_i} \sin \frac{i\pi x_1}{L} \sin \frac{i\pi x_2}{L} \sin \omega_i t \cdot e^{-t(\omega z + k)} + S(t), \quad (3)$$

где  $z$  – амплитудно-частотный коэффициент затухания;  $k$  – амплитудно-временной коэффициент затухания;  $S(t)$  – помеха.

В формуле (3) присутствует помеха  $S(t)$ , являющаяся неотъемлемой частью регистрируемых сигналов и формируемая процессом перекачки транспортируемого продукта, внешней окружающей средой и регистрирующим оборудованием. Значения функции  $S(t)$  получены посредством записи виброакустического сигнала оборудованием в моменты отсутствия полезного сигнала. В данных условиях поток

жидкости отсутствует, и помехой является только шум, формируемый оборудованием. Модель (3) в работе обозначена как «базовая».

С учетом упругости материала, которая определяет обратный процесс деформации, максимальное ее значение наблюдается в момент времени, соответствующий половине длительности контакта. Упругий удар описывается теорией Герца, по которой длительность контакта ударника с трубой можно получить из соотношения:

$$\tau = 2,9432 \frac{\alpha_m}{v_0}. \quad (4)$$

В формуле (4)  $v_0$  - скорость штока ударника. Ударник и трубу можно представить соответственно в виде сферы радиуса  $R$  и массивной плоской поверхности. В таком случае выражение для  $\alpha_m$  будет иметь вид:

$$\alpha_m = \frac{15\pi v_0^2 (\delta_1 + \delta_2) m}{16\sqrt{R}},$$

где  $m$  – масса ударника;  $R$  – радиус сферы;  $\delta_1, \delta_2$  – постоянные материала в теории Герца.

Зависимость прогиба трубы от времени можно получить в результате разбиения колебательного процесса на две составляющие: от начала контакта трубы с ударником и после взаимодействия. Первая составляющая взаимодействия описывает вынужденные колебания, в которой значения прогибов при  $0 \leq t \leq \tau$  можно определить из следующей функции смещения от времени, если представить трубу в виде стержня с моментом инерции  $J$ , диаметром  $d$  и толщиной стенки  $h$ :

$$Y(x,t) = \frac{\pi m v_0 (1 + e^{-})}{\rho A L \tau} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{i-1}{2}} \sin \frac{i\pi x}{L}}{\left( \omega_i^2 - \frac{\pi^2}{\tau^2} \right)^2 + \frac{4\pi^2 \delta_i^2}{\tau^2}} \times \left\{ \begin{aligned} & e^{-\delta_i t} \left[ \frac{2\delta_i \pi}{\tau} \cos \theta_i t + \frac{\pi}{\tau \theta_i} \left( 2\delta_i^2 - \omega_i^2 + \frac{\pi^2}{\tau^2} \right) \sin \theta_i t \right] \\ & - \frac{2\delta_i \pi}{\tau} \cos \frac{\pi t}{\tau} + \left( \omega_i^2 - \frac{\pi^2}{\tau^2} \right) \sin \frac{\pi t}{\tau} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где  $m$  - масса штока;  $v_0$  - скорость штока;  $\rho$  - плотность стали;  $A$  - площадь сечения;  $L$  - длина трубы;  $\tau$  - длительность контакта штока с трубой;  $x$  - координата приема сигнала;  $i$  - номер моды;  $\omega_i$  - собственная частота колебаний;

$$\omega_i = \sqrt{A_3 + \frac{EJK_i^4}{ML^4}}; \quad \delta_i = \frac{1}{2} \left( A_1 \frac{i^4 \pi^4}{L^4} + A_2 \right); \quad \theta = \sqrt{\omega_i^2 - \delta_i^2},$$



где  $A_1, A_2$  - коэффициенты, зависящие от затухания;  $A_3$  - коэффициент, зависящий от жесткости основания.

Выражение (5) было использовано для определения прогиба трубы (рис. 1) с параметрами, указанными в таблице 1. Координата поперечного воздействия в модели соответствует середине пролета трубопровода.

Информативные частоты упругих колебаний для обнаружения нарушений ограничиваются значением 5 кГц, а принимаемый сигнал преобразовывался аналого-цифровым преобразователем с частотой дискретизации 44100 Гц, что дало возможность анализировать амплитуды частот вплоть до 22050 Гц. Для построения смещения потребовалась частота дискретизации 320000 Гц. Время контакта, полученное из выражения (4), составило  $4 \cdot 10^{-5}$  с. При частоте дискретизации 44100 Гц период между отсчетами сигнала равен  $2,3 \cdot 10^{-5}$  с, и функция силы была бы описана двумя отсчетами, что неприемлемо. Учитывая вышеизложенное, использовать функцию прогиба (рис. 1) в моделировании итогового импульса колебаний при таких условиях с практической точки зрения не имеет смысла, и регистрируемый сигнал был представлен второй составляющей колебательного процесса по истечении времени контакта  $t > \tau$ :

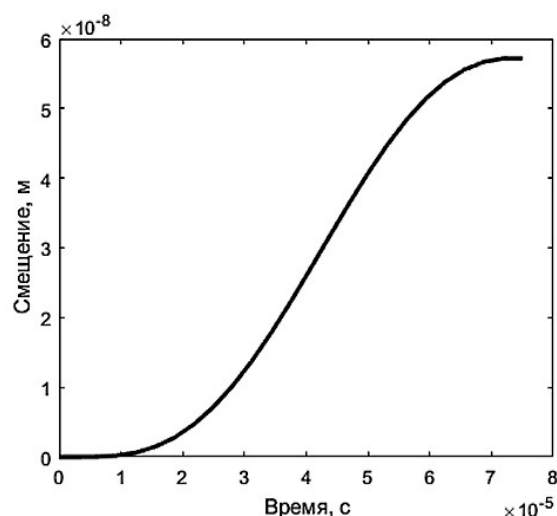


Рисунок 1 – Смещение трубопровода для  $0 \leq t \leq 2\tau$

$$Y(t) = \frac{\pi m v_0 (1 + \bar{e})}{\rho A L \tau} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^{i-1} \sin \frac{i\pi x}{L}}{\left( \omega_i^2 - \frac{\pi^2}{\tau^2} \right)^2 + \frac{4\pi^2 \delta_i^2}{\tau^2}} \times$$

$$\left\{ \left[ 2e^{\delta_i \tau} \frac{\delta_i \pi}{\tau} \cos \theta_i \tau - \frac{\pi e^{\delta_i \tau}}{\tau \theta_i} \left( 2\delta_i^2 - \omega_i^2 + \frac{\pi^2}{\tau^2} \right) \times \sin \theta_i \tau + \frac{2\pi \delta_i}{\tau} \right] \cos \theta_i t + \right.$$

$$\left. \times \left[ \frac{\pi e^{\delta_i \tau}}{\tau \theta_i} \left( 2\delta_i^2 - \omega_i^2 + \frac{\pi^2}{\tau^2} \right) \times \cos \theta_i \tau + 2e^{\delta_i \tau} \times \right. \right.$$

$$\left. \left. + \left[ \frac{\delta_i \pi}{\tau} \sin \theta_i \tau + \frac{\pi}{\tau \theta_i} \left( 2\delta_i^2 - \omega_i^2 + \frac{\pi^2}{\tau^2} \right) \right] \sin \theta_i t \right] \right\} + S(t). \quad (6)$$

Данное выражение было использовано для расчета свободных колебаний трубопровода в среде MATLAB. Для модели (6) введен термин «полная».

Таблица 1. Параметры модели макета трубопровода

|  |                      |   |                            |
|--|----------------------|---|----------------------------|
| Длина трубы, м   | $L = 5$              | Число мод                               | $n = 70$                   |
| Координата источника, м                                | $x_1 = 2,5$          | Начальная скорость, м/с                 | $v = 1,43$                 |
| Координата приемника, м                                | $x_2 = 0,53$         | Частота дискретизации сигнала, Гц       | 44100                      |
| Толщина стенки трубы, м                                | $h = 0,003$          | Коэффициенты затухания (базовая модель) | $z = 0,0013;$<br>$k = 1,5$ |
| Модуль Юнга для стали, Па                              | $E = 200 \cdot 10^9$ | Плотность стали, кг/м <sup>3</sup>      | $\rho_0 = 7800$            |
| Диаметр трубы, м                                       | $d = 0,038$          | Длительность импульса, с                | 3                          |
| Коэффициент, зависящий от затухания, $1/c^2$           | $A_1 = 7; A_2 = 1$   | Длительность контакта, с                | $\tau = 0,00004$           |
| Коэффициент, зависящий от жесткости основания, $1/c^2$ | $A_3 = 1050000$      |   |                            |

Ввиду наличия двух моделей для решения поставленной задачи, необходимо определить и сравнить степень их адекватности. На рис. 2 изображены формы импульсов на основе базовой и полной модели в сравнении с эмпирическим сигналом, полученным на поверхности трубы длиной пять метров с приведенными характеристиками в таблице 1. Значения коэффициентов  $A_1, A_2, A_3$  получены эмпирически. Не составляет труда по формам импульсов и амплитудному спектру (рис. 2-4) определить, что полная модель обеспечивает наилучший результат описания исследуемых процессов.

Визуальная оценка формы среднего эмпирического и аналитического импульсов, полученных на трубе с параметрами, указанными в таблице 1, позволяет судить о значительном сходстве сигналов.

Особый интерес представляет возможность моделировать виброакустические сигналы, фиксируемые с поверхности протяженных трубопроводов в реальных условиях эксплуатации. Для оценки адекватности моделирования сигналов при больших значениях  $L$  приведен виброакустический сигнал (рис. 5), полученный на поверхности действующего трубопровода с перекачиваемой жидкостью (вода) в сравнении с сигналами, полученными аналитически на основе базовой и полной моделей. Параметры трубопровода приведены в табл. 2.

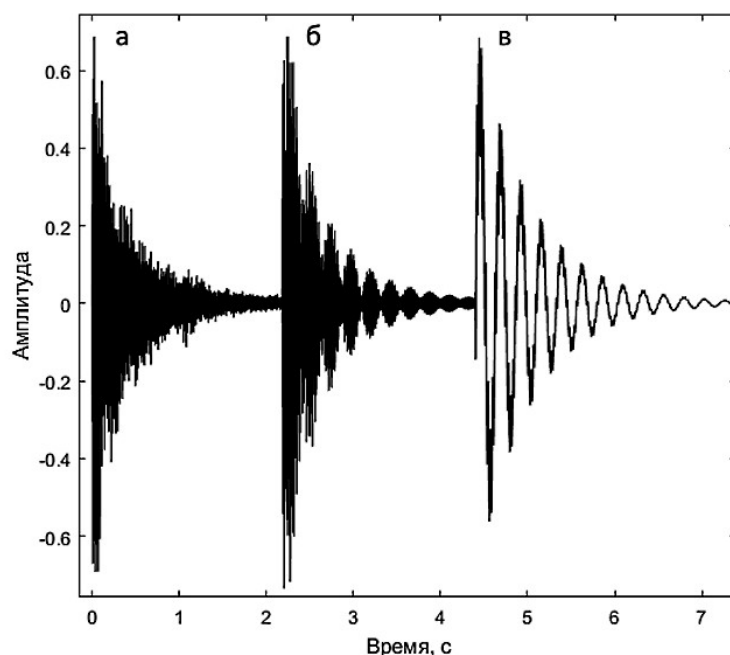


Рисунок 2 – Импульс при ударном воздействии для  $L = 5$  м: а) эмпирический; б) полная модель; в) базовая модель

В эксперименте приемник и источник сигналов располагались на расстоянии 200 м друг от друга. Так как модель описывает поперечные колебания трубопровода

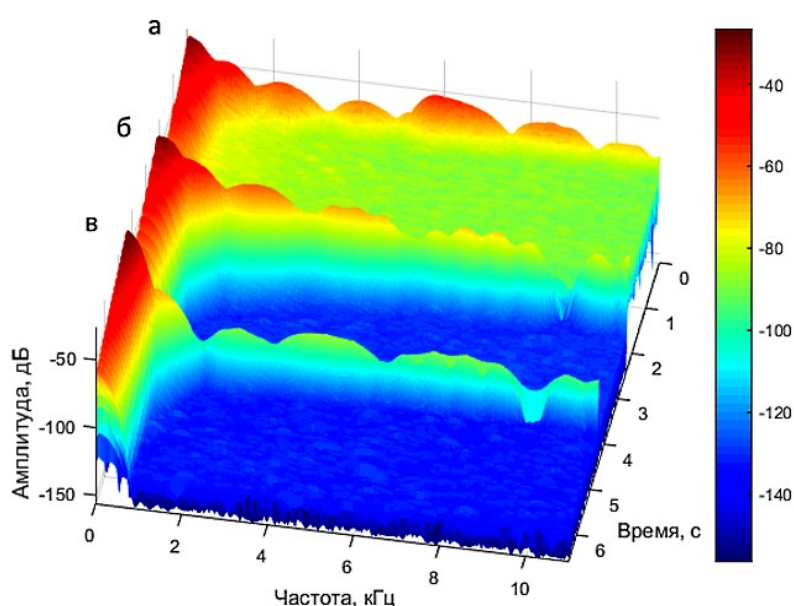


Рисунок 3 – Спектрограмма импульсов: а) эмпирический; б) полная модель; в) базовая модель

$$\omega_i = \sqrt{A_3 + \frac{EJK_i^4}{\left(\rho\pi dh + \frac{\rho_0\pi d^2}{4}\right)L^4}}$$

Помеха  $S(t)$  формировалась не только используемым оборудованием, но и перекачиваемой жидкостью (рис. 5). Амплитудный спектр для базовой и полной моделей в сравнении со средним эмпирическим импульсом приведены на рис. 6.

Использование базовой модели для аналитического описания вибракустического сигнала на поверхности действующего протяженного трубопровода менее эффективно (рис. 5-7), так как корреляция амплитудного спектра сигнала базовой модели с эмпирическим существенно снижается с увеличением дистанции:  $R = 0,77$  для границы 1,5 кГц и  $R = 0,51$  для границы 5 кГц в сравнении с соответствующими значениями  $R = 0,84$  и  $R = 0,83$ , полученными на макете трубопровода длиной пять метров.

при ударе в центре пролета, то длина трубы при моделировании устанавливалась такой, чтобы разница между координатами приемника и источника составляла 200 м:  $L = 600$  м, источник  $x_1 = 400$  м, приемник  $x_2 = 200$  м.

В расчетах для действующего трубопровода учитывалась плотность перекачиваемой жидкости. Общая масса трубопровода определялась как сумма массы стальной трубы с параметрами, указанными в табл. 2, и жидкости. Уравнение для частот свободных колебаний в таком случае имеет вид:

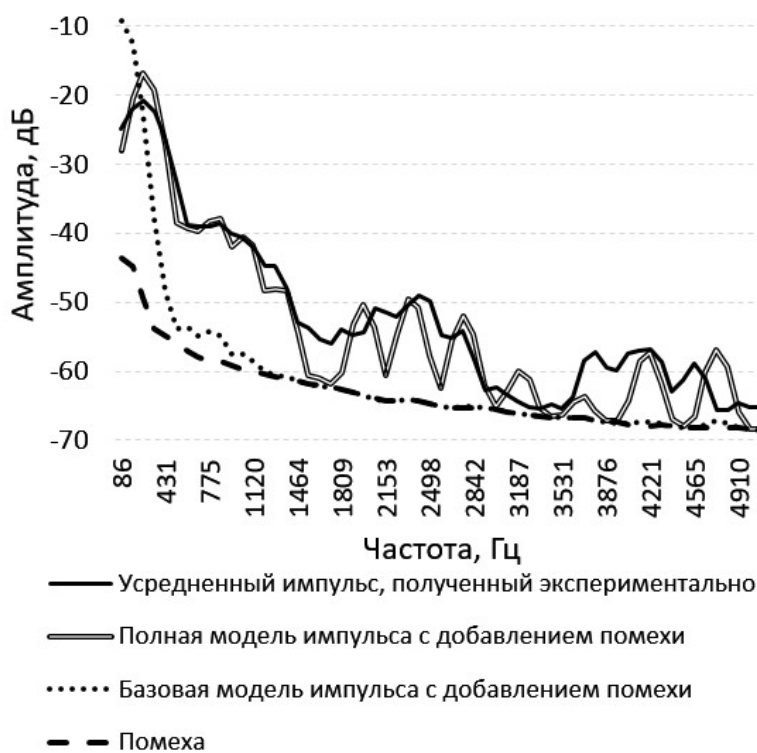


Рисунок 4 – Амплитудный спектр сигналов для  $L = 5$  м

Таблица 2. Параметры модели действующего трубопровода

|   |                        |   |                           |
|---|------------------------|---|---------------------------|
| Длина трубы, м  | $L = 600$              | Число мод                               | $n = 4000$                |
| Координата источника, м   | $x_1 = 400$            | Начальная скорость, м/с                 | $v = 1,43$                |
| Координата приемника, м   | $x_2 = 200$            | Частота дискретизации сигнала, Гц       | 44100                     |
| Толщина стенки трубы, м   | $h = 0,02$             | Коэффициенты затухания (базовая модель) | $z = 0,01;$<br>$k = 24,1$ |
| Модуль Юнга для стали, Па                                       | $E = 200 \cdot 10^9$   | Плотность стали, кг/м <sup>3</sup>      | $\rho_0 = 7800$           |
| Диаметр трубы, м  | $d = 0,4$              | Плотность воды, кг/м <sup>3</sup>       | $\rho = 1000$             |
| Коэффициент, зависящий от затухания, 1/с <sup>2</sup>           | $A_1 = 0,05; A_2 = 50$ | Длительность импульса, с                | 3                         |
| Коэффициент, зависящий от жесткости основания, 1/с <sup>2</sup> | $A_3 = 12 \cdot 10^7$  | Длительность контакта, с                | $\tau = 0,00004$          |

Напротив, использование полной модели для описания виброакустического сигнала на участке трубопровода в 200 м демонстрирует адекватность данного аналитического выражения при решении поставленной задачи, так как коэффициент корреляции амплитудного спектра сигнала для полной модели и экспериментального составил  $R = 0,89$  в диапазоне до 5 кГц.

В результате анализа отклонений значений, получаемых моделированием (рис. 7) от экспериментальных данных, сделан вывод о высокой достоверности предложенных моделей на основе теории колебания стержня в задаче описания поперечных колебаний трубопровода. Минимальное отклонение от экспериментальных данных соответствует полной модели как для трубы длиной пять метров, так и на участке 200 м трубопровода длиной в 600 м ( $R = 0,95$  для  $L = 5$  и  $R = 0,89$  для  $L = 600$ ).

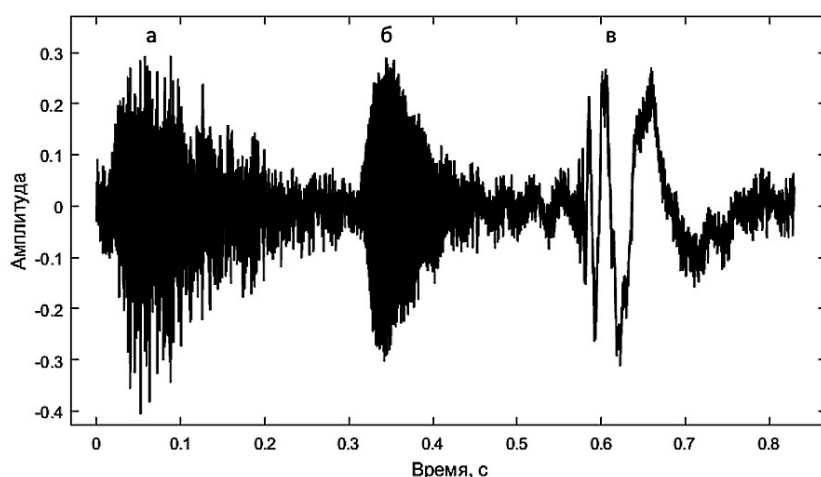
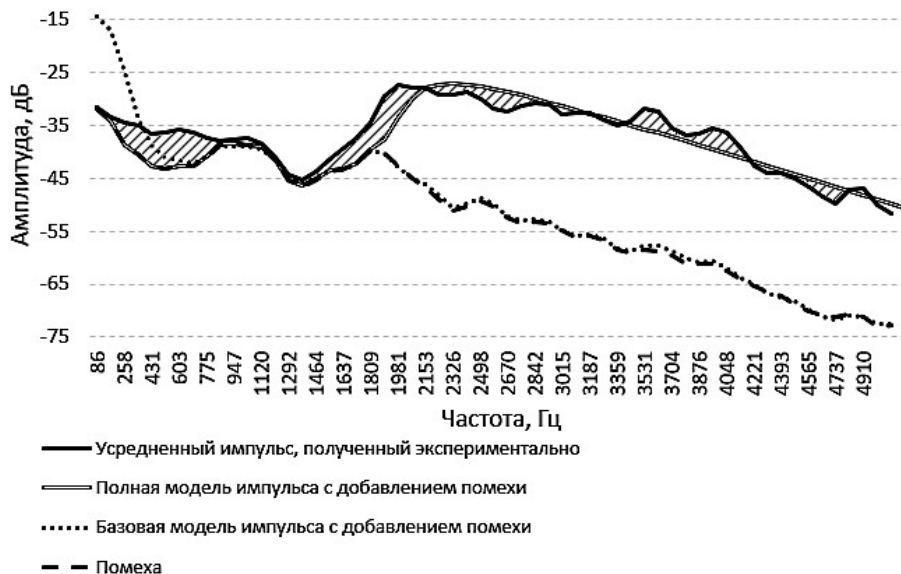


Рисунок 5 – Импульс при ударном воздействии для  $L = 600$  м: а) эмпирический; б) полная модель; в) базовая модель

Средняя квадратическая ошибка по частотному диапазону до 5 кГц в выборке из 30 экспериментальных импульсов составила 0,9 дБ. Средняя абсолютная ошибка при сравнении с эмпирическим сигналом составила 3,4 дБ для трубы длиной пять метров и 2,4 дБ для трубы длиной 200 м с перекачиваемой жидкостью с использованием полной модели. Максимальная относительная ошибка составила 6,4% (рис. 7).

**Третья глава** посвящена разработке способа обнаружения нарушения функционирования трубопровода по виброакустическим сигналам, передаваемым по трубе, и моделированию функционирования разработанного способа контроля.

Представлен активный помехоустойчивый виброакустический способ контроля состояния магистрального трубопровода, основанный на формировании виброакустического сигнала, соответствующего текущему состоянию трубопровода посредством последовательного накопления генерируемых в трубопроводе импульсов колебаний и сравнения накопленного сигнала с образцовым, полученным на данном трубопроводе без нарушений (рис. 8).



Устройство для реализации способа работает следующим образом (рис. 9). Регистрируемые приемником 7 импульсы от источника колебаний 6 по трубопроводу 4, заглубленному в грунте 1, поступают на схему накопления, представленную в виде линии задержки 8 и сумматора 9. Расстояния между отводами линии задержки соответствуют периоду генерируемых импульсов. Результат накопления в текущий момент времени поступает на коррелятор 11 для расчета коэффициентов корреляции накопленного импульса с образцовыми, хранящимися в памяти 10.

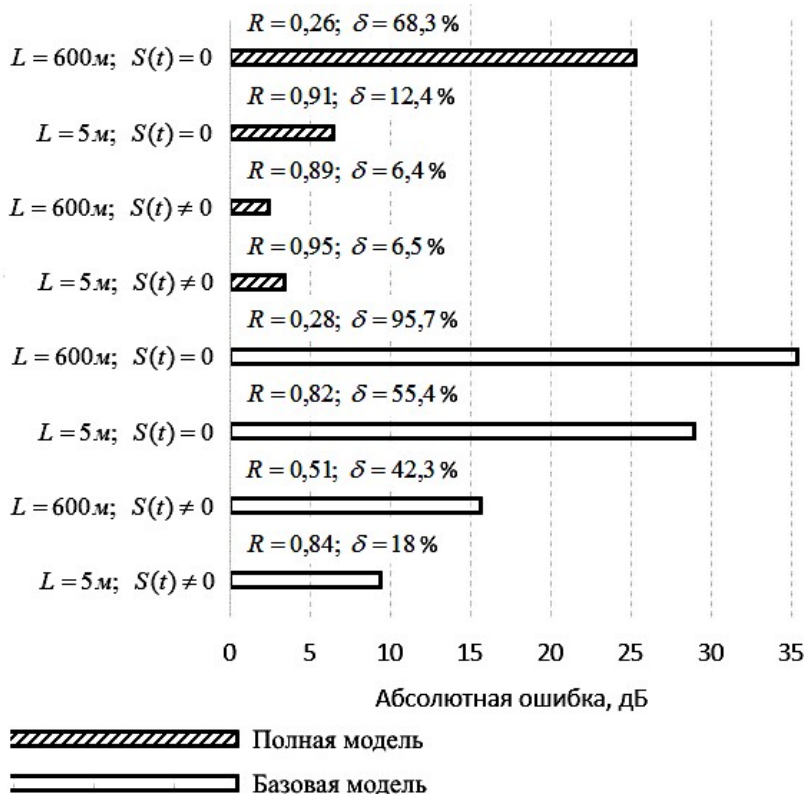


Рисунок 7 – Оценка адекватности моделей

умышленником шурфа 2 для получения доступа к поверхности трубопровода 3. Схема 13 формирует импульс для считывания номера сигнала, определяющего мак-

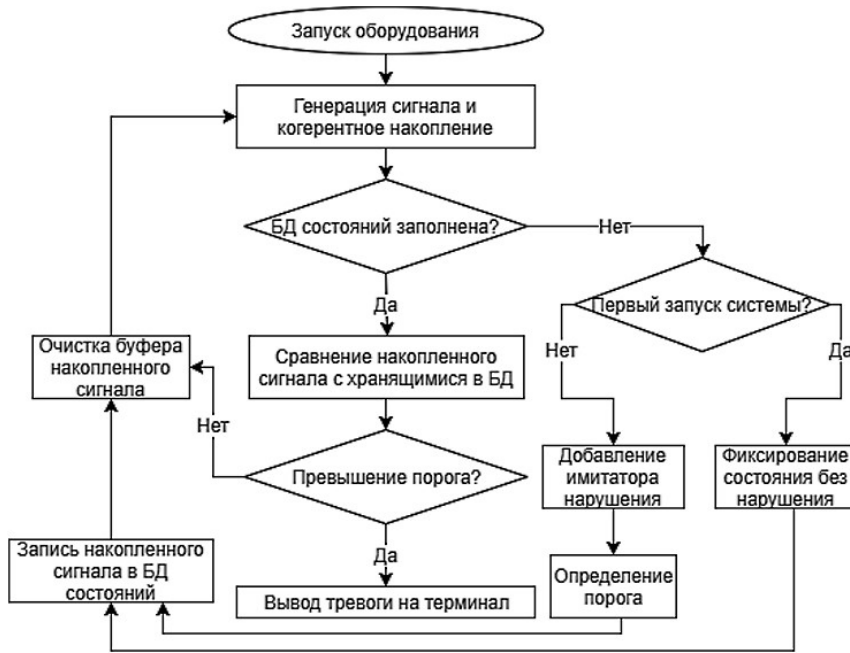


Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма работы системы

установлено по дисперсии нормированных суммарных импульсов. При ее приближении к нулю процесс построения образца прекращается.

Когерентное накопление с усреднением позволяет уменьшить дисперсию шума, сохраняя сигнал неизменным. Условиями для повышения отношения сигнал/шум данным методом является синхронизация момента времени взятия отсчетов импульсов, неизменность характеристик передаваемого по трубе сигнала и некоррелированность отсчетов шума. Общая формула когерентного накопления с усреднением имеет вид:

$$x_{cp}(k) = \frac{\sum_{n=1}^N x_n(k)}{N},$$

где  $x_{cp}(k)$  – амплитуда усредненного отсчета;  $k$  – номер усредняемого отсчета;  $n$  – номер импульса из серии;  $N$  – число накоплений.

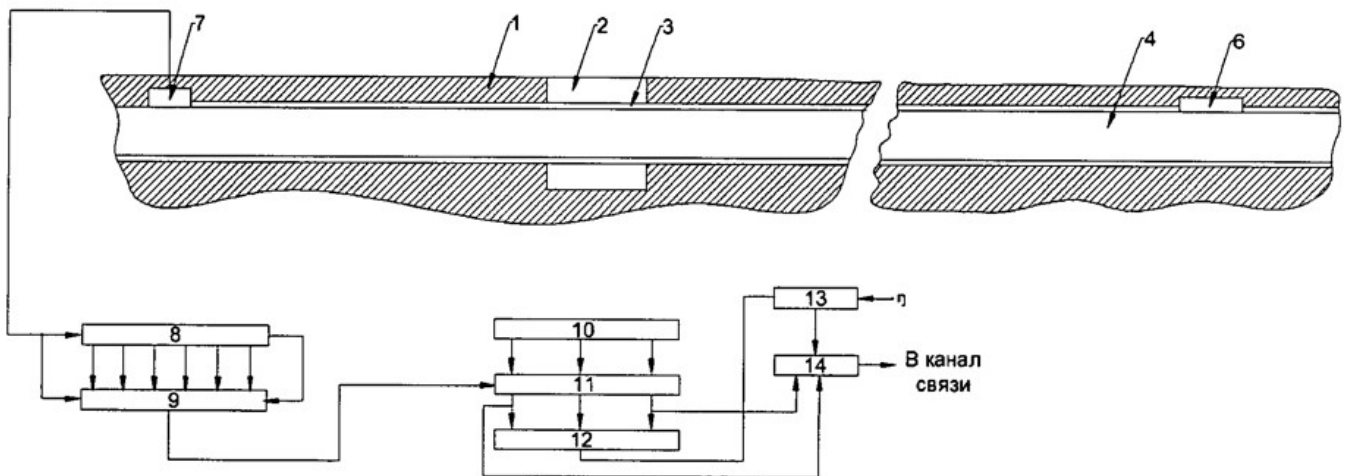


Рисунок 9 – Структурная схема системы контроля трубопроводов

симум этого коэффициента. Считанный номер по каналу связи 14 передается в службу безопасности трубопроводной системы.

Образцовые импульсы представляют собой усредненную сумму последовательности принимаемых импульсов при известном (симулированном) состоянии трубопровода, которое необходимо распознавать в процессе мониторинга трубопроводной системы. Число суммируемых импульсов может быть



Коэффициент повышения отношения сигнал/шум ( $SNR$ ) для получаемого сигнала зависит от числа накапливаемых сигналов и равен:

$$\frac{SNR_{накопл}}{SNR_{исх}} = \frac{\sigma_{исх}}{\sigma_{накопл}} = \sqrt{N}.$$

Для оценки эффективности когерентного накопления сигнала в задаче повышения отношения сигнал/шум реализовано моделирование в среде MATLAB процесса подачи импульсов упругих колебаний в трубу с использованием полной модели, приведенной ранее. Для демонстрации эффекта от накопления  $N$  импульсов к модели сигнала добавлена помеха  $S(t)$ , полученная на действующем трубопроводе и превышающая максимум амплитуды модели сигнала в 4 раза.

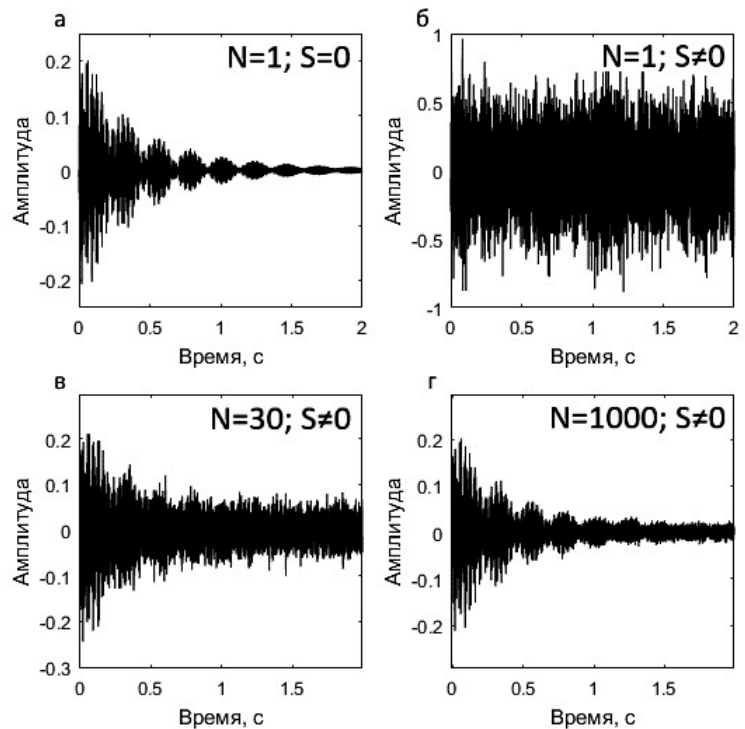


Рисунок 10 – Модель когерентного накопления сигнала: а) без накопления, без помехи; б) без накопления, с помехой; в) при накоплении 30 импульсов; г) при накоплении 1000 импульсов

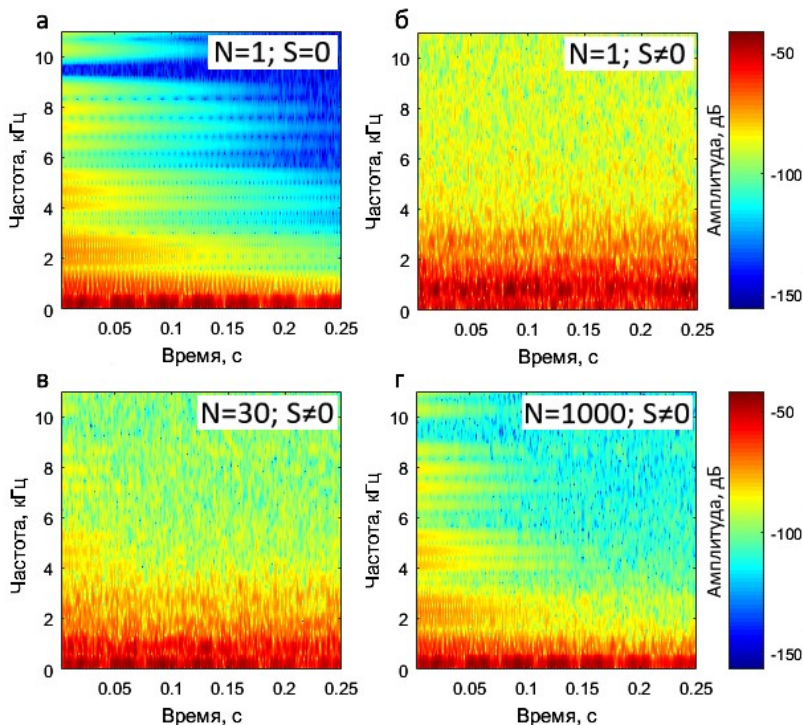


Рисунок 11 – Спектрограмма модели когерентного накопления сигнала: а) без накопления, без помехи; б) без накопления, с помехой; в) при накоплении 30 импульсов; г) при накоплении 1000 импульсов

Отношение сигнал/шум при добавлении помехи к модели сигнала составило  $SNR_{исх} = 0,03$ . Ввиду низкого значения данного параметра, сигнал на фоне помехи по рис. 10 (б) и 11 (б) не обнаруживается, корреляция амплитудного спектра без помехи и с помехой  $R = 0,13$ .

Значение  $SNR$  повышается с ростом числа накоплений и согласуется с теоретическим (рис. 12). При накоплении 1000 изначально зашумленных импульсов отношение сигнал/шум возросло в 30,68 раза. По амплитудно-временному представлению на рис. 10 (г) и по спектральному на рис. 11 (г) сигнал стал обнаруживаться при подавленной помехе с коэффи-

циентом корреляции для исходного незашумленного и накопленного сигнала, равным  $R = 0,98$ .

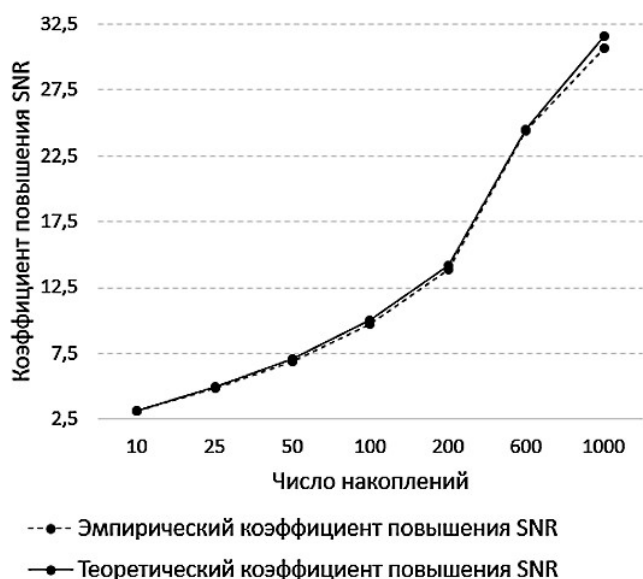


Рисунок 12 – Эффективность подавления помехи

стояния окружающей трубопровод среды на параметры распространяющихся по оболочке упругих колебаний фиксируется коэффициентом корреляции при сравнении образцов. По результатам экспериментов на действующем трубопроводе с доверительной вероятностью 0,99 возможно определение отклонения работы системы от нормы при возникновении шурфа с числом накапливаемых импульсов  $N > 20$  (рис. 13). Определение вероятностей ошибок первого и второго рода выполнялось посредством схемы, основанной на критерии идеального наблюдателя, которая определяет потенциальную помехоустойчивость системы.

Вероятность ошибок первого и второго рода на действующем трубопроводе составила 0,017 и 0,025 соответственно.

**В четвертой главе** проведена оценка затухания упругих колебаний в действующем наземном трубопроводе, которая позволяет утверждать о распространении сигнала на большие расстояния при крайне малой энергии удара, равной 0,043 Дж.

При данной энергии удара преодолевается рубеж в 300 м (потенциальный предел передачи, установленный существующими системами обнаружения наруше-

Достоверность выводов о возможности обнаружения изменений параметров среды в окружении магистрального трубопровода подтверждается результатами экспериментов, проведенных на действующей трубе с жидкостью (вода). Генератор и вибропреобразователь устанавливались на трубопровод на дистанции 500 м. Между ними устанавливались имитаторы нарушений: шурф длиной 1 м и предмет, расположенный на трубе (аккумуляторная батарея массой 15 кг). Третьим имитатором являлась врезка, наличие которой обеспечивалось установкой вибропреобразователя после существующего отвода.

Влияние локальных изменений со-

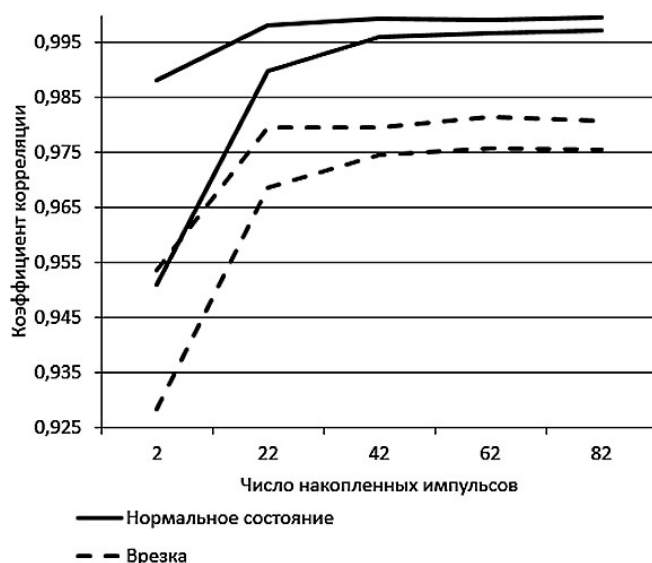


Рисунок 13 – Доверительные интервалы коэффициента корреляции



ний с помощью пассивного виброакустического метода) и достигает 500 м. С увеличением энергии удара дистанцию распространения можно повысить.

Построена регрессионная модель на основе полнофакторного эксперимента, учитывающая такие факторы: частота, влажность и глубина погружения трубы в грунт при расчете значения затухания сигнала на 1 метр. Выявлены зоны частотного спектра с максимальным изменением амплитуды распространяющегося виброакустического сигнала при установке имитаторов нарушений на действующем трубопроводе протяженностью 500 м и макете трубы длиной 4 м с диаметром 50 мм.

Создан стенд для проведения экспериментов (рис. 14). Труба 2 фиксируется перегородками 3 для заполнения объема нужным количеством грунта, фиксируемого корпусом 1.

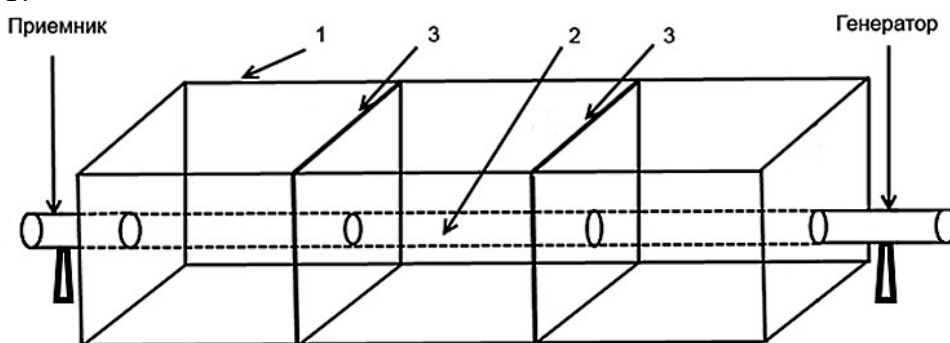


Рисунок 14 – Испытательный стенд

На рис. 15 изображен амплитудный спектр импульса в диапазоне частот 20-10000 Гц при изменении влажности и глубины погружения трубы в грунт на испытательном стенде.

В частотном диапазоне 600-900 Гц отмечается максимальное значение затухания (до 22 дБ). Эксперимент по имитации шурфа, созданного злоумышленником, выявил высокую информативность данного частотного диапазона. Амплитудно-частотный спектр при возникновении шурфа имеет максимальное отклонение амплитуды на тех же частотах, как и в случае с изменением глубины погружения трубы и влажности грунта.

Предложено реализовать модель на основе данного частотного диапазона, определяющую значение затухания сигнала, переданного по заглубленной трубе в грунт на один метр, в зависимости от влажности грунта, частоты сигнала и глубины погружения.

Выбор данного частотного диапазона обусловлен максимальным откликом на возникновение локальной неоднородности (рис. 16) и потенциально максимальной обнаруживаемой способностью, а также возможностью линейной аппроксимации кривых, что позволило создать модель на основе двухуровневого полнофакторного эксперимента. Весь амплитудный спектр до 10 кГц имеет сложную структуру, не позволяющую аппроксимировать значения с достаточным коэффициентом детерминации (аппроксимация полиномом шестой степени позволяет получить коэффициент с низким значением  $R^2 = 0,32$ ).

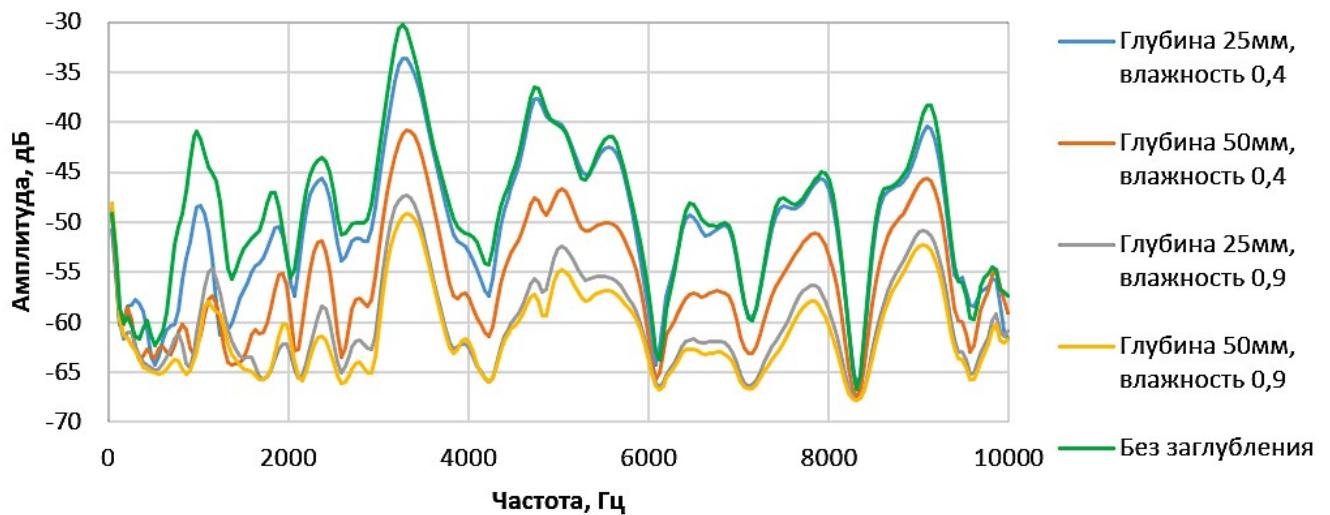


Рисунок 15 – Амплитудный спектр накопленного сигнала

Соответствующие кривые (влияние влажности и глубины) в выбранном частотном диапазоне аппроксимируются линейно с коэффициентами детерминации от 0,97 до 0,99, что указывает на достаточность применения линейной модели с использованием полнофакторного двухуровневого эксперимента для описания исследуемых явлений.

Получена регрессионная модель затухания сигнала в натуральных величинах:

$$y(z_1, z_2, z_3) = 13,5753 - 0,892696 z_1 - 47,7128 z_2 + 0,99296 z_1 z_2 - 0,0254824 z_3 + 0,00152032 z_1 z_3 + 0,0869893 z_2 z_3 - 0,00162133 z_1 z_2 z_3$$

где  $z_1$  - глубина погружения трубы в грунт (значения от 25 до 50 мм);  $z_2$  - объемная влажность грунта (коэффициент от 0.4 до 0.9);  $z_3$  - частота (от 600 до 900 Гц);  $y(z_1, z_2, z_3)$  - функция затухания, дБ на 1 метр длины трубопровода.

Максимальное значение затухания соответствует максимальным значениям всех трех параметров модели (рис. 17). Коэффициенты уравнения регрессии являются значимыми (критерий Стьюдента) и опыты воспроизводимыми (критерий Кохрена). Коэффициенты детерминации находятся в диапазоне от 0.9 до 0.99, что указывает на адекватность модели.

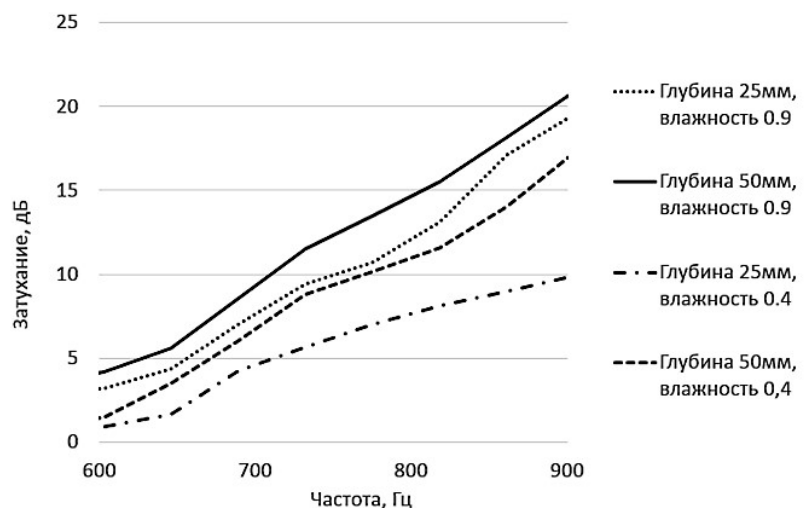


Рисунок 16 – Зависимость затухания сигнала от частоты и влажности

Сформирован вывод о необходимости включения в систему обнаружения и распознавания опасных изменений состояния контролируемого объекта элементов, ориентированных на автоматическую подстройку режима работы системы для минимизации вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода в зави-

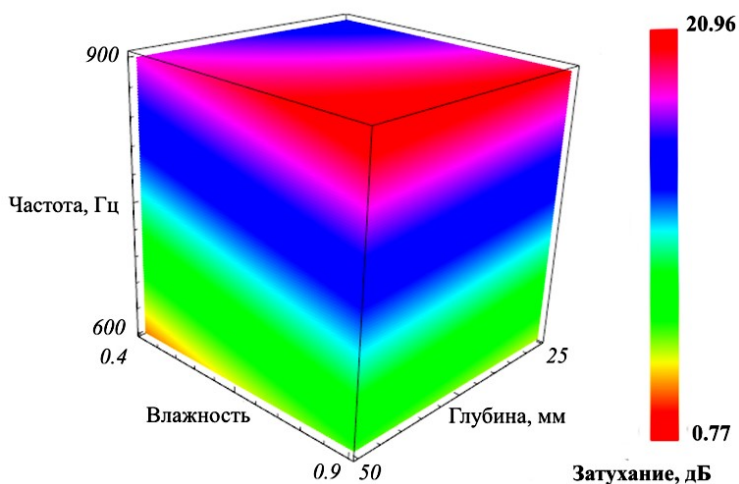


Рисунок 17 – Влияние факторов на затухание сигнала

Доверительные интервалы для частот амплитудного спектра сигнала, полученного на действующем трубопроводе с дистанцией между источником и приемником в 500 м для обычного состояния и с имитатором «шурф». Площадь шурфа относительно площади трубопровода составила 0,2%.

Доверительный интервал построен с использованием значения  $t$ -критерия Стьюдента на основе 30 амплитудных спектров, каждый из которых определялся как среднее значение амплитудного спектра, полученное по 488 реализациям из 8 импульсов с окном БПФ, равным 1024 точки (всего 240 импульсов, шаг частотной сетки 43 Гц). Доверительная вероятность  $P = 0,99$ , коэффициент  $t = 2,75$ .

По полученным результатам можно утверждать, что с вероятностью  $P = 0,99$  значения отмеченных номерами диапазонов частот расположены в границах интервалов, не имеющих взаимного пересечения для двух состояний действующего трубопровода.

Обнаружено восемь информативных диапазонов. В каждом из диапазонов выделялась самая информативная частота, определяемая как максимум разницы амплитуд между соседними границами интервалов для двух состояний трубопровода. Зафиксировано максимальное снижение амплитуды сигнала на 4,16 дБ для частоты 43 Гц в диапазоне 43-215 Гц.

На макет трубы длиной 4 м диаметром 50 мм устанавливался металлический

симости от изменяющихся параметров почво-грунтов, метеорологических условий, режимов перекачек продукта, его физических параметров и др. На сегодняшний день принципиальных ограничений на создание таких адаптированных к внешним условиям систем нет.

Интерес на практике представляют частотные области сигналов, чувствительные к возникновению изменений свойств среды. На рис. 18, 19 изображены доверительные

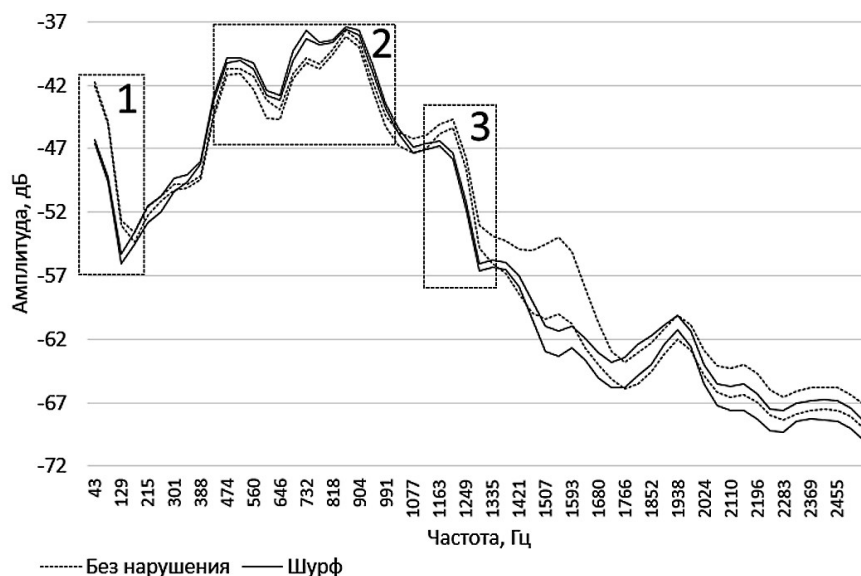
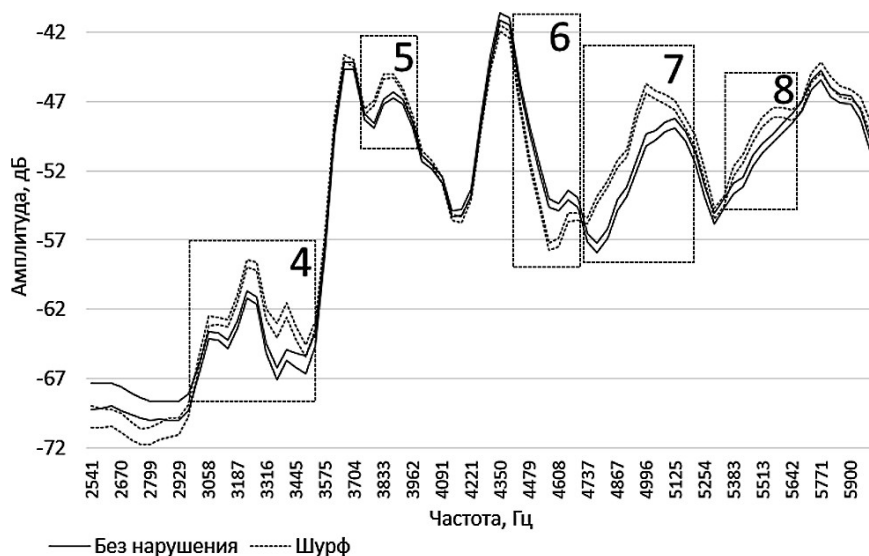


Рисунок 18 – Доверительный интервал для амплитудного спектра состояний трубопровода (диапазон 43-2498 Гц, 240 импульсов)

брусок с площадью контакта 0,16% от всей площади трубы. Аналогичным образом обнаружено три информативные частотные зоны. Зафиксировано максимальное



снижение амплитуды на 9,2 дБ для частоты 947 Гц при возникновении инородного объекта на поверхности трубы. При наличии шурфа фиксируются отклонения амплитуд частот во всем диапазоне 43-6000 Гц. Максимальное снижение амплитуды составило 6,7 дБ в диапазоне 172-603 Гц.

Рисунок 19 – Доверительный интервал для амплитудного спектра состояний трубопровода (диапазон 2541-6000 Гц, 240 импульсов)

Результаты дают основания для разработки методики выявления информативных диапазонов частот виброакустического сигнала на действующих трубопроводах с последующей корректировкой настроек системы контроля под предполагаемые нарушения.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы и подведены итоги.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ, ВЫВОДЫ

Итоги выполненного исследования по теме диссертации заключаются в следующем.

1. Разработан активный помехоустойчивый виброакустический способ контроля состояния магистрального трубопровода, позволяющий обнаруживать шурфы, врезки, несанкционированную установку объектов на действующем трубопроводе протяженностью 500 м, основанный на последовательном накоплении генерируемых в трубопроводе импульсов упругих колебаний и сравнении накопленного сигнала с полученным ранее на трубопроводе без нарушений.

2. Предложены полная и базовая математические модели виброакустического сигнала, фиксируемого на поверхности трубопровода при ударном воздействии. Проведено моделирование на макете трубопровода длиной пять метров и на действующем участке трубопровода длиной 200 м с добавлением шумовой составляющей, соответствующей реальным условиям перекачки продукта. Наиболее достоверные результаты были получены на основе полной модели. Для макета трубопровода длиной пять метров коэффициент корреляции аналитического и эмпирического амплитудного спектра составил 0,95. Для действующего участка трубопровода протяженностью 200 м данное значение равно 0,89. Абсолютная ошибка при сравнении с эмпирическим сигналом составила 3,4 дБ для трубы длиной пять метров и 2,4 дБ

для трубы длиной 200 м с перекачиваемой жидкостью. Максимальная относительная ошибка составила 6,4%.

3. По результатам математического моделирования функционирования разработанного способа в условиях значительного зашумления полезного сигнала помехой, соответствующей реальным условиям эксплуатации трубопровода, установлено повышение отношения сигнал/шум более чем в 30 раз при накоплении 1000 импульсов, при этом отношение сигнал/шум повысилось с 0,027 до 0,84, а коэффициент корреляции накопленного сигнала с исходным сигналом без шума - с 0,13 до 0,98 соответственно.

4. Определены вероятности ошибок первого и второго рода при обнаружении имитаторов несанкционированной деятельности на действующем трубопроводе предложенным способом, которые составили 0,017 и 0,025 соответственно.

5. Создана регрессионная модель затухания упругих колебаний в заглубленной трубе на основе двухуровневого полнофакторного эксперимента, отражающая зависимость коэффициента затухания упругих волн от частоты упругих колебаний, влажности грунта и глубины погружения трубы в грунт.

6. Определены диапазоны амплитудно-частотного спектра виброакустического сигнала, обладающие наибольшей информативностью при установке имитаторов нарушений на действующем трубопроводе протяженностью 500 м диаметром 400 мм и макете трубы длиной 4 м с диаметром 50 мм. На действующем трубопроводе зафиксировано восемь частотных диапазонов с максимальным снижением амплитуды сигнала на 4,16 дБ для частоты 43 Гц в диапазоне 43-215 Гц при создании шурфа с площадью оголения поверхности трубы, составляющей 0,2% от площади контролируемого объекта. На макете трубопровода зафиксировано три частотных диапазона с максимальным снижением амплитуды на 9,2 дБ для частоты 947 Гц в интервале 474-1335 Гц при возникновении шурфа площадью 5% от площади трубы и на 6,7 дБ для частоты 431 Гц в интервале 172-603 Гц при возникновении инородного объекта на трубе с площадью контакта 0,16%. Результаты дают основания для разработки методики выявления информативных диапазонов частот виброакустического сигнала на действующих трубопроводах с последующей корректировкой настроек системы контроля под предполагаемые нарушения.

7. Результаты работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «СибАДИ», использованы в исследовательской работе ООО «Энергосервис» и включены в отчеты НИР:

– «Разработка комплексированной технологии оперативного выявления террористических угроз на магистральных продуктопроводах» (государственный контракт № П215 от 22.07.09);

– «Разработка технологии предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного характера на линейной части магистральных подземных продуктопроводах» (соглашение № 14.В37.21.0648 от 20.08.12);

– «Разработка программно-аппаратного комплекса для распознавания видов нарушений режима охраны на основе сигналов, получаемых с протяженных трубопроводных сетей внутри охраняемого объекта» по программе «СТАРТ» (рег. номер

01201277730 от 29.07.2013) при поддержке фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

8. Работа получила поддержку Российского фонда фундаментальных исследований в рамках гранта по теме «Совершенствование активного виброакустического способа контроля состояния линейной части магистральных трубопроводов» (договор №17-08-01560\17 от 06.04.2017).

Выполненные исследования позволили предложить решение важной научной проблемы контроля состояния магистральных трубопроводов.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Федотов, А. А. Аналитическое исследование проблемы обнаружения и предотвращения хищений продуктов из магистральных продуктопроводов / А. А. Федотов // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2013. – № 9. – С. 43–48.

2. Федотов А. А. Математическая модель упругих колебаний трубопровода при ударном воздействии / А. А. Федотов // Международный научно-технический журнал. – 2017. – № 5 (59). – С. 132–138.

3. Епифанцев, Б. Н. Концепция обеспечения безопасной работы магистральных трубопроводов в условиях внешних воздействий / Б. Н. Епифанцев, А. А. Пятков, А. А. Федотов // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – №12. – С. 42–49.

4. Епифанцев, Б. Н. К оценке чувствительности виброакустической системы обнаружения локальных возмущений параметров среды в окружении магистрального трубопровода / Б. Н. Епифанцев, А. А. Пятков, А. А. Федотов // Дефектоскопия. – 2015. – № 2. – С. 17–26.

*Патенты на изобретение:*

5. Способ обнаружения изменений параметров среды в окружении заглубленного магистрального продуктопровода : пат. 2463590 Рос. Федерация : МПК G 01 N 29/04 (2006.01) / Б. Н. Епифанцев, А. А. Федотов ; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия". – № 2011121858/28; заявл. 30.05.2011; опубл. 10.10.2012; Бюл. № 28.

6. Способ дистанционного обнаружения изменения состояния рельсового пути перед движущимся поездом : пат. 2490153 Рос. Федерация : МПК В 61 К 9/08 (2006.01), В 61 L 1/06 (2006.01), В 61 L 23/04 (2006.01), G 01 N 29/04 (2006.01) / Б. Н. Епифанцев, Р. А. Ахмеджанов, А. А. Федотов ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Научно-производственный центр "Энергосервис". – № 2011151206/11; заявл. 14.12.2011; опубл. 20.08.2013; Бюл. № 11.

*Прочие публикации:*

7. Федотов, А. А. Автоматизированная система предотвращения террористической деятельности на магистральных трубопроводах / А. А. Федотов // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!: материалы IV Всерос. молодежной науч.-техн. конф. с междунар. участием, 15-17 нояб. 2011г.: в 2 кн. – Омск: ОмГТУ, 2011. – С. 128–131.

8. Пятков, А. А. Программно-аппаратный комплекс предотвращения не-санкционированной деятельности на магистральных продуктопроводах / А. А. Пятков, А. А. Федотов // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании «2011». – Выпуск 4. Том 1. – Одесса: Черноморье, 2011. – С. 88–92.

9. Копейкин, С. А. Подход к нейтрализации угроз безопасности трубопроводного транспорта / С. А. Копейкин, А. А. Федотов // Динамика систем, механизмов и машин: материалы IX международной научно-технической конференции. – Омск: ОмГТУ, 2014. – № 4. – С. 231–234.

10. Федотов, А. А. Модель затухания упругих колебаний в оболочке заглубленного трубопровода / А. А. Федотов // Научный альманах: Материалы международной научно-технической конференции «Вопросы образования и науки». – Тамбов – 2015. – С. 297–300.

11. Федотов, А. А. Оценка эффективности активного виброакустического способа контроля состояния линейной части магистральных продуктопроводов / А. А. Федотов // Сборник научных трудов: Материалы III Международной научно-практической конференции «Современная наука: теоретический и практический взгляд». – Таганрог – 2015. – С. 82–85.

12. Программный модуль комплексированной автоматизированной системы обнаружения вторжений в трубопровод "SensWall". Программа для ЭВМ № 2012610437 / Б. Н. Епифанцев, А. А. Пятков, А. А. Федотов. – Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 10.01.2011.

13. Программный модуль для определения координаты нарушителя в охраняемой зоне "SensWall Detect". Программа для ЭВМ № 2013617544 / С. А. Копейкин, А. А. Федотов – Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 20.09.2013.

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Автор выражает благодарность первому научному руководителю д.т.н., профессору Епифанцеву Борису Николаевичу за существенный вклад и помощь при работе над диссертацией.