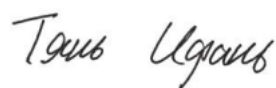


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Тянь Ифань



ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДА РАННЕЙ ОЦЕНКИ
ПОВРЕЖДЕНИЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ НА ОСНОВЕ
ЛИНЕЙНЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ВОЛН

Специальность 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов,
баз и хранилищ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук
Палаев А.Г.

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБОПРОВОДАХ.....	11
1.1 Современное состояние и перспективы развития международного опыта поиска повреждений полиэтиленовых труб на примере Китая и России	11
1.2 Описание методов обнаружения и локализации дефектов в неметаллических (полиэтиленовых) трубопроводах	12
1.3 Фундаментальные исследования и физические ограничения	15
1.4 Анализ патентных материалов	38
1.5 Анализ отечественного и зарубежного практического опыта	40
1.6 Метод акустической эмиссии для контроля трубопроводов	44
1.7 Проблемы применения метода акустической эмиссии по выявлению дефектов трубопроводов	49
1.8 Отечественный опыт обнаружения дефектов в полиэтиленовых трубопроводах	51
1.9 Выводы по главе 1	53
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ НА РАННЕЙ СТАДИИ	56
2.1 Метод детектирования дефектов полиэтиленовых труб на основе линейно-направленных волн	56
2.2 Оценка демпфирующих свойств ПЭ трубы	63
2.3 Разработка алгоритма описания трещин	67
2.4 Выводы по главе 2	71
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАННЕЙ ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ВОЛН	73
3.1 Методика проведения исследований	73
3.2 Экспериментальные исследования оценки повреждений на основе линейных направленных волн	77

3.3 Экспериментальные исследования оценки повреждений на основе линейных направленных волн и статистическая обработка результатов	80
3.4 Выводы по главе 3	85
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РАННЕЙ ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ВОЛН В ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ.....	87
4.1 Обнаружение линейно направленной волны и ее реакция на повреждение ПЭ трубопровода	87
4.2 Оценка повреждений ПЭ трубопровода с помощью линейно направленных волн	90
4.3 Рекомендации по оценке повреждения полиэтиленового трубопровода в газораспределительной сети	96
4.6 Выводы по главе 4.....	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	99
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	100
ПРИЛОЖЕНИЕ А Устройство автоматизированного ультразвукового обнаружения дефектов на поверхности трубопроводов.....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения результатов диссертационной работы...	118

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Распределительные газопроводы из полиэтилена (ПЭ) широко применяются в системах газораспределения благодаря ряду эксплуатационных преимуществ по сравнению со стальными трубопроводами. Использование полиэтиленовых труб позволяет снизить трудоёмкость монтажных работ, повысить коррозионную стойкость трубопроводов и обеспечить длительный срок эксплуатации газораспределительных сетей. В связи с этим наблюдается устойчивая тенденция к расширению применения полиэтиленовых газопроводов при строительстве и реконструкции распределительных сетей.

Одновременно с увеличением протяжённости полиэтиленовых газопроводов возрастает количество аварийных ситуаций, связанных с их повреждением. По статистическим данным, около 44 % повреждений ПЭ-газопроводов обусловлено механическими воздействиями при выполнении земляных работ. Одной из основных причин является сложность определения фактического положения полиэтиленовых трубопроводов с использованием традиционных методов, ориентированных преимущественно на металлические коммуникации. На практике сведения о расположении ПЭ-газопроводов в большинстве случаев определяются по исполнительной документации, которая не всегда отличается достаточной точностью и актуальностью. Кроме того, многие методы неразрушающего контроля, эффективно применяемые для стальных трубопроводов, неприменимы для полиэтиленовых газопроводов.

Дополнительной проблемой является отсутствие единого методического подхода к оценке технического состояния и прогнозированию повреждений полиэтиленовых газопроводов, а также недостаточное внедрение современных диагностических технологий, что снижает эффективность предупреждения аварийных ситуаций.

Ранняя оценка повреждений ПЭ-газопроводов способствует надёжному функционированию объектов газораспределения и газопотребления, предотвращению аварий, экономических и экологических потерь.

В связи с этим актуальной научно-технической задачей является разработка метода ранней оценки повреждений полиэтиленовых газопроводов на основе анализа линейных направленных волн. Реализация данного подхода требует разработки средств регистрации и обработки волновых сигналов, а также формирования методической основы оценки технического состояния полиэтиленовых трубопроводов. Использование разработанного метода позволит повысить безопасность эксплуатации газораспределительных сетей и снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Степень разработанности темы исследования

Система распределительных газопроводов представляет собой многокомпонентный технологический комплекс, предназначенный для транспортировки природного газа от магистральных трубопроводов к конечным потребителям. Надёжность функционирования таких систем во многом определяется техническим состоянием трубопроводов и эффективностью применяемых методов диагностики.

Вопросам распространения линейных направленных волн в различных конструкциях посвящено значительное количество научных исследований. Существенный вклад в развитие данного направления внесли отечественные учёные: Гришанина Т.В., Колесников К.С., Образцов И.Ф., Новожилов В.В., Уманский А.А., Шклярчук Ф.Н., Тютюнников Н.П., Субботин С.Л., Михасёв Г.И., Баранов Н.А., Родыгин А.В., Кулешова А.Н., Петрова И.Г., Егоров В.В., Лебедева Т.Н., Мурашов С.А., Пчелинцева О.Н., Диденкулов И.Н., Екимов А.Э., Казаков В.В. и другие. Проведённые исследования в основном были ориентированы на металлические конструкции и не учитывали особенности распространения направленных волн в полиэтиленовых трубопроводах.

В зарубежных исследованиях Huang S., Barile C., Shafique S., Diogo A.R., Moreira B., Gouveia C. A., Guan R., Lu Y., Duan W., Desai P. R., Mao H., Ren J., Tang Y., Patadia H., Lively K., Wee J. W., Park S. Y., Das S., Dhar A. S., Guo Z., Xu R. и других авторов рассматривались методы локализации подземных коммуникаций, основанные на применении линейных направленных волн. Вместе с тем вопросы

диагностики технического состояния полиэтиленовых газопроводов и раннего выявления повреждений в указанных работах исследованы недостаточно.

Таким образом, разработка метода ранней диагностики повреждений полиэтиленовых газопроводов на основе анализа линейных направленных волн и его экспериментальная верификация являются актуальной научной задачей. Для определения эффективности и области применения предлагаемого подхода требуется проведение комплексных исследований, включающих лабораторное изучение физических процессов и численное моделирование. Результаты таких исследований могут быть использованы при формировании теоретической и методической базы повышения надёжности и безопасности эксплуатации полиэтиленовых газораспределительных сетей.

Объект исследования – полиэтиленовые трубопроводы, применяемые в сетях газораспределения.

Предмет исследования – оценка повреждений полиэтиленовых труб на основе линейных направленных волн и анализе характеристик направлений рассеяния волновых откликов.

Цель работы – повышение качества диагностики полиэтиленовых газопроводов

Идея работы заключается в применении линейных направленных волн для выявления повреждений полиэтиленовых трубопроводов на ранней стадии.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных задач:

1. Провести анализ научной литературы, патентных материалов, а также отечественного и зарубежного опыта в области обнаружения, локализации и количественной оценки повреждений подземных полиэтиленовых трубопроводов.
2. Изучить существующие методы и технологии поиска, мониторинга и диагностики технического состояния подземных распределительных газопроводов из полиэтилена.
3. Установить функциональную зависимость, описывающую влияние характеристики дефектов полиэтиленового трубопровода на изменение параметров

линейно-направленных волн.

4. Экспериментально и теоретически обосновать применимость разработанного метода ранней оценки повреждений полиэтиленовых труб на основе анализа линейно-направленных волн в условиях, приближенных к реальным условиям.

5. Разработать программный модуль для ЭВМ, реализующий предложенный метод ранней диагностики повреждений, и сформулировать методические рекомендации по его практическому применению в системах технического мониторинга газораспределительных сетей.

Научная новизна работы:

1. Разработана новая методика раннего выявления повреждений полиэтиленовых трубопроводов, основанная на применении линейно-направленных волн и анализе характеристик рассеяния волновых откликов от дефектов, что впервые позволяет повысить достоверность диагностики за счёт отдельного определения типов дефектов по особенностям волновых откликов.

2. Установлена прямая пропорциональная зависимость амплитуды второй гармоники линейно-направленной волны от степени повреждения полиэтиленового материала, что обосновывает использование данного параметра для количественной оценки уровня повреждённости трубопровода.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ по пункту 4. «Методы и средства информационных технологий, моделирования, мониторинга, прогнозирования, интеллектуального инжиниринга и управления, автоматизации и роботизации, стандартизации и цифровизации технологических процессов проектирования, сооружения, эксплуатации, диагностики, ремонта сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, а также других газовых, жидкостных и многофазных сред, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта с целью

повышения эффективности, надежности и безопасности использования отраслевого потенциала и ресурса трубопроводных конструкций».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Установлена связь между параметрами линейно-направленных волн, характеристиками волновых откликов и степенью повреждения ПЭ труб.

2. Предложен программный модуль для анализа и типизации волновых откликов дефектов. Разработан подход к моделированию волнового рассеяния с использованием S-матрицы.

3. Создана методическая основа для дальнейшего развития системы мониторинга и цифрового двойника трубопровода.

4. Результаты диссертационного исследования реализованы в компании «Shengli Highland Oilfield Services Co., Ltd» при выполнении научно-исследовательской работы, что подтверждено актом о внедрении результатов диссертации от 19.03.2026 г. (Приложение Б).

5. По результатам диссертационного исследования получен патент на изобретение № 2822296 «Устройство автоматизированного ультразвукового обнаружения дефектов на поверхности трубопроводов» (Приложение А).

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач был применен комплексный метод исследований, включающий анализ теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации:

- анализ поведения второй гармоники образцов из полиэтилена с различной степенью старения.

- оценка значений коэффициента β , характеризующего способность материала или поверхности поглощать акустическую энергию при старении материала ПЭ и наличия дефектов.

Использовалось аттестованное и поверенное специализированное оборудование, на котором исследовались вырезанные из магистральных газопроводов образцы с различными видами дефектов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика раннего выявления и оценки повреждений полиэтиленовых трубопроводов, основанная на использовании линейно-направленных волн и анализе характеристик направлений рассеяния волновых откликов от дефектов различной природы способствует повышению качества диагностики полиэтиленовых трубопроводов.

2. Амплитуда волны второй гармоники, возникающая при распространении линейно-направленной волны в полиэтиленовом трубопроводе находится в прямой пропорциональной зависимости от степени повреждения материала трубопровода, что позволяет использовать данный параметр в качестве диагностического признака.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена тем, что защищаемые положения, выводы и рекомендации, разработанные в диссертации, базируются на строгих теоретических подходах, теоретически и экспериментально обоснованных математических моделях. Достоверность результатов работы подтверждается совпадением экспериментальных данных с результатами общепризнанных исследований по теме диссертации.

Апробация результатов диссертации проведена на 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных. За последние 3 года принято участие в 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных:

1. XVIII Международная научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт – 2023» (16-17 ноября 2023 года, г. Уфа).

2. XXVI Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы транспорта и хранения углеводородных ресурсов при освоении Арктики и Мирового Океана» (07-08 ноября 2023 года, г. Тюмень).

3. 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElCon 2024 (29-30 January 2024 года, Saint Petersburg).

4. Ежегодная научная конференция Общества механики горных пород и инженерного дела провинции Аньхой (июль 2025 года, Китай).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме диссертации, разработке методики исследования, проведении экспериментальных исследований по оценке повреждений полиэтиленовых труб на основе линейных направленных волн, в написании научных работ по теме диссертации.

Публикации. Результаты диссертации в достаточной степени освещены в 10 печатных работах (пункты списка литературы № 10, 11, 22, 23, 27, 89, 101, 106-108), в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 5 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение (пункт списка литературы № 16, Приложение А).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 122 наименование, и 2 приложений. Диссертация изложена на 120 страницах машинописного текста, содержит 41 рисунок и 8 таблиц.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

1.1 Современное состояние и перспективы развития международного опыта поиска повреждений полиэтиленовых труб на примере Китая и России

Подземные трубопроводы являются важной частью городской инфраструктуры и имеют важное значение для городов [9, 24]. С технологическим развитием материалы, из которых изготавливаются подземные городские коммуникации, меняются [3, 6]. В конце XX века в Китае активно начали вводиться новые стандарты по замене стальных подземных трубопроводов на полиэтиленовые [12]. В настоящее время неметаллические трубы, из таких материалов как: полиэтиленовые (ПЭ) трубы, поливинилхлоридные (ПВХ) трубы, полипропиленовые (ПП) становятся все более популярными в виду их высокого эксплуатационного ресурса и невысокой стоимости, экологически чистой и безопасной эксплуатацией [2]. В Китае и России для обнаружения и локализации заглубленных трубопроводов широко применяются неразрушающие методы, такие как электромагнитное зондирование, метод магнитного градиента, искусственная сейсмика и георадар (геологическая радиолокация). В Китае порядок выполнения работ по обнаружению городских подземных трубопроводов регламентируется технической спецификацией CJJ 61-2017, устанавливающей требования к проведению инженерных изысканий, поиску и регистрации подземных коммуникаций [37]. В частности, в китайских исследованиях [22, 64, 58] представлен детальный анализ возможностей этих методов применительно как к металлическим, так и к неметаллическим трубопроводам.

Однако задача обнаружения и локализации неметаллических трубопроводов, в особенности изготовленных из полиэтилена, остаётся технически сложной. Это обусловлено их диэлектрической природой: полиэтиленовые трубы не обладают ни электропроводностью, ни магнитными свойствами, что делает их «невидимыми» для традиционных электромагнитных и магнитных методов, эффективных лишь в отношении металлических коммуникаций [112, 267].

Еще более острой проблемой является диагностика и определение местоположения дефектов в уже установленных подземных полиэтиленовых газопроводах. Существующие методы позволяют в лучшем случае локализовать саму трассу трубопровода, но не обеспечивают достаточной чувствительности и разрешающей способности для выявления микрповреждений, трещин, деградации материала или нарушений целостности соединений. Таким образом, разработка надёжных, чувствительных и применимых на практике методов раннего обнаружения и локализации дефектов в полиэтиленовых трубопроводах представляет собой актуальную научно-техническую задачу как для Китая, так и для России.

1.2 Описание методов обнаружения и локализации дефектов в неметаллических (полиэтиленовых) трубопроводах

Существует широкий спектр потенциальных методов, предназначенных для обнаружения повреждений и локализации подземных неметаллических полиэтиленовых (ПЭ) трубопроводов (рисунок 1.1) [65].



Рисунок 1.1 – Классификация методов обнаружения повреждений подземных неметаллических трубопроводов (составлено автором)

С учетом технических характеристик, физически принципов действия и степени технологической зрелости данные методы могут быть классифицированы

на следующие категории [10, 33, 100, 111]: технологии электромагнитной индукции, технологии электромагнитных волн, акустические технологии, новейшие технологии.

Для диагностики подземных полиэтиленовых (ПЭ) трубопроводов в настоящее время применяется ряд методов, предназначенных как для определения положения трассы, так и для выявления дефектов трубопровода. В зависимости от используемого физического принципа и особенностей технической реализации данные методы могут быть разделены на несколько основных групп.

Методы электромагнитной индукции основаны на применении дополнительных проводящих элементов, поскольку полиэтилен не обладает электропроводностью и не взаимодействует с электромагнитным полем [44]. Одним из наиболее распространённых решений является использование трассерной линии, представляющей собой металлический проводник, размещённый вдоль ПЭ-трубопровода [35]. При пропускании электрического тока создаётся индукционное магнитное поле, по которому определяется положение трубопровода. Другим вариантом является применение зондового трассера, вводимого внутрь трубы. В этом случае локализация трубопровода осуществляется по распределению интенсивности принимаемого электромагнитного сигнала. Вместе с тем указанные методы ориентированы преимущественно на определение положения трассы и не позволяют непосредственно выявлять дефекты стенки трубопровода.

К электромагнитно-волновым технологиям относятся георадиолокация (GPR) и радиочастотная идентификация (RFID). Принцип действия георадара основан на регистрации отражённых импульсов высокочастотных электромагнитных волн на границах сред, обладающих различной диэлектрической проницаемостью [32, 56, 57, 66]. Несмотря на возможность визуализации трубопровода, применение данного метода ограничено недостаточной разрешающей способностью при обнаружении микротрещин, локальных повреждений и деградации материала, особенно при значительной глубине заложения трубопровода и повышенной влажности грунта. RFID-

технологии предусматривают использование встроенных пассивных меток, позволяющих идентифицировать отдельные участки трубопровода, однако оценка технического состояния труб при этом не выполняется [121, 67, 113].

Наибольший интерес для диагностики повреждений полиэтиленовых трубопроводов представляют акустические и вибрационные методы контроля [34, 119, 118]. Акустические методы основаны на возбуждении механических колебаний и анализе параметров волн, распространяющихся в системе «трубопровод – грунт» [90]. К данной группе относится метод прямого акустического возбуждения, при котором акустический сигнал заданной частоты вводится непосредственно в стенку трубопровода [86], а дальнейший анализ параметров распространяющейся волны используется для выявления аномальных участков [27, 74, 82]. Метод упругих (сейсмоакустических) волн основан на возбуждении колебаний в грунте и регистрации отражённых либо рассеянных волн, характеристики которых изменяются при наличии дефектов в трубопроводе [50, 84, 87]. Для обнаружения объектов, расположенных на небольшой глубине, также рассматривается использование отражённых сейсмических волн [91, 71, 103]. При этом диагностическая информация может быть получена по параметрам колебаний поверхности грунта, возникающих вследствие волнового движения в заглубленном трубопроводе [52, 83]. При распространении волны в заглубленном пластиковом трубопроводе необходимо учитывать влияние окружающей грунтовой среды на характеристики осесимметричных волн [51]. Метод точечной вибрационной диагностики предусматривает приложение гармонического возбуждения в отдельных точках поверхности грунта с последующим анализом резонансных откликов, чувствительных к изменениям жёсткости и нарушению целостности конструкции [30, 85, 105]. При интерпретации вибрационных откликов трубопроводных систем необходимо учитывать влияние внутреннего потока и случайных возбуждений на динамическое поведение трубы [97].

Несмотря на наличие определённых диагностических возможностей, большинство существующих методов в первую очередь предназначено для локализации трассы трубопровода, тогда как задачи количественной оценки

повреждений решаются ограниченно. В связи с этим возрастает необходимость применения более чувствительных методов контроля, основанных на использовании нелинейных акустических эффектов и анализе линейно-направленных волн, позволяющих фиксировать изменения структуры материала на ранних стадиях развития дефектов.

Дополнительно для обнаружения повреждений полиэтиленовых трубопроводов применяются методы, основанные на изменении физических свойств материала [39]. К ним относятся инфракрасная термография, метод удельного сопротивления высокой плотности, инерционные гироскопические системы и электроёмкостная томография [38, 61, 110]. Инерционные навигационные системы применяются при внутритрубном обследовании трубопроводов для оценки положения диагностического устройства, при этом повышение точности достигается за счёт совместной обработки данных IMU, одометра и опорных станций [36]. Метод инфракрасной термографии основан на регистрации температурных различий между транспортируемой средой и окружающим грунтом [29, 88, 115]. Электроёмкостная томография рассматривается как перспективный метод контроля трубопроводов из диэлектрических материалов, поскольку позволяет выполнять реконструкцию внутреннего состояния объекта по изменению распределения электрической ёмкости [92]. Метод удельного сопротивления высокой плотности использует различие электрического сопротивления материала трубы и окружающей среды [75, 122]. Электроёмкостная томография рассматривается как перспективный метод контроля трубопроводов из диэлектрических материалов, поскольку позволяет выполнять реконструкцию внутреннего состояния объекта по изменению распределения электрической ёмкости [47].

1.3 Фундаментальные исследования и физические ограничения

Анализ научных публикаций, выполненных в течение последних двух десятилетий, показывает наличие существенных ограничений при применении традиционных методов неразрушающего контроля к полиэтиленовым (ПЭ) трубопроводам. Основной причиной является несоответствие физических

принципов классических методов контроля диэлектрическим и вязкоупругим свойствам полиэтилена. Данные вопросы подробно рассматриваются в работах, опубликованных в журналах *Polymer Testing*, *NDT & E International*, *Ultrasonics* и других специализированных изданиях.

Исследования, направленные на адаптацию ультразвуковых методов контроля к полиэтиленовым трубопроводам, показывают, что одним из основных ограничивающих факторов является выраженное затухание ультразвуковых волн в материале ПЭ. В работе J. S. Egerton, M. J. S. Lowe, P. Nuthwaite и H. V. Halai [45] исследованы акустические характеристики материала труб из полиэтилена высокой плотности, включая затухание и фазовую скорость ультразвуковых волн. Установлено, что указанные параметры зависят от частоты, температуры, направления распространения волны и положения по толщине стенки трубы. При таких условиях применение стандартных ультразвуковых схем контроля осложняется снижением амплитуды регистрируемого сигнала, искажением формы импульса и необходимостью учитывать дисперсионные свойства полиэтилена при обработке диагностических данных. При акустическом обнаружении подземных трубопроводов существенное влияние на параметры принимаемого сигнала оказывает грунтовая среда, поскольку затухание акустических волн связано с движением и взаимодействием частиц грунта [60]

В научной литературе также рассматриваются ограничения, связанные с применением электромагнитных методов контроля к полиэтиленовым трубопроводам. Методы *Magnetic Flux Leakage (MFL)* ориентированы преимущественно на контроль ферромагнитных материалов, тогда как *Eddy Current Testing (ECT)* основан на возбуждении вихревых токов и требует электропроводности контролируемого объекта [48, 46]. Полиэтилен не обладает ни ферромагнитными свойствами, ни электропроводностью, поэтому применение данных методов для непосредственной диагностики стенки ПЭ-трубопроводов является физически необоснованным. Вследствие этого основные направления исследований в области контроля полиэтиленовых труб связаны с развитием ультразвуковых, акустических, оптических и комбинированных диагностических

технологий. В современных исследованиях неразрушающего контроля трубопроводов также рассматриваются электромагнитно-акустические технологии, применяемые для выявления коррозионного уменьшения толщины стенки, однако их использование в основном ориентировано на металлические трубопроводы и не решает задачу ранней диагностики повреждений полиэтиленовых труб [101, 108].

Ультразвуковые методы обнаружения дефектов

Акустические колебания представляют собой механические колебания частиц, распространяющиеся в упругих средах – газообразных, жидких и твёрдых. Распространение механического возмущения или деформации в упругой среде рассматривается как акустическая волна. В работах В.В. Казакова, А.М. Сутина и А.Э. Екимова показано, что нелинейно-акустические методы могут применяться для диагностики трещин в стержневых и пластинчатых элементах, что подтверждает чувствительность волновых процессов к нарушениям сплошности конструкционного материала [7]. В исследованиях [8] также рассмотрено применение крутильных волн, возбуждаемых электромагнитно-акустическими преобразователями, при акустическом волноводном контроле трубопроводов. Акустические методы также применяются для оценки внутренних отложений в технологическом оборудовании и трубопроводах, поскольку изменение толщины слоя отложений влияет на параметры распространяющегося акустического сигнала [20, 104]. При анализе волновых процессов в трубопроводных системах необходимо учитывать акустические пульсации давления и вибрационные воздействия, поскольку они способны изменять динамическое состояние технологических трубопроводов и влиять на параметры регистрируемых колебаний [25, 27]. При анализе волновых процессов в тонкостенных элементах необходимо учитывать влияние температурных напряжений, способных изменять собственные колебания пластинчатых конструкций [21].

В зависимости от частоты f звуковые волны подразделяются:

1. Инфразвуковые – до 20 Гц;
2. Звуковые – от 20 до 20000 Гц;

3. Ультразвуковые – от 20 кГц до 1 ГГц;

4. Гиперзвуковые – свыше 1 ГГц.

Для контроля детали применяется диапазон частот от 0,1 до 10 МГц. При этом основной частотой является 2,5 МГц. Мощность излучения невелика и составляет $0,1 \dots 1 \text{ кВт/см}^2$.

При рассмотрении непрерывного источника и идеальной среды, акустические колебания подчиняются уравнению гармонического колебания (1.1):

$$\varphi = \Phi \cos(kx - \omega t), \quad (1.1)$$

где φ – текущее значение амплитуды, м;

Φ – начальное значение амплитуды, м;

k – волновое число, м^{-1} ;

x – координата текущая, м;

ω – угловая частота, с^{-1} ;

t – время, с.

kx , ωt в совокупности называются фаза-положение направления движения точки в данный момент времени.

Идеальная непрерывная волна

1. Уравнение (1.1) для плоской безграничной волны (1.2):

$$n/V_s = \text{const}; \quad (1.2)$$

2. Различают еще сферический источник $\frac{n_1}{V_s} > \frac{n_2}{V_s}$, и уравнение принимает вид (1.3):

$$\varphi = \frac{\Phi \cos(kx - \omega t)}{r} \quad (1.3)$$

3. Цилиндрический (только в одном направлении) по формуле (1.4):

$$\varphi = \frac{\Phi \cdot \cos(kx - \omega t)}{\sqrt{r}} \quad (1.4)$$

Вывод: волна с плоским фронтом имеет наименьшее затухание (не затухает с расстоянием). Наибольшее затухание имеет волна со сферическим фронтом.

Основными характеристиками волны являются:

1. Частота f [МГц]

2. Длина волны λ [мм] – расстояние между двумя частицами, находящимися в одной фазе вычисляется по формуле (1.5):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.5)$$

3. Скорость c [м/с = мм/мкс]; скорость воздуха
 $c_{\text{воз}} = 330 \text{ м/с} = 0,330 [\text{мм/мкс}]$

4. Связь скорости распространения волны, длины волны и частоты определяется выражением (1.6):

$$c = \lambda \cdot f \quad (1.6)$$

Формула (1.6) имеет физический смысл только в данной интерпретации, так как c не зависит от f и λ , а зависит только от физических свойств среды (упругие, постоянные (модуль Юнга G, V и плотность среды).

f – зависит только от источника излучения.

5. Амплитуда N [дБ, dB] определяется по формуле (1.7); dB – относительная характеристика измеряемой величины.

$$N = 20 \lg \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \quad (1.7)$$

A_1, A_2 – амплитуды микросигналов. При УЗК по формуле (1.8):

$$N = 20 \lg \left(\frac{A_i}{A_0} \right), \quad (1.8)$$

где A_i – амплитуда измеряемого сигнала; A_0 – амплитуда излучаемого сигнала (амплитуда зондирующего импульса)

$A_0 > A_i \Rightarrow A_i/A_0 < 1 \Rightarrow N < 0$, т.к. амплитуда сигнала всегда отрицательна, то приняли, знак «–» – не учитывать при измерении амплитуды, однако при сравнении двух амплитуд сигнала знак «–» учитывается.

$$\text{При знаке «+»}: N = \left| 20 \lg \left(\frac{A_i}{A_0} \right) \right|;$$

При знаке «-» или «+»: $N = 20 \lg \left(\frac{A_1}{A_2} \right)$.

1. Активные методы – на объект оказывается воздействие результатом которого является звуковая или ультразвуковая волна и измеряются характеристики, описывающие состояние объекта.

2. Пассивные методы – измеряются только параметры акустических волн без воздействия на объект, по которому судят о его состоянии.

Активные методы

1. *Теневой* – уменьшение амплитуды прошедшего через объект сигнала.

1.1. Временно-теневой – основан на измерении прохождения через объект, связанного с ослаблением дефекта. Принцип прохождения волны при временно-теневом методе представлен на рисунке 1.2.

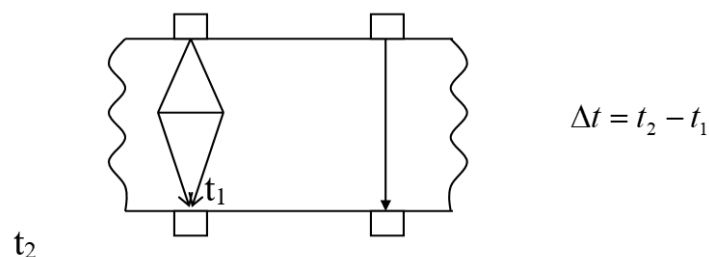


Рисунок 1.2 – Принцип прохождения волны во временно-теневом методе
(составлено автором)

1.2. Вело-симметрический – основан на измерении времени пройденного волной, в тонкой пластине, применяемое (время) следствие наличия трещины типа расслоения. Принцип прохождения волны при вело-симметрическом методе представлен на рисунке 1.3.

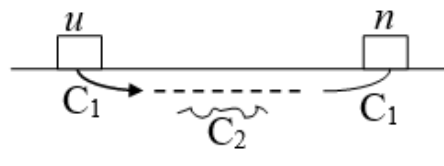


Рисунок 1.3 – Принцип прохождения волны в вело-симметрическом методе:

c_1 – скорость волн в пластине, c_2 – скорость в слое между трещиной и

поверхностью (составлено автором)

Скорость распространения волны в пластине зависит от отношения толщины пластины к длине волны и определяется выражением (1.9):

$$c = f(h/\lambda) \quad (1.9)$$

где h — толщина пластины, м;

λ — длина волны, м.

На разность времен влияет длина трещины и глубина залегания.

1. *Активный метод отражения:*

1.1. Эхо-метод

2. *Активный комбинированный метод:*

2.1. Зеркально-теневой метод — основан на анализе ослабления амплитуды, прошедшей через объект и отраженной на изделие.

2.2. Эхо-зеркальный метод — анализируется сигнал, отраженный на изделие или от дефекта.

2.3. Эхо-сквозной — анализируются сигналы, отраженные на поверхность ввода сигнала дефекта.

Принцип прохождения сигнала при эхо-сквозном методе представлен на рисунке 1.4.

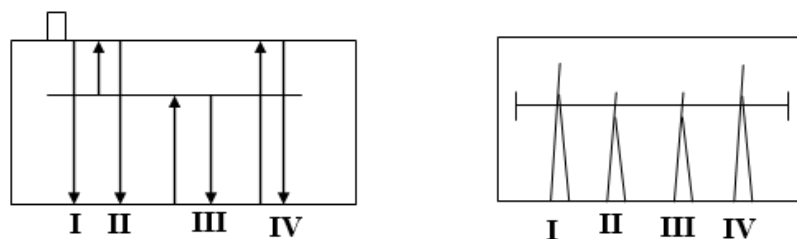


Рисунок 1.4 — Принцип прохождения сигнала в эхо-сквозном методе
(составлено автором)

На рисунке 1.4 обозначены: I — начальный зарегистрированный сигнал; II и III — дополнительные сигналы, возникающие при частичном отражении и прохождении волны через дефектную область; IV — конечный сигнал, соответствующий прохождению волны через контролируемый участок. Наличие сигнала II и III свидетельствуют о либо развивающейся трещине, либо полупрозрачной.

Активные методы основаны на возбуждении в объекте звуковой и ультразвуковой волны (ударом) анализируется спектр полученных сигналов, различают локальный метод, когда возбуждается часть объекта и интегральный, когда возбуждается весь объект.

Активный акустотопографический метод, когда на поверхность наносится тонкий слой порошка, выполняются механические воздействия на пластину, то есть упорная вибрация и в месте нахождения трещины, порошок расходится. Вследствие большей амплитуды колебания металла в районе трещины.

Пассивные методы

1. Шумодиагностика – анализируется спектр шумов излучаемых объектов.
2. Вибродиагностика
3. Акустикоэмиссионный – анализируются сигналы, излученные трещиной при нагружении объекта механически.

При проведении ультразвукового неразрушающего контроля используется более 90% всех объектов, которые контролируются эхо-методом, ЗТМ – применяется как дополнительный к эхо-методу, так же применяются эхо-зеркальный, акустикоэмиссионный, вибро- и шумо- диагностики применяются для контроля узлов (например: буксовый узел).

Эхо-метод

Основан на измерении амплитуды, отраженной от дефектоскопа и времени пройденного сигнала. Схема определения координат дефекта при нормальном и наклонном вводе ультразвуковой волны приведена на рисунке 1.5.

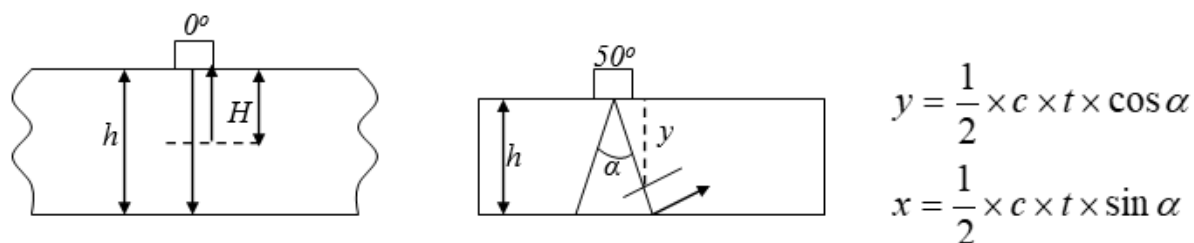


Рисунок 1.5 – Принцип действия эхо-метода (составлено автором)

На рисунке 1.5 приведены схемы определения положения отражателя при нормальном и наклонном вводе ультразвуковой волны. Обозначения на рисунке имеют следующий смысл: h – толщина контролируемого объекта, мм; H – глубина

залегания отражателя при нормальном вводе ультразвуковой волны, мм; c – скорость распространения ультразвуковой волны в материале контролируемого объекта, мм/мкс; t – время прохождения ультразвукового импульса до отражателя и обратно, мкс; α – угол ввода ультразвуковой волны, град.; x – расстояние от точки ввода ультразвуковой волны до проекции отражателя на поверхность объекта, мм; y – глубина залегания отражателя при наклонном вводе ультразвуковой волны, мм.

Для нормального преобразователя глубина залегания отражателя определяется выражением (1.10):

$$H = \frac{c \cdot t}{2} \quad (1.10)$$

t складывается из времени в призме преобразователя и времени пройденного внутри объекта (задержки) (1.11):

$$t = 2t_n + t_z \quad (1.11)$$

где t_n – время в призме преобразователя, с,

t_z – время внутри объекта, с.

Настройка чувствительности

Существует несколько способов настройки:

1. Настройка по эквивалентным отражателям в виде: пропилов, засверловки.

Находим максимум сигнала и доводим до середины экрана (1.12).

$$N_n = N_0 + 6 \dots 8 \text{ дБ} \quad (1.12)$$

где N_0 – браковочная чувствительность.

2. Настройка по условной чувствительности.

Найти чувствительность по СО–2 от отверстия диаметром 6 мм и добавить значение условной чувствительности. Браковочная чувствительность определяется по выражению (1.13):

$$N_0 = r_{\text{СО-2}} + N_{\text{усл}} \quad (1.13)$$

где $N_{\text{усл}}$ – условная чувствительность – это разность между чувствительностью на СО-2 и чувствительностью контроля, с учетом разности акустического контакта на СО-2 и контролируемой детали.

Условная чувствительность с учётом различия акустического контакта на стандартном образце СО-2 и контролируемой детали рассчитывается по формуле (1.14):

$$N_{\text{усл}} = (N_{\text{СО-2}} - N_0) + k \quad (1.14)$$

Для определения браковочной чувствительности применяется SKH-диаграммы. Для этого необходимо знать предельную или эквивалентную чувствительность.

α , f , δ_M – зная их, определяется чувствительность по диаграмме.

3. Настройка по предельной чувствительности:

В качестве отражателя служат плоскодонные засверловки перпендикулярно акустической оси, зарубки или насечки.

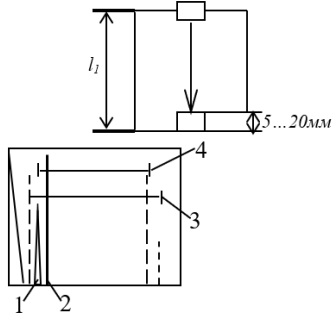
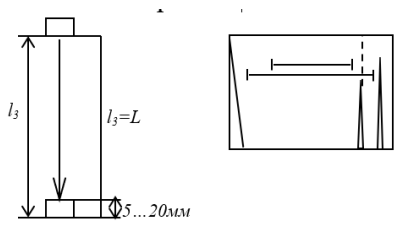
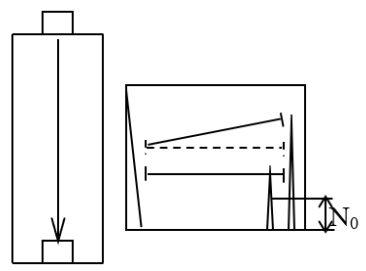
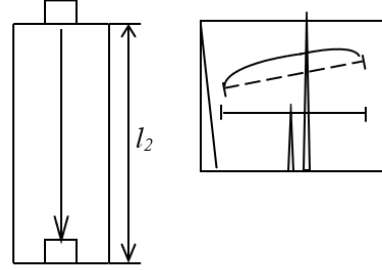
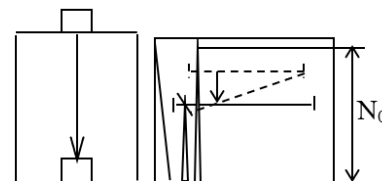
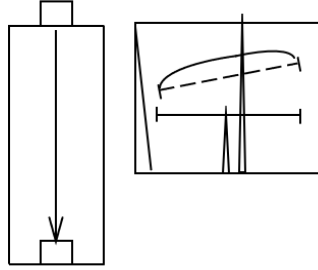
Определяют максимум эхо-сигнала и устанавливают его на середину экрана дефектоскопа. Как правило, одновременно выполняют настройку временной регулировки чувствительности (ВРЧ); для определения предельной чувствительности используют амплитудно-расстояние-диаметр-диаграммы (АРД-диаграммы).

Настройка ВРЧ

Настройка ВРЧ выполняется на образцах с тремя плоскодонными отражателями либо, при малой толщине контролируемого объекта, с двумя зарубками. Последовательность настройки ВРЧ для дефектоскопов УД 2-12 и УД 2-102 приведена в таблице 1.1.

Для настройки ВРЧ, можно выполнять с применением накладных шаблонов с линией ВРЧ, определенный по АРД-диаграмме, шаблон устанавливает на экран и регуляторам амплитуды и формы ВРЧ устанавливают кривую, амплитуда и форма ВРЧ устанавливают кривую. Чувствительность дефектоскопа настраивается на одном из стандартных образцов предприятия (СОП).

Таблица 1.1 – Настройка ВРЧ (составлено автором)

Этап настройки	УД 2-12	УД 2-102
1 Настройка усиления дефектоскопа	Образец №1 с минимальной глубиной залегания отражателя.  1 – эхо-сигнал засверловки; 2 – донный сигнал; 3 – строб АСД; 4 – строб ВРЧ; $l_1 = 10 \dots 50 \text{ мм}$ и более	№3 с максимальной глубиной залегания отражателя 
2 Настройка амплитуды ВРЧ	Образец №3  где N_0 – начальная амплитуда эхо-сигнала при чувствительности на первом этапе. Найти максимальную амплитуду эхо-сигнала от засверловки и регулятором амплитуды ВРЧ, сигнал доводится до середины экрана, регуляторы усиления не изменяются. Образец №2  Установить на образец №2, если сигнал не достигает середины экрана, то регулятором формы ВРЧ, переместить сигнал, доводя его до середины экрана.	Образец №1  Образец №2 

Для наклонного пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) используется один совмещённый СОП, схема которого приведена на рисунке 1.6.

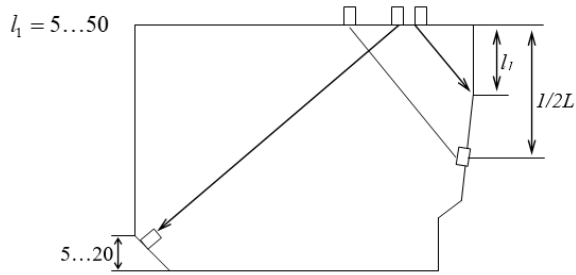


Рисунок 1.6 – Настройка ПЭП на совмещённом СОПе (составлено автором)

Последовательность настройки для дефектоскопа УД2-12: I→II→III, а для УД2-102: II→I→III.

Проведение контроля выполняется путём сканирования по объекту контроля. Способы сканирования определяются в зависимости от характера выявляемых дефектов. Схема продольно-поперечного и поперечно-продольного сканирования представлена на рисунке 1.7.

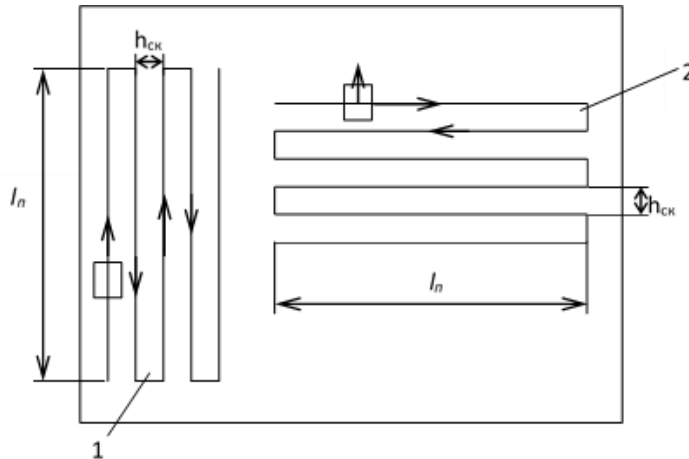


Рисунок 1.7 - Продольно-поперечное или поперечное сканирование:

1 – поперечно-продольное сканирование; 2 – продольно-поперечное; $h_{ск}$ – шаг сканирования ($h_{ск} = 1/2d$, где d – диаметр преобразователя); l_n – пределы перемещения) (составлено автором)

Для выявления всех возможных дефектов различной ориентации, сканирование выполняется в два захода, с разворотом ПЭП на 180° .

Для выявления дефектов, развивающихся под углом, преобразователь разворачивают «влево – вправо» на $j = \pm 10 \dots 30^\circ$.

При контроле протяженности цилиндрических изделий, часто применяют круговое сканирование по торцу и продольно-поперечное.

При установке ПЭП по внешнему периметру, необходимо учитывать явление трансформации и возможность выявления дефектов, не только прямым эхосигналом (D_1), но и трансформированным (D_2). При контроле с торца одновременно с эхо – методом, применяют зеркально-теневой метод. Схема установки ПЭП по внешнему периметру приведена на рисунке 1.8.

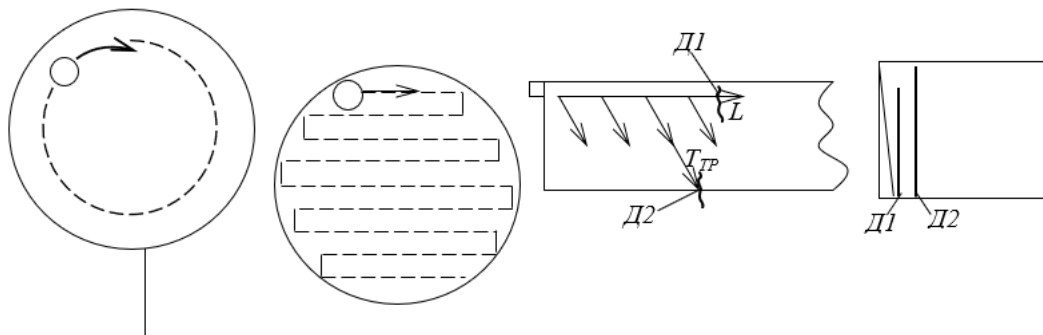


Рисунок 1.8 – Установка ПЭП по внешнему периметру (составлено автором)

При контроле деталей сложной формы может применяться зигзагообразное сканирование, схема которого представлена на рисунке 1.9.

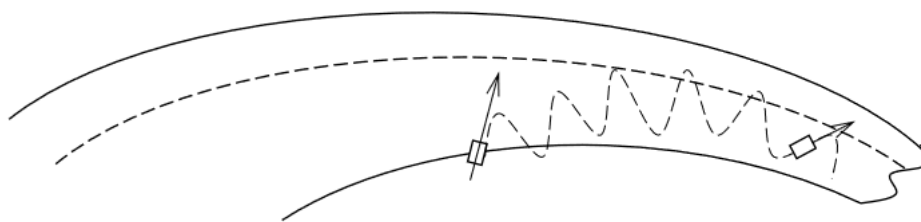


Рисунок 1.9 – Зигзагообразное сканирование (составлено автором)

При контроле сварных швов, кроме продольно-поперечного сканирования применяют, сканирование вдоль шва с разворотом на $10-20^\circ$ и контроль пересечения швов. Схема сканирования вдоль шва и контроля пересечения швов представлена на рисунке 1.10.

При любом способе сканирования скорость сканирования не должна превышать 100 мм/с. В качестве контактной жидкости применяется масло индустриальное, вязкостью 40...60, клей КМЦ или Бустилат, вода и другие жидкие растворы без механических примесей.

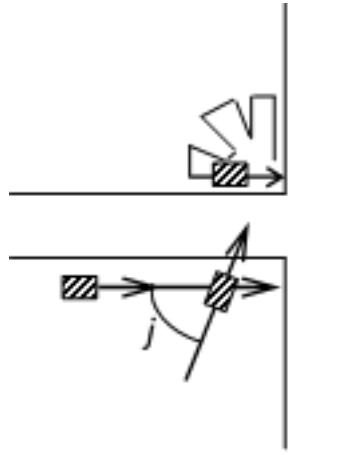


Рисунок 1.10 – Сканирование вдоль шва и контроль пересечения швов
(составлено автором)

Оценка качества, оформление результатов контроля

Решение о браковке принимается:

1. Если превышение амплитуды сигнала от дефекта выше браковочного уровня.
2. По величине условных размеров.
3. По расстоянию между допустимыми дефектами.
4. По количеству дополнительных дефектов.
5. По месту положения дефекта.

Результаты контроля фиксируются в журнале, в котором указываются:

1. Объект контроля.
2. Параметры контроля: ПЭП, браковочная чувствительность.
3. Контролируемые участки и участки, в которых контроль не выполняется.
4. Заключение.
5. Подпись, дата, оператор.

Факторы, определяющие амплитуду эхо-сигнала

Факторами, определяющими амплитуду эхо-сигнала, являются:

1. Величина дефекта.
2. Ориентация дефекта относительно акустической оси, то есть $\alpha = 90 \pm 10^\circ$.
3. Форма дефекта: диск → сфера → цилиндр:

Форма дефекта оказывает влияние на амплитуду отражённого эхо-сигнала. Соотношение амплитуд для дефектов различной формы представлено на рисунке 1.11.



Рисунок 1.11 – Формы дефекта ($A_d > A_{сф}$; $A_d > A_y$; $A_y > A_{сф}$) (составлено автором)

4. Глубина залегания, чем глубже глубина залегания, тем меньше амплитуда.

5. Заполненность отражателя неметаллическими включениями также влияет на амплитуду эхо-сигнала. Схема изменения акустического сопротивления при заполнении отражателя неметаллическими включениями приведена на рисунке 1.12.



Рисунок 1.12 – Заполненность неметаллическими включениями ($Z_{вкл} > Z_{возд}$) (составлено автором)

Чем меньше разница акустического сопротивления на границе двух сред, тем больше доля прошедшей волны и меньше доля отраженной. Соответственно по формуле (1.15):

$$\left. \begin{aligned} \Delta Z_1 &= Z_{ме} - Z_{возд} \\ \Delta Z_2 &= Z_{ме} - Z_{вкл} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \Delta Z_1 &> \Delta Z_2 \\ N_{отр1} &> N_{отр2} \end{aligned} \quad (1.15)$$

При заполнении отражателей не металлических включениями или другой средой, амплитуда отраженного эхо-сигнала уменьшается.

Данное свойство используется для определения поверхностного отражателя, путем прижатия к нему пальца или смачивания его водой (или маслом).

6. Частота или длина волны, определяется по формуле (1.16):

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (1.16)$$

С увеличением частоты, с одной стороны, резко увеличиваются затухания, амплитуда эхо-сигнала резко уменьшается, а также уменьшается доля прошедшей волны через границу раздела, т.к. уменьшается соотношение λ/R_z (параметр шероховатости поверхности) и доля рассеянных на ней волн увеличивается.

С другой стороны, частота увеличивается, длина волны уменьшается, соотношение d/λ (где d – размер отражателя) увеличивается, и амплитуда эхо-сигнала должна возрастать.

7. Диаметр зерна (d_z) или затухания (δ)

Чем больше диаметр зерна, тем больше затухания, тем меньше амплитуда.

8. Температура

Чем больше температура, тем больше затухания и меньше амплитуда.

Критерии оценки качества

Деталь считается дефектной если значение $K_d = A_d/A_0 \leq K_{d0}$ (браковочное значение коэффициента дефектности).

K_d изменяется в пределах от 0 до 1 (1 – дефект отсутствует; 0 – дефект полностью перекрыт УЗ пучком).

При использовании эмиссионных ванн или бесконтактных электромагнитных акустических ПЭП (ЭМА)- $K_{d0} = 0,5$.

Для контактного способа контроля K_{d0} уменьшается от 0,4 до 0,1.

В современных дефектоскопах измеряется в децибелах: для эмиссионных ванн –6 дБ, для контактных способов от –14 до 24 дБ.

Чем меньше по модулю значение браковочного уровня, тем выявляемость лучше.

Факторы, определяющие выявляемость дефекта

1. Величина дефекта.

Чем больше дефект, тем ослабление больше.

2. Глубина залегания.

При увеличении глубины залегания отражателя ультразвуковая волна (УЗВ) расходится, вследствие чего дефект перекрывает меньшую часть ультразвукового пучка. В результате амплитуда донного сигнала увеличивается, коэффициент

дефектности возрастает, а его значение, выраженное в децибелах, уменьшается по модулю.

3. Форма дефекта.

В первом приближении форма дефектов не влияет на амплитуду донного сигнала, ее определяют проекция на дно и соотношение между шириной пучка и проекцией отражателя.

4. Ориентация относительно акустической оси.

Чем больше отклонение от перпендикулярности к акустической оси, тем меньше проекция дефекта и больше коэффициент дефектности, и меньше коэффициент в децибелах.

Дефекты параллельные акустической оси выявляются за счет явления дифракции (образование поперечной трансформированной волны).

Особенностью ТМ и ЗТМ, преимущество по сравнению с эхо-методом, выявление дефектов параллельных акустической оси.

5. Частота и длина волны.

При уменьшении частоты, длина волны увеличивается, доля прошедшей волны увеличивается, затухание уменьшается, амплитуда увеличивается, соотношение d/λ уменьшается, выявляемость дефекта уменьшается.

При d/λ больше 1, волна огибает дефект, и он не выявляется.

6. Затухание или размер зерна.

Диаметр зерна увеличивается, затухание увеличивается, ширина ДН увеличивается за счет рассеяния, следовательно, выявляемость уменьшается, коэффициент дефектности увеличивается, а коэффициент в децибелах по модулю уменьшается.

7. Угол ввода.

Чем α больше, тем угол раскрытия больше, выявляемость меньше, коэффициент дефектности увеличивается, а коэффициент в децибелах по модулю уменьшается.

Чувствительность контроля

1. Реальная чувствительность определяется на объекте контроля, имеющего реальный дефект данного типа и вида, залегающего на определенной глубине и выявляемого с вероятностью ($p = 0,99$), при данной настройке температуры. Используется крайне редко при наличии большого количества дефектных изделий.

2. Предельная чувствительность определяется по образцу с идеальным дисковым отражателем с минимальным разрывом на максимальной глубине, выявляемый с $p = 0,99$ при данной настройке аппаратуры и акустическими свойствами материала. Рассчитывается по АРД-диаграммам.

3. Условная чувствительность характеризуется амплитуда сигнала от отражателя определенного типа и размера, залегающего на данной глубине в материале с определенными акустическими свойствами.

Условная чувствительность по СО-2 – это разность, измеряемая в $[дБ]$ между амплитудой сигнала от отверстия ($d = 6 мм$) в СО-2 и текущей чувствительностью дефектоскопа (или амплитуды сигнала от дефекта) с учетом потери УЗВ на поверхности раздела двух сред в объекте контроля. Значение условной чувствительности определяется по формуле (1.17):

$$N_{ycl} = (N_{CO-2} - N_d) + k_n, \quad (1.17)$$

где k_n – коэффициент потери, равен разности амплитуд сигнала на СО-2 и аналогичном стандартном образце с поверхностью ввода соответствующей поверхности объекта контроля.

4. Эквивалентная чувствительность, объединяет все предыдущие чувствительности и соответствует амплитуде эхо-сигнала от реального или искусственного отражателя с известными размерами, глубиной залегания в материале с определенными акустическими свойствами.

При выполнении контроля и оценки качества различают:

1. Поисковая чувствительность N_0 ;

2. Браковочная чувствительность (оценка допустимости дефекта) $N_0 \rightarrow S_n$;

S_{ycl} ; $S_{экв}$;

3. Чувствительность оценки – применяется для определения дополнительной оценки параметров дефекта. Поисковая чувствительность определяется по формуле (1.18):

$$N_n = N_0 + 6...12\text{дБ}, \quad (1.18)$$

а чувствительность оценки – по формуле (1.19):

$$N_{cy} = N_0 + 0...12\text{дБ} \quad (1.19)$$

$$N_0 < N_{cy} < N_n.$$

Условные размеры

1. Линейные.

1.1. Условная протяженность – расстояние на объекте контроля, в [мм] между двумя точками, в которых амплитуда эхо-сигнала достигает уровня фиксации (середина экрана), измеряется вдоль дефекта. Схема измерения условной протяженности приведена на рисунке 1.13.

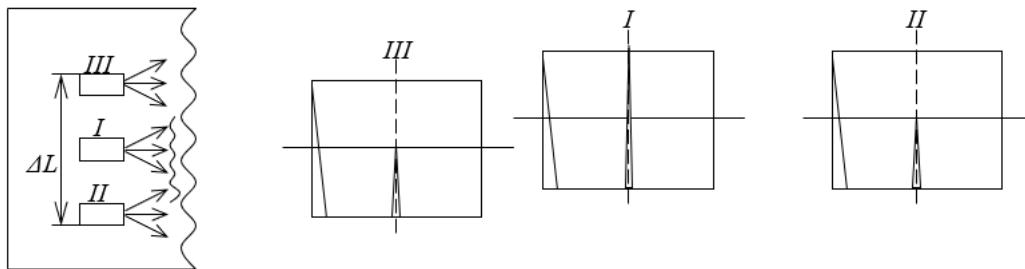


Рисунок 1.13 – Схема измерения условной протяженности (составлено автором)

1.2. Условная ширина и высота – измеряется одновременно при перемещении преобразователя поперек дефекта. Условная ширина – расстояние между двумя точками на объекте контроля, в котором амплитуда эхо-сигнала достигает уровня фиксации, а условная высота – разность показаний глубиномера в этих двух точках. Схема измерения условной ширины и высоты представлена на рисунке 1.14.

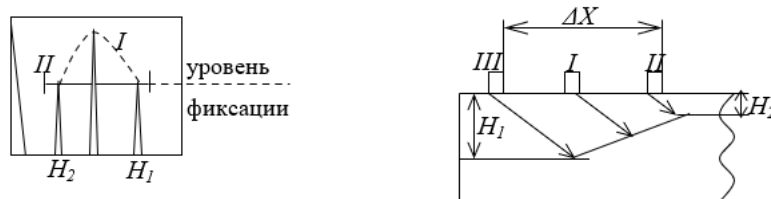


Рисунок 1.14 – Схема измерения условной ширины и высоты
(составлено автором)

2. Угловые.

2.1. Угол индикации определяется путем перемещения преобразователя по радиусу относительно дефекта и положения ПЭП с максимальной амплитудой и равен углу между положениями ПЭП, в котором амплитуда достигает уровня фиксации. Схема измерения угла индикации изображена на рисунке 1.15.

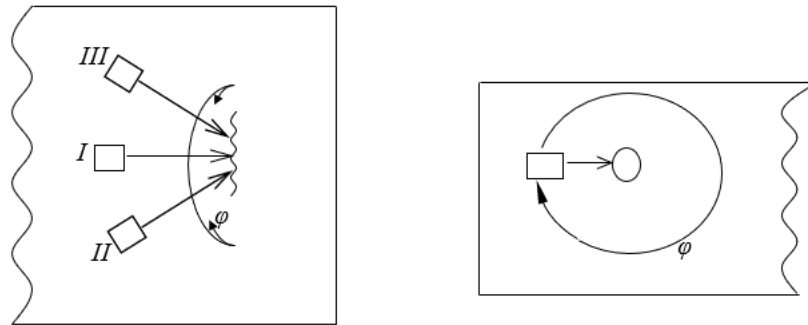


Рисунок 1.15 – Схема измерения угла индикации (составлено автором)

2.2. Азимут – соответствует углу относительно продольного перемещения ПЭП (или продольной оси объекта) и положением ПЭП дающим максимальную амплитуду сигнала. Схема измерения азимута изображена на рисунке 1.16.

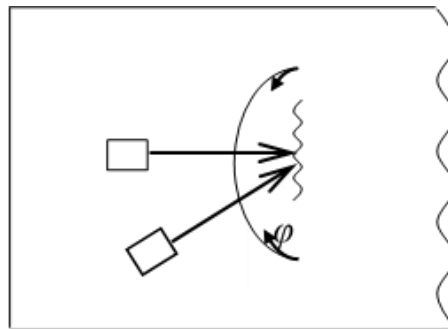


Рисунок 1.16 – Схема измерения азимута (составлено автором)

Способы определения условных размеров

1. Абсолютный способ – условные размеры определяются при постоянной фиксированной чувствительности и равно $N_{оц}$

Влияние формы и размера дефектов на амплитуду эхо-сигнала

В зависимости от размеров дефекты делятся на:

- компактные (меньше ширины ДН);
- протяженные (в одной или в двух плоскостях).

Эквивалентом отражателя для компактных служат:

1. Сфера на акустической оси по формуле (1.20):

$$\frac{A}{A_0} \cong \frac{S_A d}{4r^2 \lambda} e^{-2\delta r}; \quad (1.20)$$

2. Для дискового отражателя аналогичная зависимость приведена в формуле (1.21):

$$\frac{A}{A_0} \cong \frac{S_A S}{4r^2 \lambda^2} e^{-2\delta r}. \quad (1.21)$$

Амплитуда эхо-сигнала для компактных отражателей, лежащих на акустической оси обратно пропорциональна квадрату расстояния (1.22):

$$N \cong \frac{1}{r^2}. \quad (1.22)$$

Для отражателей, протяжённых в одной плоскости, расчёт амплитуды эхо-сигнала выполняется с учётом геометрии отражающей поверхности.

1. Для боковой цилиндрической поверхности находится по формуле (1.23):

$$\frac{A}{A_0} \cong \frac{S_A}{\lambda} \sqrt{\frac{d}{8r^3}} e^{-2\delta r}, \quad (1.23)$$

где d – диаметр цилиндра, м;

2. Для бесконечной полосы находится по формуле (1.24):

$$\frac{A}{A_0} \cong \frac{S_A l}{\sqrt{2(r\lambda)^3}} e^{-2\delta r}, \quad (1.24)$$

где l – ширина полосы, м.

Амплитуда эхо-сигнала для компактных отражателей, расположенных на акустической оси, обратно пропорциональна квадрату расстояния до отражателя (1.25):

$$N \cong \frac{1}{r^{1,5}}. \quad (1.25)$$

Для отражателей, протяжённых в двух плоскостях, амплитудные зависимости определяются типом поверхности.

1. Донная поверхность (1.26):

$$\frac{A}{A_0} \cong \frac{S_A}{2r\lambda} e^{-2\delta r}; \quad (1.26)$$

2. Выпуклая поверхность (1.27):

$$\frac{A}{A_0} \cong \sqrt{\frac{3}{2r\lambda}} e^{-2\delta r}; \quad (1.27)$$

3. Сферическая поверхность (1.28):

$$\frac{A}{A_0} \cong e^{-2\delta r}. \quad (1.28)$$

Таким образом, соотношение амплитуд эхо-сигналов для компактных отражателей составляет: $\frac{A}{A_0} \cong \frac{1}{r^2}$; для отражателей, протяжённых в одной плоскости: $\frac{A}{A_0} \cong \frac{1}{\sqrt{r^3}}$; для отражателей, протяжённых в двух плоскостях: $\frac{A}{A_0} \cong \frac{1}{r}$.

В современной научной литературе значительное внимание уделяется разработке адаптированных ультразвуковых методов контроля сварных соединений полиэтиленовых трубопроводов. Одним из наиболее развитых направлений является технология Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT). В работах F. Hagglund, M. Robson, M. J. Troughton, W. Spicer и I. R. Pinson, а также M. Troughton и F. Hagglund [55, 109] описана система PolyTest™, разработанная TWI для выездного объёмного контроля стыковых и электрофузионных соединений полиэтиленовых труб. Применение данной системы позволяет выполнять послойное сканирование зоны сварного соединения и выявлять внутренние несплошности, загрязнения, включения и дефекты сварки, которые не обнаруживаются при визуальном контроле и слабо диагностируются традиционными методами контроля.

Другим перспективным направлением является технология Guided Wave Ultrasonic Testing (GWUT), основанная на применении направляемых ультразвуковых волн, распространяющихся вдоль стенки трубопровода. В работе P. S. Lowe, H. Lais, V. Paruchuri и T.-H. Gan [76] исследована возможность применения ультразвуковых направляемых волн для контроля труб из полиэтилена высокой плотности. Авторами рассмотрены особенности возбуждения и распространения осесимметричных мод L(0,1), L(0,2) и T(0,1), а также выполнена

оценка частотного диапазона, пригодного для контроля HDPE-труб. Установлено, что для исследованных условий оптимальный диапазон частот составляет 15–25 кГц, поскольку при более высоких частотах возрастает затухание сигнала, а при более низких увеличивается «мёртвая зона», связанная с длительностью импульса. Полученные результаты подтверждают перспективность GWUT для мониторинга полиэтиленовых трубопроводов, однако указывают на необходимость учёта высокого затухания материала и ограниченной дальности контроля по сравнению с металлическими трубами [99, 120]

Отдельное направление исследований связано с применением методов искусственного интеллекта при обработке ультразвуковых сигналов и изображений неразрушающего контроля. В работе Т. Latête, В. Gauthier и Р. Belanger [69] рассмотрено применение сверточной нейронной сети для локализации, идентификации и оценки размеров дефектов по данным фазированной ультразвуковой решётки. Показано, что использование CNN позволяет автоматизировать интерпретацию данных PAUT и снизить зависимость результатов контроля от ручного выделения диагностических признаков. В исследовании Y. Shi, W. Xu, J. Zhang и X. Li [102] предложен подход к автоматической классификации ультразвуковых сигналов с использованием CNN, обрабатывающей исходные временные сигналы без предварительного ручного формирования признаков. Полученные результаты подтверждают перспективность применения методов глубокого обучения для повышения устойчивости и воспроизводимости обработки ультразвуковых данных. Дополнительно в работе Н. Wang et al. [114] показана возможность автоматизированной классификации дефектов трубопроводов по данным ультразвуковой фазированной решётки и метода полной фокусировки, что подтверждает применимость методов машинного обучения к задачам диагностики трубопроводных систем. При контроле полиэтиленовых трубопроводов существенное значение имеет обработка ультразвуковых сигналов, поскольку выраженное затухание в материале ПЭ снижает амплитуду регистрируемого сигнала и ухудшает отношение сигнал/шум [96].

Визуальные и роботизированные методы

В исследованиях, посвящённых диагностике и локализации трубопроводов, значительное внимание уделяется автоматизации обработки данных и применению роботизированных внутритрубных систем [81, 68]. В работе Y. Liu et al. [73] выполнен обзор акустических методов локализации подземных трубопроводов, включая неметаллические и пластиковые коммуникации. Авторы отмечают перспективность акустических подходов для обнаружения подземных объектов, для которых традиционные электромагнитные методы имеют ограниченную применимость. Вместе с тем указанная работа не рассматривает задачи автоматического распознавания дефектов по изображениям внутренней поверхности трубопровода.

Отдельное направление исследований связано с применением внутритрубных инспекционных устройств типа Pipe Inspection Gauge (PIG), предназначенных для обследования и обслуживания протяжённых трубопроводных систем. В работе D. Mishra et al. [80] рассмотрены основные функции PIG-систем, включая перемещение внутри трубопровода, очистку внутренней поверхности, контроль состояния стенки и выявление эксплуатационных повреждений. Развитие данного направления связано с переходом от механических внутритрубных устройств к интеллектуальным диагностическим платформам.

1.4 Анализ патентных материалов

Патентные материалы в рассматриваемой области отражают переход от экспериментальных и теоретических разработок к техническим решениям, ориентированным на практическое применение. Анализ патентов, зарегистрированных в Российской Федерации (RU), Китайской Народной Республике (CNIPA) и США (USPTO), позволяет выделить несколько основных направлений развития технологий диагностики полиэтиленовых трубопроводов.

Ультразвуковые системы

- RU 2080592 (Товарищество с ограниченной ответственностью, 1997): предложен способ диагностики трубопроводов, основанный на регистрации и

анализе акустических сигналов, возникающих при распространении волн в стенке трубопровода [13]. Техническое решение ориентировано на повышение точности выявления дефектных участков за счёт обработки характеристик отражённых сигналов и снижения влияния помех при контроле состояния трубопроводной системы.

- RU 2515957 («Общество с ограниченной ответственностью «Акустические Контрольные Системы», 2014): предложен комплекс дефектоскопии технологических трубопроводов, основанный на внутритрубной диагностике с использованием магнитных и акустических методов контроля [14]. Разработанное решение предусматривает применение диагностических модулей для выявления дефектов стенки трубопровода, а также регистрацию и обработку данных о техническом состоянии контролируемого участка.

- RU 2629896 («ИнтроСкан Технолоджи», 2017): предложен способ ультразвукового контроля трубопровода, основанный на возбуждении и регистрации акустических нормальных волн различных типов с последующей пространственно-временной обработкой сигналов [15]. Разработанная система предусматривает когерентное суммирование эхосигналов и построение дефектограмм, что позволяет повысить чувствительность обнаружения малоразмерных и слабо отражающих дефектов в стенках трубопровода.

- CN 208206874 U (Taizhou Cheng An Nondestructive Testing Co., Ltd., 2018): разработано устройство для мониторинга технического состояния трубопроводов, включающее систему ультразвуковых датчиков и модуль обработки сигналов для выявления дефектов и оценки состояния стенки трубы [17]. Предложенное решение ориентировано на повышение точности диагностики и снижение влияния внешних помех при контроле трубопроводных систем.

- US Patent 9,874,521 B2 (TWI, 2018): содержит описание системы PAUT, предназначенной для контроля сварных соединений полиэтиленовых трубопроводов [95]. В состав системы входят специализированный ультразвуковой преобразователь и алгоритмы обработки сигналов, обеспечивающие компенсацию высокого затухания ультразвуковых волн в полиэтилене.

- CN 211825846 U (Daqing Zhongdaxin Testing Engineering Service Co., Ltd., 2020): предложено устройство для диагностики дефектов полиэтиленовых трубопроводов, основанное на применении акустических и ультразвуковых методов контроля [18]. Конструкция предусматривает регистрацию отражённых сигналов и последующую обработку данных для повышения точности обнаружения повреждений и локализации дефектных участков трубопровода.

Роботизированные платформы

- US Patent 11,235,456 B2 (Eddyfi Technologies, 2022): представлена модульная роботизированная платформа, предназначенная для диагностики трубопроводов. Конструкция платформы предусматривает возможность установки различных сенсорных модулей, включая системы PAUT, RVI и лазерные сканеры, а также обеспечивает преодоление препятствий в процессе перемещения по трубопроводу [94].

Проведённый анализ патентных материалов показывает, что ведущие исследовательские организации и промышленные компании активно развивают и патентуют технологии диагностики трубопроводов. Наиболее интенсивно развиваются направления, связанные с обработкой диагностических данных и разработкой мультисенсорных робототехнических систем.

1.5 Анализ отечественного и зарубежного практического опыта

В настоящее время лидирующие позиции в области разработки и внедрения современных ультразвуковых технологий неразрушающего контроля занимают Великобритания, Германия и Нидерланды. Одним из наиболее известных решений является система PolyTest™, разработанная организацией The Welding Institute (TWI) и применяемая для контроля качества сварных соединений магистральных газопроводов. Для мониторинга технического состояния трубопроводной инфраструктуры в европейских странах также используются роботизированные комплексы VersaTrax™, внедряемые крупными энергетическими компаниями, включая E.ON и National Grid. В Нидерландах дополнительно развиваются интеллектуальные системы диагностики на основе искусственного интеллекта, к

числу которых относится платформа PipeAId™, предназначенная для автоматизированного обследования и управления канализационными сетями.

В Соединённых Штатах Америки активно развиваются технологии ультразвукового контроля на основе направленных волн (Guided Wave Ultrasonic Testing, GWUT), а также роботизированные системы диагностики трубопроводов. Компании NDT Global и PureNM предлагают коммерческие решения для обследования полиэтиленовых газопроводов, что расширяет возможности контроля неметаллических трубопроводных систем. Важную роль в развитии данных технологий играет Управление по безопасности трубопроводов и опасных материалов (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, PHMSA), поддерживающее внедрение современных методов неразрушающего контроля и финансирование пилотных проектов, направленных на повышение безопасности эксплуатации трубопроводной инфраструктуры.

Метод контроля с помощью направленных ультразвуковых волн

Метод контроля с использованием направленных ультразвуковых волн первоначально разрабатывался для выявления коррозионных повреждений под изоляцией (Corrosion Under Insulation, CUI) на трубопроводах нефтехимических предприятий. На ранних этапах данный подход был реализован в системе Focus+™ компании Teletest, а в дальнейшем получил развитие в системе Sonyks™, предназначенной для диагностики труднодоступных участков трубопроводов.

Несмотря на сравнительно недавнее появление технологии Guided Wave Testing (GWT), данный метод получил широкое распространение в области технической диагностики трубопроводов. Это обусловлено возможностью контроля значительных участков трубопровода с одной точки установки датчиков, а также высокой производительностью обследования объектов, доступ к которым затруднён.

С момента внедрения технологии в 1990-х годах методы GWT были существенно усовершенствованы. Первоначально использовались преимущественно продольные моды волн, однако позднее были внедрены крутильные моды, обладающие более универсальными характеристиками. Вместе

с тем длительное время оценка дефектов основывалась главным образом на анализе амплитуды отражённого сигнала, что ограничивало возможности достоверного определения характера повреждений.

Использование только амплитудных характеристик сигнала не позволяет в полной мере оценить геометрию дефекта и его пространственные параметры. Одинаковый уровень амплитуды может соответствовать дефектам различной формы и глубины, включая как протяжённые поверхностные повреждения, так и локальные глубокие дефекты, представляющие более высокую опасность для целостности трубопровода. Амплитудные отклики трёх дефектов с одинаковой потерей 5 % площади поперечного сечения, но различной геометрией, представлены на рисунке 1.17.

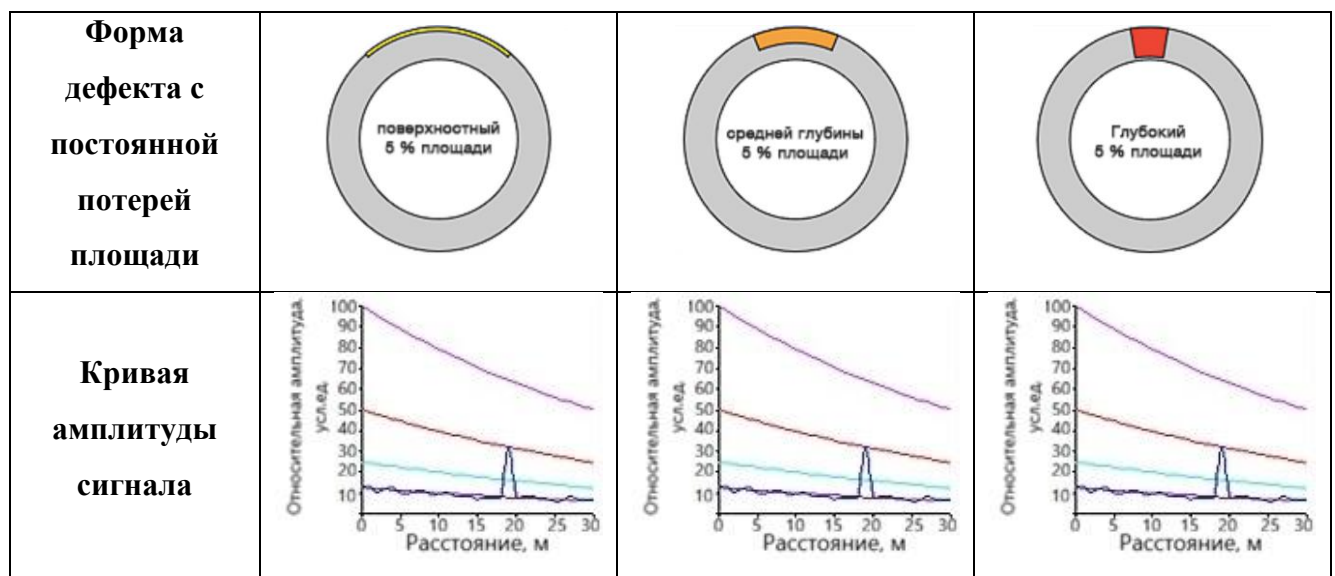


Рисунок 1.17 – Амплитудный отклик трёх дефектов с одинаковой потерей 5% площади поперечного сечения, но разной геометрией [1]

Революционным шагом в развитии GWT стало внедрение технологии фокусировки. Система контроля трубопровода Sonyks™ от Eddyfi Technologies представляет собой единственное на рынке решение, обеспечивающее фокусировку в реальном времени. В отличие от предыдущих методов, требующих вторичного сбора данных, Sonyks собирает информацию революционным способом, используя комбинацию полного матричного захвата (FMC) и широкополосного доступа, что позволяет извлекать данные фокусировки непосредственно из первично собранных данных.

Фокус-тесты используют огибающие (флексурные) волны вместо осесимметричных, применяемых при стандартном сборе данных. Инструмент работает как датчик с фазированной решёткой, активируя определённые сегменты для создания волн изгиба, которые конструктивно интерферируют в месте дефекта. Данные собираются в восьми точках по окружности трубы, что позволяет получить информацию об угловом распределении дефекта.

Sonyks – единственная система GWT, в которой преимущества фокусировки доступны в реальном времени. Более того, это единственное оборудование, которое собирает данные НК таким образом, что информацию о фокусировке можно извлечь постфактум, что имеет огромные преимущества при анализе и подтверждении результатов. Пример отображения фокусных А-сканов и полярного графика в системе Sonyks представлен на рисунке 1.18.

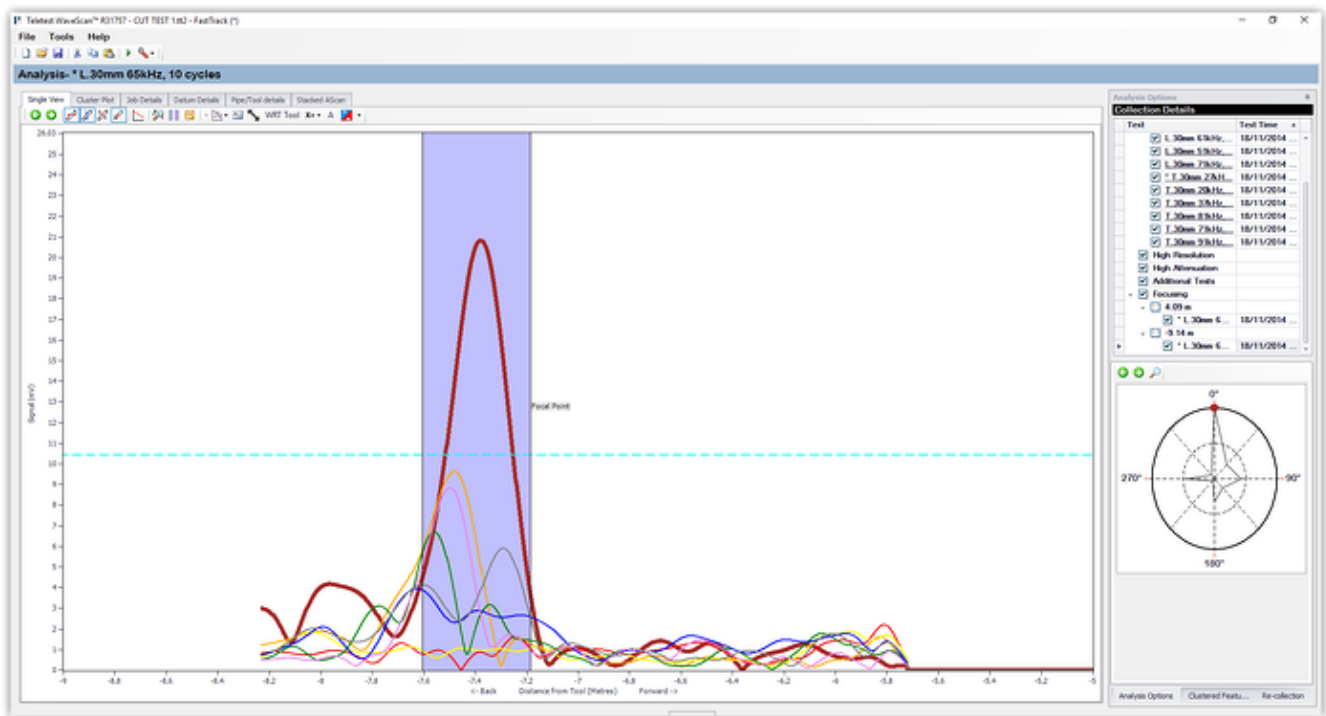


Рисунок 1.18 - Отображение фокусных А-сканов и полярного графика в системе Sonyks™ [1]

После получения информации об амплитуде и фокусировке можно провести более точную оценку дефекта. Классификация полярных графиков выполняется по направленности (Dir) 1, 2 или 3, что соответствует степени локализации дефекта. Комбинированная оценка, полученная умножением оценки амплитуды на оценку

направленности, позволяет определить приоритет последующих действий – высокий, средний или низкий.

Например, сигналы с низкой амплитудой, но высокой направленностью (локализованные дефекты) могут быть переклассифицированы как высокоприоритетные, поскольку представляют большую опасность, чем распределённые дефекты с той же амплитудой.

1.6 Метод акустической эмиссии для контроля трубопроводов

Акустико-эмиссионный метод (АЭ) применяется при обследовании различных объектов трубопроводного транспорта, в том числе технологических и магистральных трубопроводов, газопроводов, нефтепроводов, а также линий транспортировки пара и горячей воды. По характеру контроля он относится к интегральным методам неразрушающей диагностики, поскольку даёт возможность оценивать состояние протяжённых участков трубопровода без последовательного сканирования всей поверхности. Контроль может выполняться как на открыто проложенных трубопроводах, так и на объектах с изоляционным покрытием либо подземным размещением. Это отличает акустико-эмиссионный контроль от локальных методов дефектоскопии, для которых, как правило, требуется непосредственное обследование отдельных зон поверхности конструкции.

Принцип метода основан на регистрации упругих волн напряжений, возникающих в материале трубопровода при локальных структурных изменениях. Источниками акустической эмиссии являются процессы, сопровождающиеся перераспределением внутренних напряжений и нарушением структуры материала, включая пластическую деформацию, развитие трещин, движение дислокаций, разрушение межкусталлических связей и иные механизмы деградации. Возникновение акустико-эмиссионных сигналов связано с локальным высвобождением энергии в материале, что позволяет фиксировать активные процессы разрушения на ранних стадиях их развития.

Метод акустической эмиссии позволяет получать информацию не только о наличии дефектов, но и о степени их активности. Это является одним из основных преимуществ метода по сравнению с рядом традиционных способов

неразрушающего контроля, регистрирующих преимущественно уже сформировавшиеся повреждения. АЭ-контроль широко используется при техническом диагностировании опасных производственных объектов, находящихся под надзором Ростехнадзора, в том числе при проведении технического освидетельствования, экспертизы промышленной безопасности и оценки остаточного ресурса трубопроводных систем.

Проведение акустико-эмиссионного контроля возможно как непосредственно в процессе эксплуатации трубопровода, так и при выполнении гидравлических или пневматических испытаний. Контроль осуществляется в сроки, определяемые требованиями отраслевых нормативных документов, проектной документацией, условиями эксплуатации оборудования либо по результатам аварийных ситуаций и внеплановых обследований. Вопросы оценки технического состояния газопроводов, включая анализ опасных эксплуатационных ситуаций, бокового оголения и изменения напряжённо-деформированного состояния трубопроводов, рассматриваются в ряде отечественных исследований [19, 4, 5]. В ряде случаев текущие рабочие нагрузки трубопровода оказываются достаточными для регистрации акустико-эмиссионной активности без создания дополнительных нагрузочных воздействий.

Локальные изменения структуры материала трубопровода и последующее развитие разрушения могут быть обусловлены различными эксплуатационными и технологическими факторами. К наиболее значимым из них относятся:

- развитие дефектов технологического и монтажного происхождения, сопровождающееся образованием зон концентрации напряжений;
- значительные пластические деформации, а также хрупко-пластическое разрушение материала;
- внешние механические воздействия и смещения грунтового массива;
- коррозионное поражение материала, включая межкристаллитную коррозию;
- действие температурных, статических и динамических нагрузок.

Акустико-эмиссионный метод отличается высокой чувствительностью к локализованным процессам разрушения указанного типа. Регистрируемые АЭ-сигналы могут формироваться вследствие фазовых превращений и перехода материала в пластическое состояние, зарождения и развития трещин, расслоений, непроваров, прожогов, пор, кратеров, свищей и иных дефектов сварных соединений и основного металла. Дополнительными источниками сигналов являются трение поверхностей раскрывающихся трещин, разрушение коррозионных продуктов в их полостях, утечки рабочей среды через сквозные повреждения, фланцевые соединения, арматуру и заглушки, разрушение шлаковых включений, а также процессы коррозионного растрескивания и электрохимической деградации материала [79, 49].

Распространение акустико-эмиссионного контроля обусловлено также его применимостью в сочетании с другими методами неразрушающей диагностики. АЭ-контроль позволяет фиксировать дефекты, выявление которых затруднено при использовании радиографического, ультразвукового или магнитного контроля. По данным отдельных исследований, данный метод способен регистрировать трещины с раскрытием порядка 0,2 мм. Кроме того, акустико-эмиссионная диагностика позволяет определить зоны повышенной дефектной активности, которые в дальнейшем могут быть обследованы другими физическими методами контроля. Для технологических и магистральных трубопроводов существенным преимуществом метода является возможность проведения контроля без вывода объекта из эксплуатации. Во многих случаях параметры рабочего режима трубопровода оказываются достаточными для формирования акустико-эмиссионных сигналов, необходимых для диагностики. Это позволяет выполнять обследование без остановки технологического процесса и без снижения эксплуатационной нагрузки.

Дополнительным преимуществом метода являются сравнительно невысокие требования к подготовке поверхности объекта контроля. При проведении АЭ-контроля подготовка требуется только в зонах установки преобразователей акустической эмиссии. Для подземных трубопроводов отсутствует необходимость

полного вскрытия трассы – достаточно подготовки отдельных шурфов в местах размещения датчиков. Метод допускает проведение обследования трубопроводов, расположенных под изоляцией, в технологических каналах, в обмуровке, на значительной высоте либо вблизи строительных конструкций и других препятствий. В зависимости от толщины стенки трубопровода, марки материала и характеристик применяемой аппаратуры метод акустической эмиссии позволяет контролировать участки значительной протяжённости (до 100 м). При этом преобразователи остаются неподвижными в течение всего процесса диагностики, а необходимость механического сканирования поверхности отсутствует. Благодаря этому шероховатость и волнистость поверхности оказывают существенно меньшее влияние на результаты контроля по сравнению с традиционной ультразвуковой дефектоскопией.

Метод акустической эмиссии характеризуется высокой чувствительностью к развивающимся дефектам и позволяет обнаруживать повреждения на ранних стадиях их формирования. В производственных условиях возможно выявление приращений трещин величиной в доли миллиметра. Предельную чувствительность акустико-эмиссионной аппаратуры, по теоретическим расчётам, оценивают и вовсе в $1 \times 0,000001$ кв. мм, что эквивалентно скачку трещины протяжённостью всего 1 мкм на тот же 1 мкм. При этом выявляемость дефектов практически не зависит от пространственной ориентации объекта контроля, что является существенным преимуществом по сравнению с магнитопорошковыми методами диагностики.

Важной особенностью метода является возможность организации непрерывного мониторинга технического состояния трубопроводов. Регистрация акустико-эмиссионной активности в режиме реального времени позволяет оперативно фиксировать появление активных концентраторов напряжений и своевременно принимать решения о снижении нагрузки или прекращении испытаний при угрозе разрушения конструкции. Аналогичный подход используется при эксплуатации опасных производственных объектов, где требуется непрерывное наблюдение за развитием повреждений.

С точки зрения безопасности персонала метод акустической эмиссии также обладает рядом преимуществ. При проведении контроля отсутствует ионизирующее излучение, характерное для радиографических методов. Операторы могут размещаться на удалении от объекта контроля – в стационарных помещениях либо передвижных диагностических лабораториях.

В течение длительного времени основным нормативным документом в области акустико-эмиссионного контроля являлись «Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов» ПБ 03-593-03. С 1 января 2021 года действие данного документа было прекращено в соответствии с Постановлением Правительства РФ №1192 от 06.08.2020. Несмотря на это, отдельные положения документа продолжают использоваться рядом лабораторий в качестве методической основы при проведении работ. В практической деятельности также применяются зарубежные стандарты ASTM E 1419, ASTM E 1930 и другие нормативные документы.

Акустико-эмиссионный контроль выполняется аттестованными лабораториями и специалистами I, II и III уровня квалификации. В большинстве случаев проведение работ осуществляется бригадой не менее чем из двух специалистов, один из которых должен иметь II или III квалификационный уровень. По состоянию на декабрь 2022 года, аттестация специалистов АЭ чаще всего проводится по СДАНК-02-2020 «Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля» либо по СНК ОПО РОНКТД-02-2021 «Система неразрушающего контроля на опасных производственных объектах. Аттестация специалистов неразрушающего контроля». Первый документ действует в рамках Единой системы оценки соответствия в области промышленной безопасности, экологической безопасности, безопасности в энергетике и строительстве с координирующим органом НТЦ «Промышленная безопасность. Второй документ относится к Системе неразрушающего контроля на опасных производственных объектах, созданной под эгидой Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД) и СРО «Ассоциация «НАКС».

Конкретные требования к квалификации специалистов определяются условиями договора и требованиями заказчика работ по неразрушающему контролю.

1.7 Проблемы применения метода акустической эмиссии по выявлению дефектов трубопроводов

Несмотря на существенные преимущества метода акустической эмиссии, его применение связано с рядом технических и методических ограничений.

Одним из основных условий проведения акустико-эмиссионного контроля является необходимость нагружения объекта для формирования напряжённого состояния, при котором возникают регистрируемые сигналы АЭ. Для магистральных трубопроводов большого диаметра создание требуемого уровня нагрузки может сопровождаться значительными организационными и экономическими затратами.

Серьёзным ограничением акустико-эмиссионного метода является его чувствительность к помехам. Регистрируемые АЭ-сигналы имеют импульсный и во многом случайный характер, поэтому по своим параметрам могут частично совпадать с эксплуатационными шумами и внешними акустическими воздействиями. На начальных стадиях развития дефектов амплитуда таких сигналов часто невелика, что затрудняет их уверенное выделение из общего шумового фона. По мере роста повреждения интенсивность акустико-эмиссионной активности обычно увеличивается, однако ранняя диагностика требует применения высокочувствительной измерительной аппаратуры и специальных алгоритмов фильтрации, распознавания и обработки сигналов.

Дополнительную сложность представляет отсутствие универсальных практических критериев для выбора расстояния между преобразователями акустической эмиссии. Данный параметр определяется совокупностью факторов, включая скорость распространения упругих волн, коэффициент затухания, структуру материала, диаметр трубопровода, наличие изоляционного покрытия и характеристики используемой аппаратуры. В зависимости от условий контроля расстояние устойчивого приёма сигналов может составлять от 45–60 м до 80–100 м при благоприятных условиях распространения волн.

Метод акустической эмиссии характеризуется высокой зависимостью результатов контроля от квалификации специалистов. В настоящее время отсутствуют единые количественные критерии оценки степени опасности выявляемых повреждений. Нормативно-техническая документация содержит преимущественно общие рекомендации, вследствие чего для каждого объекта контроля разрабатывается индивидуальная методика проведения обследования. Несмотря на широкое применение современных программных комплексов автоматизированной обработки данных, ключевую роль при настройке аппаратуры и интерпретации акустико-эмиссионных сигналов продолжает играть опыт специалиста.

Существенным ограничением метода является необходимость применения дополнительных видов неразрушающего контроля для получения полной информации о параметрах дефекта. Акустико-эмиссионный метод эффективно выявляет активные дефекты, развивающиеся под нагрузкой, однако не обеспечивает точного определения геометрических размеров повреждений и остаточной толщины стенки трубопровода. По этой причине результаты АЭ-контроля, как правило, дополняются данными визуально-измерительного контроля (ВИК), ультразвукового контроля (УЗК), радиографического контроля (РК), капиллярного контроля (ПВК), магнитного контроля (МК) и других методов дефектоскопии.

В то же время акустико-эмиссионный метод даёт возможность оценивать активность локальных процессов разрушения и рациональнее планировать последующие диагностические мероприятия. Если по результатам АЭ-контроля определены зоны повышенной акустико-эмиссионной активности, дальнейшее обследование можно выполнять не по всей поверхности трубопровода, а преимущественно на этих участках. В практической диагностике используется и обратная схема: дефекты, предварительно обнаруженные другими методами неразрушающего контроля, дополнительно исследуются с применением акустической эмиссии для уточнения степени их опасности и обоснования решения о дальнейшей эксплуатации объекта.

В настоящее время метод акустической эмиссии наиболее широко применяется для диагностики стальных технологических и магистральных трубопроводов. Использование данного подхода для полиэтиленовых трубопроводных систем ограничено особенностями распространения упругих волн в полимерных материалах и требует дальнейшего развития специализированных методов обработки и интерпретации сигналов.

Китай в последние годы демонстрирует активное развитие технологий диагностики трубопроводов с использованием искусственного интеллекта и робототехнических систем. Крупные энергетические компании, включая Sinopec и PetroChina, внедряют методы машинного зрения, лазерного сканирования и интеллектуальной обработки данных для обследования протяжённых трубопроводных сетей. Применение подобных технологий позволяет повысить точность обнаружения дефектов и организовать мониторинг технического состояния инфраструктуры на объектах большой протяжённости и сложной пространственной конфигурации.

1.8 Отечественный опыт обнаружения дефектов в полиэтиленовых трубопроводах

Отечественный опыт в области неразрушающего контроля (НК) полимерных трубопроводов, в частности полиэтиленовых (ПЭ), находится на стадии активного формирования, однако по уровню технологической зрелости и масштабам внедрения пока уступает передовым практикам, реализуемым в ведущих странах мира.

В российской практике контроля качества и технического состояния ПЭ-трубопроводов по-прежнему доминируют традиционные методы, такие как визуальный осмотр сварных соединений и гидравлические испытания на прочность и герметичность. Эти подходы регламентируются действующими нормативными документами, включая СП 42-101-2003 «Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических и полиэтиленовых труб» и ГОСТ Р 55017-2012 «Трубы из полиэтилена для газоснабжения. Технические условия». Применение современных методов НРК – в частности,

ультразвукового контроля (УЗК), термографии, машинного зрения и роботизированных инспекционных систем – в отношении ПЭ-трубопроводов в России остается крайне ограниченным и носит, как правило, экспериментальный или пилотный характер.

Ведущие научные и образовательные учреждения страны – включая НИИ «Графит», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана) и Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ) – осуществляют фундаментальные и прикладные исследования в области разработки новых методов НК для полимерных материалов. Основное внимание уделяется адаптации ультразвуковых методов, оптической когерентной томографии, лазерной триангуляции и алгоритмов компьютерного зрения для диагностики дефектов в ПЭ-соединениях. Тем не менее, значительная часть полученных результатов остаётся на уровне лабораторных прототипов и не проходит полного цикла технологической трансформации – от опытно-конструкторских работ до серийного производства и промышленного внедрения.

Ключевыми факторами, сдерживающими широкое применение инновационных методов НК в России, являются:

1. Отсутствие стандартизированной методологической базы для оценки пригодности и достоверности новых методов контроля применительно к ПЭ-материалам, что затрудняет их легитимацию в рамках действующей нормативно-технической документации.

2. Высокая зависимость от импортного оборудования, обусловленная недостаточным развитием отечественного приборостроения в сегменте высокотехнологичных систем НК, что влечёт за собой значительные капитальные и эксплуатационные затраты.

3. Дефицит квалифицированных кадров, обладающих междисциплинарной компетенцией в области материаловедения полимеров, физических методов контроля и цифровых технологий.

4. Консервативный характер нормативного регулирования, которое в ряде случаев не предусматривает гибких механизмов для интеграции инновационных решений, не имеющих аналогов в утверждённых стандартах.

1.9 Выводы по главе 1

Анализ современного состояния и перспектив развития методов обнаружения и локализации повреждений в подземных полиэтиленовых (ПЭ) трубопроводах на примере Китая и России позволяет сделать следующие ключевые выводы:

1. Фундаментальные физические ограничения полиэтилена как диэлектрического и вязкоупругого материала делают традиционные методы неразрушающего контроля, разработанные для металлических конструкций, неприменимыми или малоэффективными. Отсутствие электропроводности и магнитных свойств исключает использование электромагнитных и магнитных методов (MFL, ECT), а высокое затухание ультразвуковых волн в ПЭ ограничивает глубину и разрешающую способность стандартных УЗ-подходов.

2. Международный опыт (Европа, США, Китай) демонстрирует переход к комплексным, мультисенсорным и цифровым решениям. Ведущие страны активно внедряют адаптированные ультразвуковые технологии (PAUT, GWUT), роботизированные инспекционные платформы и системы на основе искусственного интеллекта (машинное зрение, CNN, вейвлет-анализ). Эти подходы позволяют не только локализовать трассу трубопровода, но и выявлять микродефекты, оценивать целостность сварных соединений и прогнозировать ресурс эксплуатации.

3. Китай демонстрирует стремительный технологический рост, обеспечиваемый государственной поддержкой, масштабными инвестициями в ИИ и робототехнику, а также интеграцией собственных разработок в практику крупных энергетических компаний (Sinopec, PetroChina). Акцент делается на локализацию и цифровизацию решений, что способствует быстрому переходу от научных исследований к промышленному внедрению.

4. Отечественный опыт в России остаётся на ранней стадии развития. Несмотря на наличие сильной научной базы (НИИ «Графит», МГТУ им. Н.Э. Баумана, СПбПУ) и перспективные лабораторные разработки в области УЗК, оптической диагностики и компьютерного зрения, их трансляция в практическое применение сдерживается рядом системных барьеров: отсутствием стандартизации новых методов НК для ПЭ-труб, зависимостью от импортного оборудования, дефицитом квалифицированных специалистов и консервативностью нормативно-технической базы.

5. Перспективные направления развития включают:

- разработку и утверждение национальных стандартов и методических рекомендаций по применению современных методов НК к ПЭ-трубопроводам;
- создание отечественных мультисенсорных роботизированных платформ с элементами ИИ;
- развитие методов линейной, нелинейной акустики и низкочастотного GWUT, адаптированных к вязкоупругим свойствам полиэтилена;
- стимулирование кооперации между наукой, промышленностью и регуляторными органами для ускорения технологического трансфера.

Таким образом, для обеспечения надёжности, безопасности и долговечности газораспределительных сетей в России необходимо системное обновление подходов к диагностике ПЭ-трубопроводов с ориентацией на передовые международные практики, адаптированные к отечественным условиям и нормативным реалиям. Это позволит не только сократить технологическое отставание, но и сформировать основу для импортонезависимой инфраструктурной диагностики.

По результатам проведенного анализа сформулированы задачи диссертационной работы:

1. Провести анализ научной литературы, патентных материалов, а также отечественного и зарубежного опыта в области обнаружения, локализации и количественной оценки повреждений подземных полиэтиленовых трубопроводов.

2. Изучить существующие методы и технологии поиска, мониторинга и диагностики технического состояния подземных распределительных газопроводов из полиэтилена.

3. Установить функциональную зависимость, описывающую влияние линейно-направленных волн на характеристики поврежденного участка трубопровода, включая амплитудно-частотные и временные параметры отраженных и прошедших сигналов.

4. Экспериментально и теоретически обосновать применимость разработанного метода ранней оценки повреждений полиэтиленовых труб на основе анализа линейно-направленных волн в условиях, приближенных к реальным эксплуатационным параметрам.

5. Разработать программный модуль для ЭВМ, реализующий предложенный метод ранней диагностики повреждений, и сформулировать методические рекомендации по его практическому применению в системах технического мониторинга газораспределительных сетей.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ НА РАННЕЙ СТАДИИ

2.1 Метод детектирования дефектов полиэтиленовых труб на основе линейно-направленных волн

Методы детектирования дефектов в полиэтиленовых (ПЭ) трубах охватывают широкий спектр физических и вычислительных подходов, включая ультразвуковую диагностику, микроволновые резонансные методы, терагерцовую спектроскопию, а также современные алгоритмы обработки сигналов и глубокого машинного обучения. Среди ультразвуковых технологий наибольшее распространение получили методы фазированных антенных решёток (Phased Array Ultrasonic Testing, PAUT) и анализ направляемых (линейных) упругих волн, позволяющие не только выявлять наличие дефектов, но и классифицировать их тип и геометрические характеристики. Микроволновые резонаторы обеспечивают детекцию повреждений за счёт регистрации изменений резонансной частоты и добротности сигнала, обусловленных локальными нарушениями структуры материала [11]. Терагерцовая спектроскопия, в свою очередь, демонстрирует потенциал для выявления дефектов в диэлектрических материалах с высоким коэффициентом поглощения терагерцового излучения, таких как полиэтилен. Современные методы обработки сигналов в сочетании с архитектурами глубокого обучения (например, свёрточными нейронными сетями) позволяют автоматизировать анализ акустических ультразвуковых данных, повышая точность и надёжность классификации дефектов. Совокупность этих подходов формирует многоуровневую, высокоточную диагностическую парадигму, обладающую значительным потенциалом для практического применения в условиях реальных эксплуатационных объектов [11].

В этих условиях проведение исследований, направленных на разработку методов ранней оценки повреждений ПЭ-труб на основе анализа линейных направляемых упругих волн, представляет собой научно и практически обоснованную необходимость. Полиэтиленовые трубопроводы широко применяются в критически важных инфраструктурных системах – включая

подземные сети водоснабжения, газораспределения и канализации, – где обеспечение их целостности напрямую связано с безопасностью населения, экологической устойчивостью и надёжностью функционирования городской инфраструктуры. Раннее выявление микродефектов, деградации материала или нарушений в зонах сварных соединений позволяет предотвратить аварийные ситуации, минимизировать экономические потери и продлить срок службы трубопроводных систем.

Разработка метода ранней оценки повреждений на основе линейных направленных волн позволит оперативно выявлять и классифицировать дефекты, предотвращая возможные аварии и улучшая общую надёжность инфраструктуры. Такой метод имеет потенциал улучшить технические возможности диагностики, снизить операционные риски и сократить затраты на ремонт и замену поврежденных труб.

Методология, используемая в данном исследовании, базируется на математическом моделировании процесса детектирования дефектов полиэтиленовых труб с последующей апробацией разработанного математического аппарата в цифро-программной среде *Simulation* ПО *Solidworks* [59, 60]. Все акустические эффекты при движении звуковых (в т. ч. ультразвукового спектра) волн в сплошной среде (в данном случае в толще стены полиэтиленовой трубы) описываются волновым уравнением (2.1) [77]:

$$\frac{\partial^2 U}{dt^2} = \frac{1}{c^2} \nabla^2 U = 0, \quad (2.1)$$

где U – функция, описывающая колебания среды, которая может быть применена для математического описания широкого спектра динамически изменяемых физических величин, характерных для соответствующей сплошной среды (электротехнические параметры, давление, плотность, скорость, смещение, прочее);

t – период времени, в течении которого производится операция по детектированию нарушения сплошности среды, с;

c – скорость движения акустической волны в сплошной среде, с/м;

∇ – лапласиан (оператор Лапласа – дифференциальный оператор, действующий в линейном пространстве гладких функций), м^2 .

Для определения несплошности с помощью звуко-акустического поля ультразвукового спектра целесообразно для функции U использовать параметр смещения среды, в которой движутся ультразвуковые волны от точки равновесия [31, 98, 62]. При этом волновое уравнение (2.1) можно записать в виде (2.2):

$$\rho \frac{\partial^2 U}{dt^2} + \eta \frac{\partial U}{dt} + E \nabla^2 U = 0, \quad (2.2)$$

где ρ – параметр плотности сплошной среды, в которой движутся волны ультразвукового спектра, кг/м^3 ;

U – функция, описывающая динамику смещения точки описанной сплошной среды, м ;

η – параметр динамической вязкости описанной сплошной среды, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$;

E – модуль Юнга описанной сплошной среды, Па .

Параметры и функции, описанные в адаптированном волновом уравнении (2.2) связаны следующими параметрами, как скорость движения звуко-акустических волн ультразвукового спектра (в толще стенки полиэтиленовой трубы) (2.3):

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.3)$$

параметр кинематической вязкости описанной сплошной среды по формуле (2.4):

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.4)$$

Формирование структуры объекта определяется его граничными условиями, в то время как воздействия извне характеризуются как начальными, так и граничными условиями. Свойства тела описываются конкретными значениями плотности, динамической вязкости и модуля упругости. При этом дефекты в материале могут быть представлены областями, в которых характеристики значительно отклоняются от нормальных значений сплошности описанной среды [43, 53].

Исследование базируется на использовании модели эхо-метода, который представляет собой метод, основанный на анализе отраженных звуковых волн (направленных ультразвуковых волн) от дефектов в материале. В контексте дефектов полиэтиленовых труб, эхо-метод позволяет обнаруживать и оценивать наличие и характер дефектов, таких как трещины, неравномерности стенки и другие аномалии. Процесс включает в себя направление ультразвуковой волны в материал и регистрацию отраженных импульсов от поверхности дефектов. Анализ времени задержки между отправленным импульсом и полученным эхо-сигналом позволяет определить расстояние до дефекта, а его амплитуда и форма помогают классифицировать тип дефекта. Преимуществом данного метода является его относительная простота и возможность обнаружения дефектов на различных глубинах, в том числе на поверхности и внутри материала. Однако эффективность метода может зависеть от различных факторов, таких как тип дефекта, свойства материала и геометрия объекта. Исследование модели эхо-метода локации дефектов в полиэтиленовых трубах направлено на определение его применимости и эффективности в данном контексте [42, 78]. Применение решения волнового уравнения позволяет моделировать переход акустической волны через среду, её взаимодействие с дефектом и формирование сигнала, который возникает в точке приёма при регистрации отраженного сигнала.

Учитывая небольшое затухание звуковой волны в стенке полиэтиленового трубопровода [22], что можно считать допустимым, то применяется методика решения волнового уравнения для моделирования распространения направленных ультразвуковых волн [70, 72] (2.5):

$$\frac{\partial^2 U}{dt^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right), \quad (2.5)$$

где U – измеряемая флуктуация (смещение) точки в стенке полиэтиленовой трубы при прохождении направленной ультразвуковой волны, м;

t – период измерений, с;

x, y, z – координаты моделируемого пространства, выделенного в толще полиэтиленового трубопровода, м;

c – скорость затухания направленных ультразвуковых волн в толще материала полиэтиленового трубопровода, м/с.

Источник ультразвуковых направленных волн (R) описывается условием (2.6):

$$R \Rightarrow \begin{cases} \pm x_R; \\ \pm y_R; \\ z_R = 0. \end{cases} \quad (2.6)$$

Для описанного источника задаются начальные флуктуации (смещение), которые представляют собой синусоидальный импульс, описываемый выражением (2.7):

$$U_0 = \frac{P}{\omega E} \sin(\omega t) \Rightarrow 0 < t < \tau, \quad (2.7)$$

где P – мощность синусоидального импульса начальных (нулевых) флуктуаций, Вт/м²;

τ – период синусоиды импульса начальных смещений, с;

ω – угловая частота колебаний линейно направленных ультразвуковых волн, с⁻¹.

Граничные условия задаются ограничением толщины стенки моделируемого полиэтиленового трубопровода (2.8):

$$\frac{\partial U}{\partial z} = 0. \quad (2.8)$$

Также граничные условия описывают ограниченность численного решения волнового уравнения (2.5) в плоскости стенок моделируемого полиэтиленового трубопровода, что при применении линейной интерполяции по условию $x = \pm x_{\max}, y = \pm y_{\max}$, приобретает вид (2.9):

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = 0, \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0. \quad (2.9)$$

Таким образом, дефекты и несплошности материала полиэтиленовых труб фиксируются как зоны с нулевой скоростью распространения ультразвуковых линейно направленных волн – $c=0$.

При программной реализации моделирования детектирования дефектов полиэтиленовых трубопроводов используется численное решение волнового уравнения распространения линейно направленных ультразвуковых волн (2.5)-(2.9) преобразуется в виде уравнения (2.10):

$$W = \frac{E}{\rho h^2} \left(U_{i+1,j,k} + U_{i-1,j,k} + U_{i+1,j-1,k} + U_{i,j+1,k} + \right. \\ \left. + U_{i,j,k+1} + U_{i-j,k-1} - 6U_{i,j,k} \right);$$

$$V = V + W \Delta t;$$

$$U = U + V \Delta t;$$
(2.10)

где W , V , U – конечно-разностные операторы численного решения волнового уравнения (2.5);

$h = 0,001s$ – шаг сетки модели по толщине стенки полиэтиленового трубопровода s ;

Δt – шаг времени моделирования, который описывается выражениями:

$$\Delta t < h \sqrt{\frac{\rho}{E}}, \Delta t < \frac{1}{\omega}. \quad (2.11)$$

Общее время моделирования системы детектирования дефектов полиэтиленовой трубы определяется как время прохождения волны от источника линейно направленных ультразвуковых волн до нижней поверхности стенки трубопровода $t_0 = \frac{s}{c}$ и рефлексивной волны от нижней поверхности стенки трубопровода до детектора – $2t_0$ [107].

Объект моделирования – участок полиэтиленового трубопровода $L=250$ мм $\varnothing 40 \times 5,5$ PE80 SDR 7,4 S 3,2 P=16 bar (ISO 4427-1:2019, 2019), которые моделируется в цифровой среде ПО *Solidworks* (Рисунок 2.1).

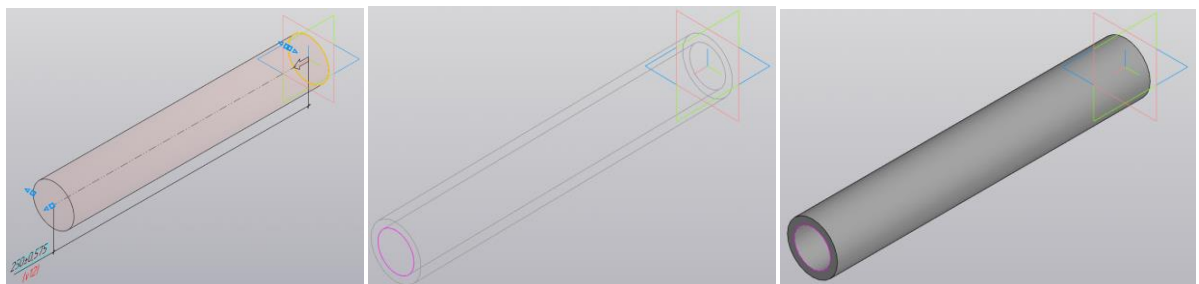


Рисунок 2.1 – Модель участка полиэтиленового трубопровода $L=250$ мм $\varnothing 40 \times 5,5$ PE80 SDR 7,4 S 3,2 P=16 bar (ISO 4427-1:2019, 2019), выполненного в программной среде ПО *Solidworks* (составлено автором)

Сформированная модель передаётся в подпрограммный модуль *Simulation* ПО *Solidworks*, где далее производится моделирование распространения линейно направленных ультразвуковых волн с обнаружением дефектов [22]. В качестве

дефектов моделируемого участка полиэтиленового трубопровода принимаются следующие повреждения на ранних этапах развития: круглое отверстие, продольная и поперечная трещина. Результаты моделирования представлены в соответствующем разделе настоящего исследования.

В соответствии с предложенной методикой исследований для сформированной модели (рисунок 2.1) в программно-цифровой среде *Simulation* ПО *Solidworks* выполняются соответствующие предложения для максимального приближения эксперимента к реальным условиям.

Шаги исследования следующие:

1. Задается внутреннее давление в соответствии со спецификацией на трубопровод $\varnothing 40 \times 5,5$ PE80 SDR 7,4 S 3,2 – P=16 bar (ISO 4427-1:2019, 2019).
2. Моделируется закрепление участка трубопровода с двух концов.
3. Моделируется упругое закрепление участка трубопровода, которое представляется как трассировка трубопровода на опорах или на основания линии прокладки.
4. Формируется конечно-элементная модель полиэтиленового трубопровода из 10-узловых тетраэдров (Рисунок 2.2).

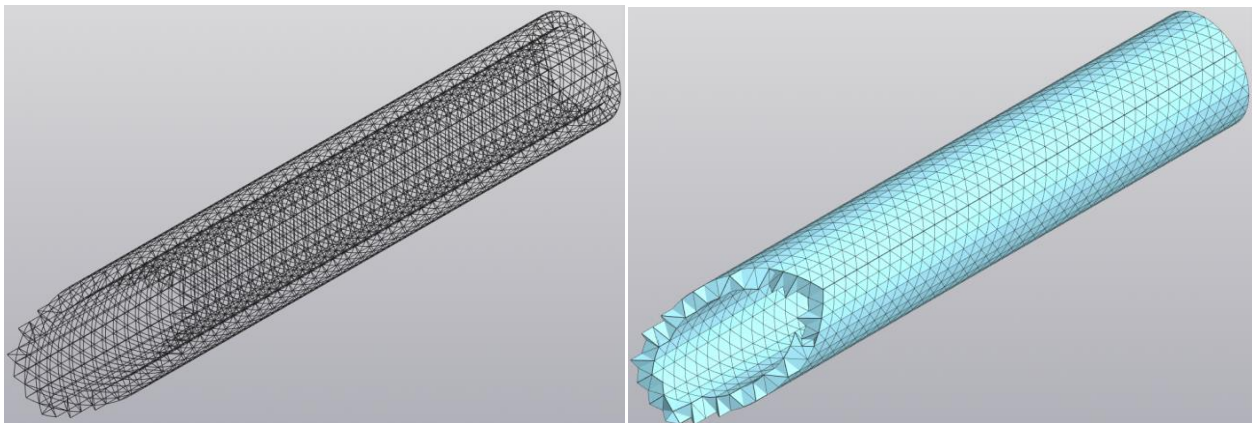


Рисунок 2.2 – Визуализация конечных элементов модели трубопровода
(составлено автором)

5. Далее, используя модуль *Simulation* ПО *Solidworks* выполняется моделирование распространения линейно направленных ультразвуковых волн.

6. По результатам моделирования анализируются данные детектирования различных дефектов полиэтиленовых труб методом рефлексных ультразвуковых линейно направленных волн.

Предложенная методика совместного математического и программного моделирования позволяет получить адекватную оценку эффективности применения используемого метода детекции и раннего выявления дефектов полиэтиленовых трубопроводов с использованием рефлексных линейно направленных ультразвуковых волн.

2.2 Оценка демпфирующих свойств ПЭ трубы

В соответствии с разработанной методикой автором выполнено численное моделирование процесса распространения ультразвуковых волн в стенке полиэтиленового трубопровода с использованием программного комплекса SolidWorks. Для проведения расчётов была построена конечно-элементная модель участка ПЭ-трубопровода, позволяющая исследовать особенности распространения линейно направленных ультразвуковых волн в материале трубы.

Результаты моделирования показывают равномерное распространение волнового поля вдоль исследуемого участка трубопровода. При этом по краям модели наблюдается некоторое увеличение частоты волнового рисунка, обусловленное особенностями распределения напряжений и граничными условиями модели. На полученных зависимостях также прослеживается характер затухания импульсного сигнала синусоидальной формы. Смоделированный начальный импульс линейно направленных ультразвуковых волн, отображаемый на детектном графике в виде выраженного амплитудного всплеска, по мере распространения постепенно теряет амплитуду. Такой характер изменения сигнала свидетельствует об отсутствии нарушений сплошности материала стенки полиэтиленового трубопровода (рисунок 2.3).

Для рассматриваемого типа инженерных коммуникаций одним из наиболее характерных дефектов является локальное отверстие в стенке трубопровода, геометрическая форма которого приближена к округлому профилю. Указанный

тип дефекта использовался при построении модели повреждённого участка трубопровода (рисунок 2.4).

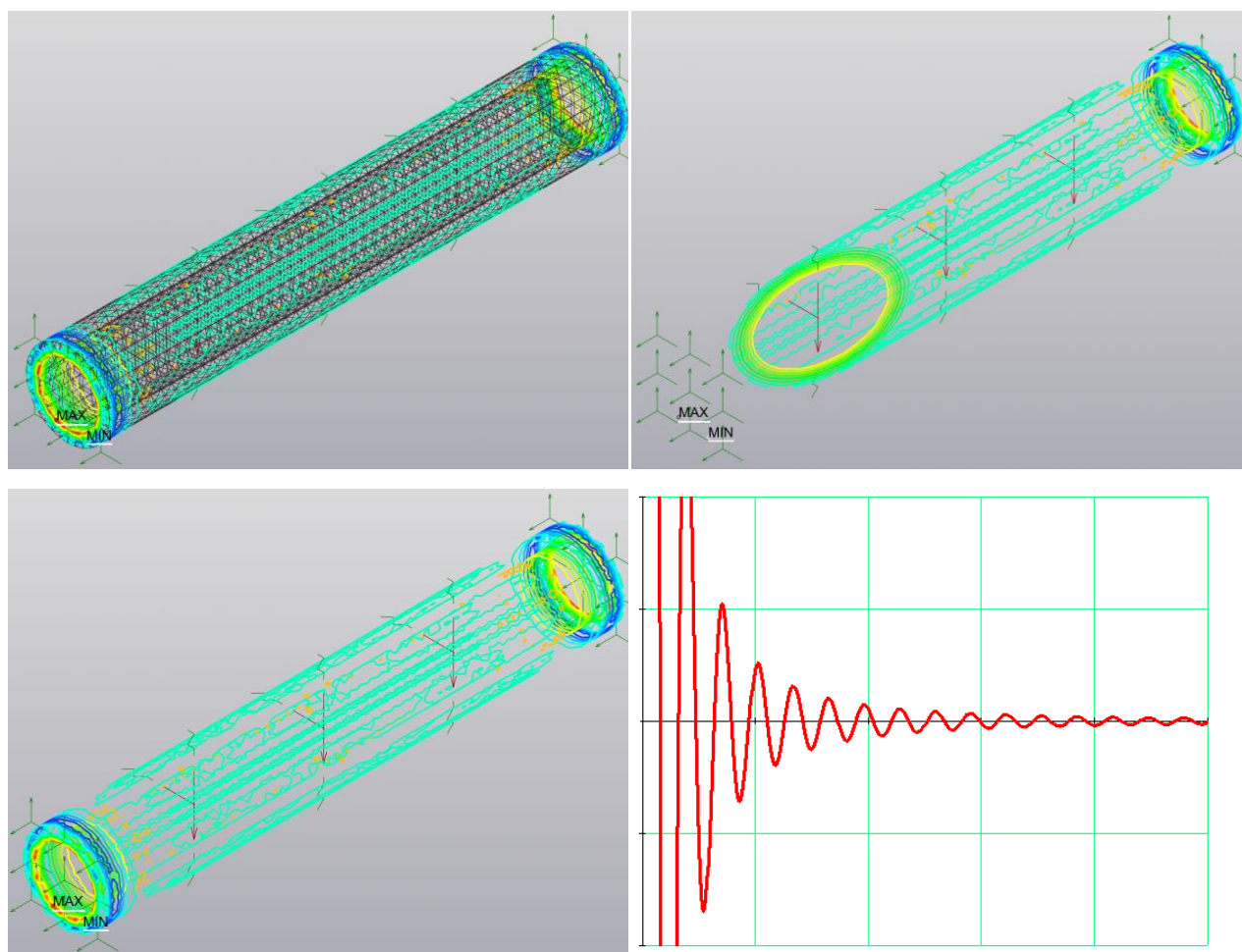


Рисунок 2.3 – Результаты моделирования распространения линейно направленных ультразвуковых волн в моделируемом участке полиэтиленового трубопровода
(составлено автором)

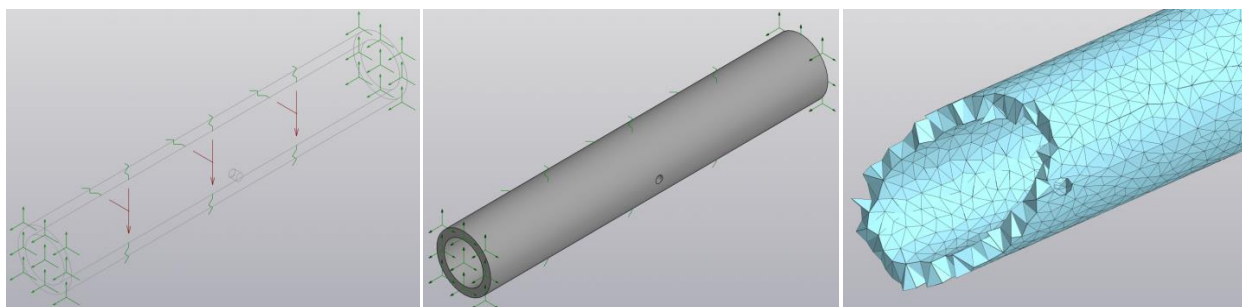


Рисунок 2.4 – Симуляция дефекта округлого геометрического профиля на моделируемом участке полиэтиленового трубопровода (составлено автором)

Такие дефекты могут возникнуть при сосредоточенных на малых площадях динамических нагрузках, таких как удары, падение технологических элементов,

размещение уплотнений на основании, вдоль которого трассируется полиэтиленовый трубопровод, прочее.

Результаты моделирования указывают на сгущение волнового рисунка линейно направленных акустических волн в районе дефекта округлого геометрического профиля, что также получило отклик на детектном графике в виде повторного всплеска импульса синусоиды флуктуаций (рисунок 2.5) [22].

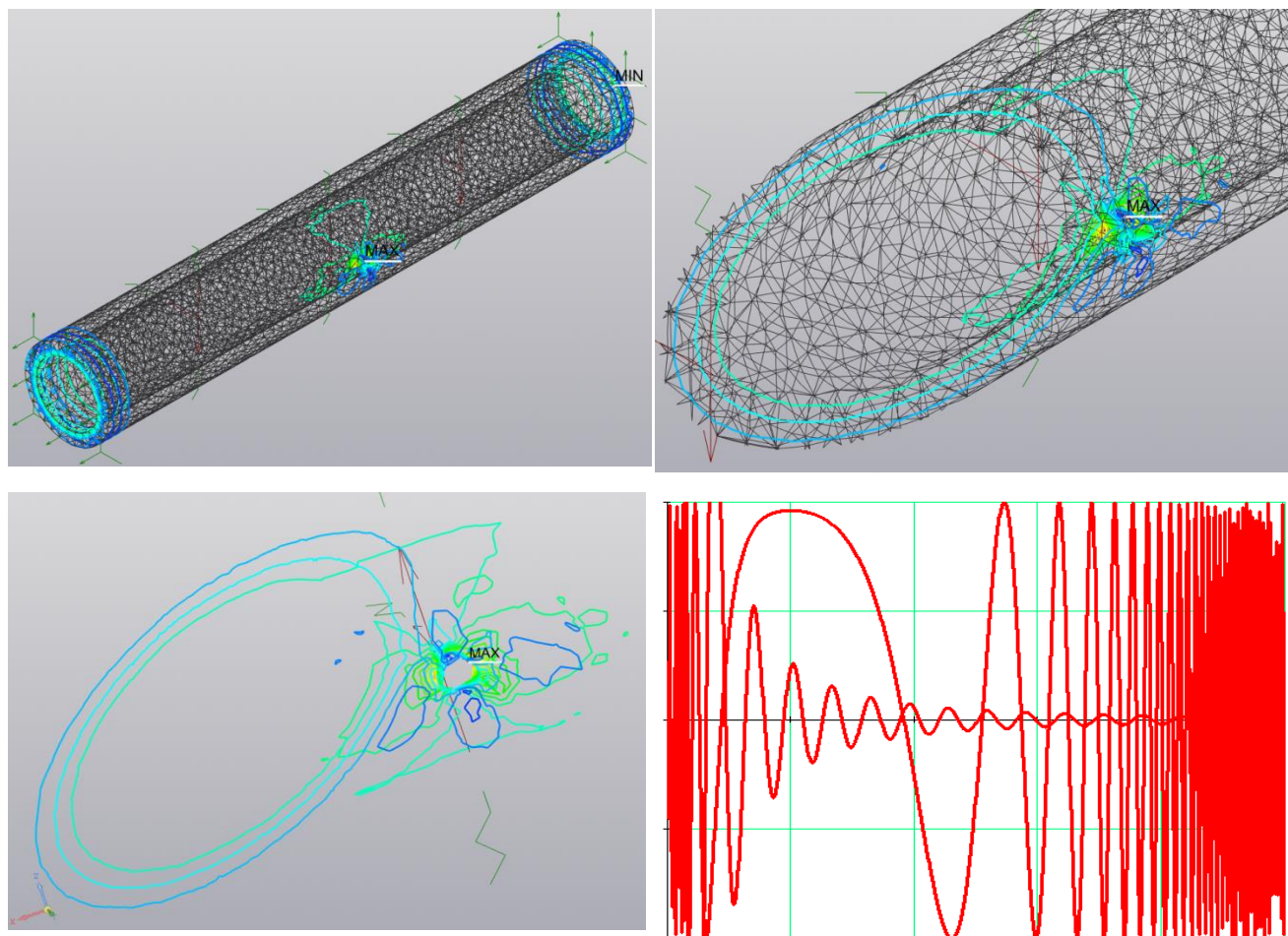


Рисунок 2.5 – Результаты моделирования распространения линейно направленных ультразвуковых волн в материале полиэтиленового трубопровода с дефектом округлой геометрической формы с установлением характерного детектного всплеска импульса синусоиды флуктуации волновой функции

(составлено автором)

Такой характер волнового рисунка (распределения волновой функции) обусловлен наличием концентрации ультразвуковых волн, отражаемых от поверхности дефекта (нарушения сплошности материала стенок моделируемого полиэтиленового трубопровода), что в сравнении с моделированием

бездефектного случая (рисунок 2.3) демонстрирует работоспособность предложенного метода контроля технического состояния полиэтиленовых труб.

Согласно полученным данным по результатам моделирования (рисунок 2.5), наблюдается формирование детектного пика и устойчивого сгущения волнового рисунка, что вызвано рефлексными линейно направленными акустическими волнами, которые отражаются от поверхности дефекта округлой геометрической формы. Следовательно, моделируемый метод детекции дефектов полиэтиленовых труб показывает высокую степень обнаружения несплошности материала трубы.

Для анализа применимости исследуемого детект-метода выполнили цифровую апробацию ещё для двух характерных дефектов полиэтиленовых труб – поперечного (рисунок 2.6) и продольного дефекта в виде трещин (рисунок 2.7).

Дефекты такого типа также часто встречаются при эксплуатации ПЭ трубопроводных систем в Китае и России. В частности, трещины разной плоскостной направленности (продольные и поперечные) возникают вследствие различных динамических нагрузок вдоль линии трассировки трубопровода, как с наружной стороны (к примеру, при прокладке трассы инженерной коммуникации через транспортные пути), так и с внутренней стороны (при несоблюдении режимов эксплуатации: гидроудары, критическое превышение давления транспортируемого агента и прочее).

Согласно полученным данным, исследуемый детект-метод позволяет выявить кроме характерного округлого дефекта также и трещины в разных плоскостях развития, что указывает на значительный потенциал данного способа обнаружения несплошности материала полиэтиленовых труб для широкой номенклатуры возможных разрушений [23].

На рисунке 2.6 волновая функция не визуализирует всплеск начального импульса линейно направленных волн и всплески рефлексных волн от поверхности дефектов, имеющих различных характер, что возможно использовать для их типизации и систематизации с целью разработки соответствующего приборно-аппаратного решения.

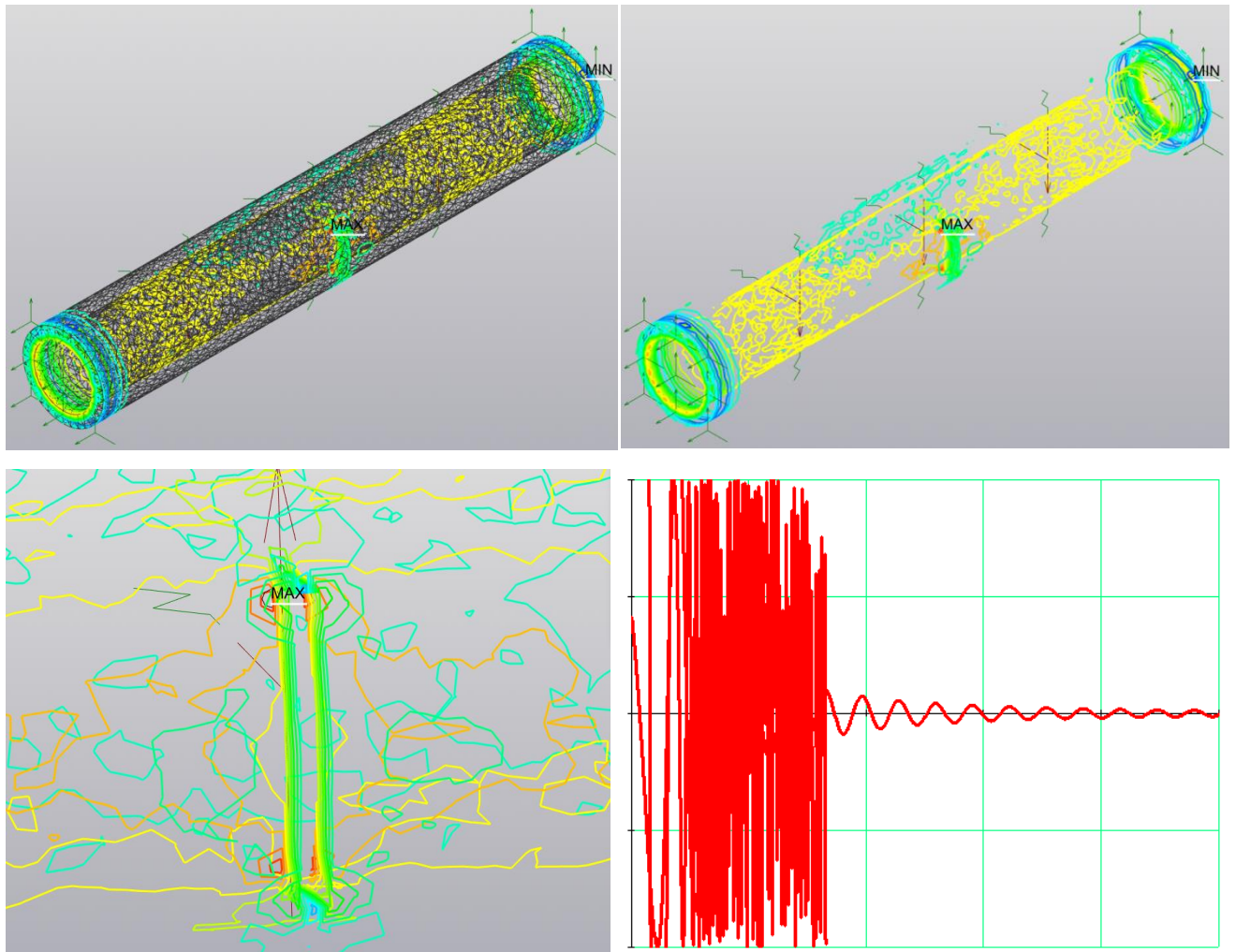


Рисунок 2.6. – Результаты моделирования распространения линейно направленных ультразвуковых волн в материале полиэтиленового трубопровода с дефектом в виде поперечной трещины с установлением характерного детектного всплеска импульса синусоиды флуктуации волновой функции
(составлено автором)

2.3 Разработка алгоритма описания трещин

Учитывая наличие вариаций в регистрации ультразвуковых сигналов в экспериментальных условиях, обеспечение стабильной точности этих сигналов может представлять собой сложную задачу из-за воздействия факторов окружающей среды и характеристик используемых приборов. Таким образом, сигналы, относящиеся к одному и тому же случаю повреждения, могут быть представлены несколькими вариантами, каждый из которых отличается незначительными изменениями, вызванными случайными колебаниями условий эксперимента. Чтобы решить эту проблему, числовой набор данных дополняется

для каждой геометрии трещины путем введения аддитивного гауссовского белого шума. Этот подход не только учитывает изменчивость экспериментальных данных, но и позволяет расширить обучающий набор данных программы, используемый в данной модели.

Для моделируемого состояния повреждения вводится шум с заданным сигналом/шумом, который можно описать уравнением:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{ijk}}{P_{ni}} \right) \quad (2.12)$$

где P_{ijk} – мощность произвольного чистого сигнала, которое вычисляется на основе среднеквадратичного значения амплитуд сигнала, Вт;

P_{ni} – мощность добавленного шума к каждому вновь сгенерированному сигналу, Вт.

Добавленный шум можно рассматривать как дополнительный сигнал $\bar{N}$. Набор данных заполняется в соответствии с уравнением (2.13), в котором любое новое наблюдение в базе данных просто поэлементное сложение чистого сигнала и аддитивного Гауссовского белого шума. Эта операция выполняется 30 раз для каждого чистого сигнала.

$$Y_{i,j,k,l} = X_{i,j,k} + \bar{N}, \quad 0 < l \leq 30 \quad (2.13)$$

Было оценено несколько значений сигнала/шума с целью выбора оптимального значения, которое не ставит под угрозу присущую дифференциацию между различными состояниями повреждения. После рассмотрения различных значений сигналов значение 60 дБ было определено как лучший выбор. Когда значение сигнала было установлено слишком низким, например, 25 дБ, наложение различных сигналов состояний повреждения было очевидным для режимов L(0,3) и L(0,4), как показано на (рисунок 2.7). Это повлияло бы на параметр мягкого запаса разработанной модели, что привело бы к неточности при расчете. Значение сигнала 60 дБ поддерживало запас разделения в наблюдениях во временной области для каждого состояния повреждения (рисунок 2.8). Результаты сигнала именно в 60 дБ являются предпочтительными, поскольку они близко совпадают с диапазоном спектральной мощности в числовых сигналах и соответствуют разбросу сигнала, наблюдаемому в экспериментальных результатах. Всего было

сгенерировано 30 сигналов с шумом для каждой комбинации волновой моды, окружной оси приемников и геометрии трещины.

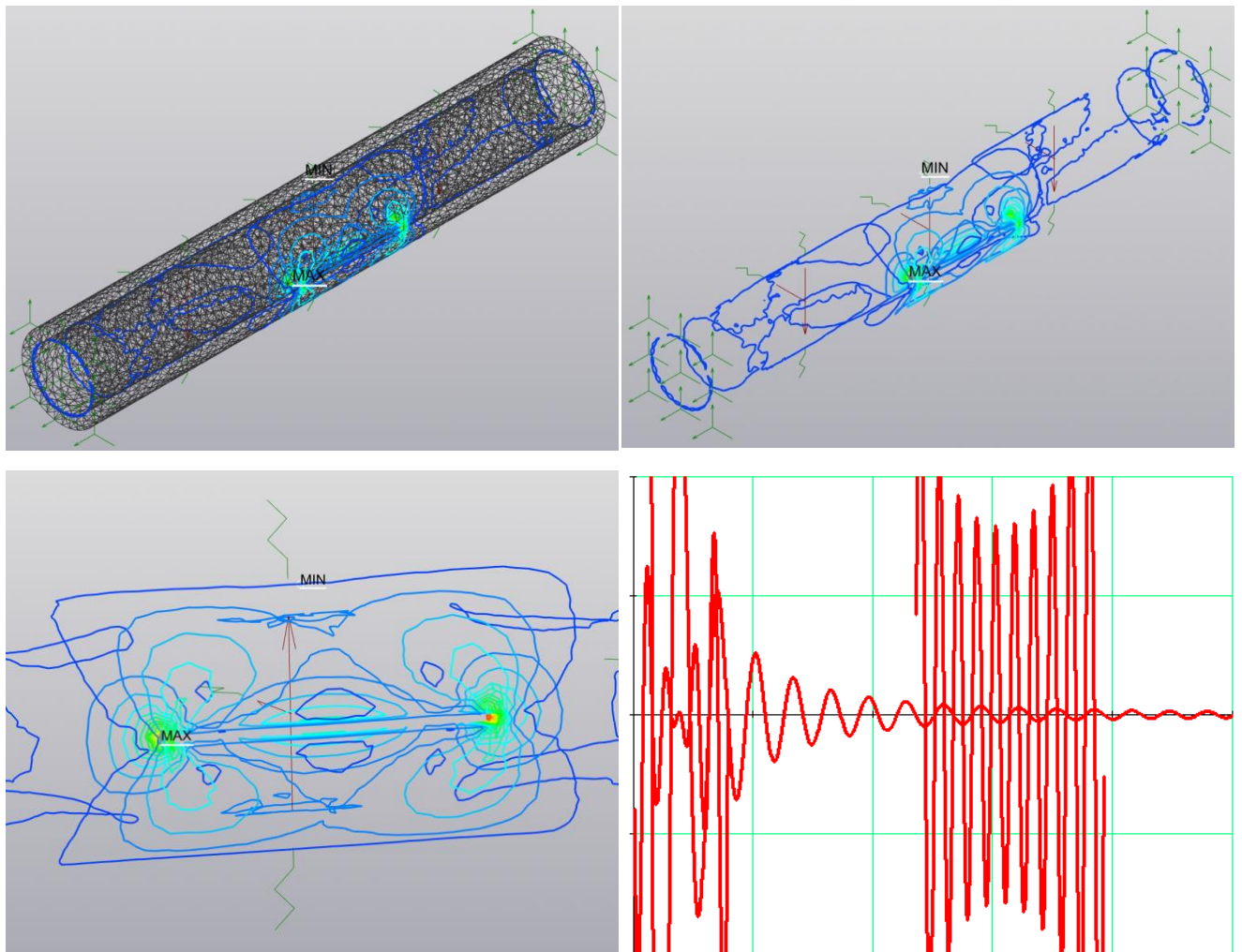


Рисунок 2.7 – Результаты моделирования распространения линейно направленных ультразвуковых волн в материале полиэтиленового трубопровода с дефектом в виде продольной трещины с установлением характерного детектного всплеска импульса синусоиды флуктуации волновой функции (составлено автором)

Согласно представленным данным моделирования развития дефекта (рисунок 2.8), можно заключить, что исследуемый метод рефлексной детекции дефектов полиэтиленовых труб при помощи линейно направленных ультразвуковых волн демонстрирует возможность выявления разрушений материала трубопровода также на ранних стадия развития нарушения целостности стенок трубы. При этом следует отметить, что (рисунок 2.7) распределения волновой функции менее амплитудный, что логично с учётом характера

моделируемого дефекта, поскольку площадь отражения дефекта округлой формы на начальной стадии меньше, чем на финальном этапе.

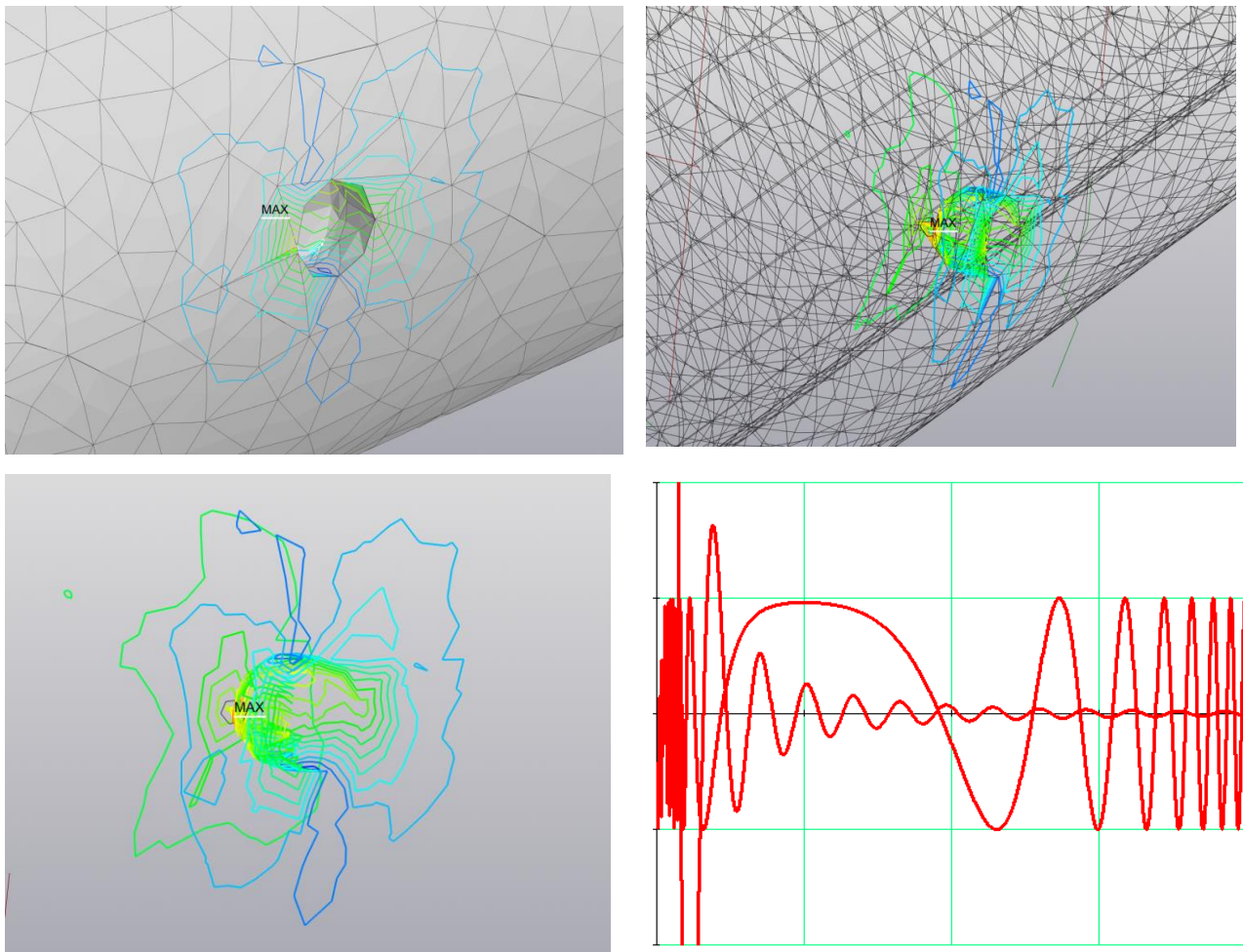


Рисунок 2.8 – Результаты моделирования распространения линейно направленных ультразвуковых волн в материале полиэтиленового трубопровода с дефектом округлой геометрической формы на начальной стадии развития с установлением характерного детектного всплеска импульса синусоиды флуктуации волновой функции (составлено автором)

Согласно представленным результатам моделирования детект-метода фиксации дефектов полиэтиленовых труб с помощью анализа распределения линейно направленных ультразвуковых волн, приходим к выводу о его работоспособности и высоком потенциале применимости для раннего выявления дефектно-разрушительных процессов в толще стенки трубопровода.

Применение данного метода ранней оценки повреждений на основе линейных направленных волн оказывает значительное влияние на безаварийную эксплуатацию полиэтиленовых трубопроводов. Одним из ключевых преимуществ

метода является его способность обнаруживать разнообразные дефекты на ранних стадиях их развития. Это позволяет оперативно выявлять потенциальные проблемы в материале трубопровода и принимать меры по их устранению до того, как они приведут к серьезным повреждениям или даже авариям. Такое раннее обнаружение дефектов способствует повышению надежности и долговечности трубопроводов, а также снижению риска экологических и экономических последствий.

Кроме того, метод расчета позволил получить количественные данные на предмет диагностики состояния полиэтиленовых трубопроводов, что способствует более эффективному планированию регулярных обслуживаний и ремонтов, а также оптимизации ресурсов, так как можно более точно определить, какие участки требуют особого внимания и мониторинга.

Таким образом метод ранней оценки повреждений на основе линейных направленных волн существенно повышает уровень безопасности, надежности и эффективности эксплуатации полиэтиленовых трубопроводов, что имеет важное значение для инфраструктуры и окружающей среды.

2.4 Выводы по главе 2

1. Выполнено математическое и компьютерное моделирование, основанное на детект-методе с использованием линейно направленных волн.

2. Разработана система анализа, типизации волновых откликов дефектов с помощью программной системы, что может быть применено для разработки соответствующего программно-аппаратного решения предложенной системы рефлексной дефектоскопии. Преимуществом является потенциал к раннему выявлению последствий деструктивных процессов в толще стенки полиэтиленовых труб.

3. Метод минимизации числа направлений падающей/рассеивающей волны для точного моделирования рассеивающей матрицы (S-матрицы) при взаимодействии дефекта с управляемыми волнами низкой частоты, предусматривают изменение амплитуды возрастания. Полученные результаты имеют потенциал для применения в качестве аналитического блока типизации и

предиктивного прогноза формирования и детектирования дефектов полиэтиленовых труб.

4. Полученные результаты содержат более основательное обоснование механизмов детекции дефектов с помощью ультразвуковых линейно направленных волн, а также указывает на потенциальную возможность к расширению линейки детектируемых нарушений цельности материала полиэтиленовых труб.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАННЕЙ ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ВОЛН

3.1 Методика проведения исследований

Характеристики линейно-направленных волн являются исходными данными при решении проектных и эксплуатационных задач в области ультразвуковой диагностики ПЭ трубопроводов. Поскольку линейный ультразвук обладает высокой чувствительностью к повреждению полиэтиленового трубопровода, следует выбирать различные сигналы и частоты возбуждения в соответствии с явлением линейной ультразвуковой модуляции внутри трубопровода, приемные датчики следует располагать на поверхности трубопровода, а сигналы должны приниматься с использованием метода одного генератора и одного приемника высших гармоник и метода двух генераторов и одного приемника компонентов боковых лепестков. Для получения данных проведены эксперименты согласно поставленным задачам диссертации применялись испытания на растяжение и ползучесть с надрезом, а также по исследованию характеристик соединений ПЭ труб высокой плотности

При разработке методики экспериментальных исследований влияния ультразвуковой линейно-направленной волны и выбора оборудования для проведения экспериментов, необходимо учитывать наличие у образцов ПЭ100 влияния типичной сжимающей нагрузки 15 МПа и 20 МПа на микроповреждения внутри образцов ПЭ (рисунок 3.1). Предел прочности материала ПЭ100 составляет 15–22 МПа. В эксперименте средний модуль упругости образцов ПЭ100 составляет 948,13 МПа, предел текучести - 21,23 МПа, а усилие текучести - 3338,1 Н. Испытания проводились в соответствие с нормативной документацией на следующие показатели согласно нормативным документом на методы испытаний: ГОСТ 18599-2001. Трубы напорные из полиэтилена. Технические условия. Из отобранного отрезка трубы изготовили три одинаковых образца для испытаний (длиной 200 ± 2 мм), на образцы нанесли две кольцевые метки на расстоянии 100 мм друг от друга и на равном расстоянии от торцов.



Рисунок 3.1 – Образцы (фото автора)

Образцы кондиционируются при температуре $23 \pm 2^\circ\text{C}$ (в зависимости от средней толщины стенки 1, 3, 6 часов). Измерили на образцах максимальное и минимальное расстояние между метками, отметили места измерения. Далее образцы свободно разместили в воздушном термошкафе таким образом, чтобы изменение длины происходило беспрепятственно, в зависимости от средней толщины стенки: до 8 мм – 60 мин и от 8 до 16 мм – 120 мин, при температуре $100 \pm 2^\circ\text{C}$; $110 \pm 2^\circ\text{C}$ (в зависимости от материала трубы: ПЭ 32/40 и ПЭ 50/63/80/100/).

Испытательная машина LFM-200 в двухколонном напольном исполнении с возможностью преднагружения, безлюфтовой шаровинтовой парой, с дополнительными прочными опорными колоннами, гарантирующими точную геометрию испытательной системы (рисунок 3.2, таблица 3.1).

Применяемое оборудование (рисунок 3.3):

1. Испытательная машина LFM-200 Пневмогидростанция для гидравлических испытаний с системой автоматизированного управления ($P_{\max}$ 45Мпа).
2. Штангенциркуль Shan ШЦЦ-1-300-0,1.
3. Микрометр цифровой для измерения толщины стенок труб 0-25 мм.
4. Секундомер электронный, Интеграл С-01.



Рисунок 3.2 – Испытательная машина LFM-200 (фото автора)

Таблица 3.1 – Характеристики испытательной машины LFM-200 (составлено автором)

Модель	LFM-200
Максимальная нагрузка кН	200
Конструктивное исполнение	Напольная, Четырехколонная рама
Тип испытания	Статические
Тип привода	Электромеханический
Минимальная нагрузка, кН	1
Точность измерений, %	0,5
Вид испытания	растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг, срез, отслаивание, двухосевые испытания на растяжение/сжатие и вращение



Рисунок 3.3 – Применяемое оборудование в методике проведения исследований (фото автора)

При проведении исследования также применялась экспериментальная установка для линейно-направленных ультразвуковых измерений образца старения термического соединения образцов ПЭ трубы (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Внешний вид экспериментальной установки линейно-направленной ультразвуковой измерительной системы (фото автора)

Экспериментальные исследования проводились в научно-исследовательском институте диагностики и повышения качества трубопроводной продукции Пекинского нефтяного института (Китай). В качестве исследуемых образцов применялись материалы труб ПЭ 32/40 и ПЭ 50/63/80/100/.

Экспериментальная установка включает в себя генератор тональных импульсов высокой мощности, систему Ritec-SNAP модели RAM-5000, attenuator высокой мощности, предусилитель, фильтры нижних и верхних частот, преобразователи и осциллограф. В том числе усилитель с высоким уровнем мощности для создания радиочастотных импульсов. Передатчик управляется сигналом тонального импульса высокой мощности из 19 циклов на частоте 2,25 МГц и длительностью радиочастотного импульса 8,45 мкс. При запуске установки передающий преобразователь сигнала высокого напряжения проходит через терминал высокой мощности 50 Ом, attenuator высокой мощности (6 дБ) и набор фильтров нижних частот, так что переходное поведение и высокочастотная составляющая от усилителя подавляются. Амплитуды основных и вторых гармонических волн измеряются в исследуемых образцах (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Результаты испытаний (по данным автора)

Образец	Материал	Название образца	Описание
1	Труба из ПЭ	A1	Новый материал.
		A2	Искусственное старение ПЭ в горячей ванне (водяная баня 80 °С, статическое гидравлическое давление 5,4 МПа и время испытания 165 ч).
		A3	Сжимающая нагрузка 15 МПа/2 ч (напряжение достигает 15 МПа, а время нагружения составляет 2 ч).
		A4	Сжимающая нагрузка 15 МПа/3 ч (напряжение достигает 15 МПа, а время нагружения составляет 3 ч).
		A5	Сжимающая нагрузка 20 МПа/2 ч (напряжение достигает 20 МПа, а время нагружения составляет 3 ч).
2	Стыковые сварные соединения из ПЭ	B1	Образец некомпессионной нагрузки.
		B2	Сжимающая нагрузка 15 МПа/2ч.
		B3	Сжимающая нагрузка 15 МПа/3ч.
		B4	Сжимающая нагрузка 20 МПа/2ч.
3	Образцы стыковых сварных соединений ПЭ с существующими дефектами	B1	Материал ПЭ с дефектом 40%.
		B2	Соединение с дефектом 40% и сжимающей нагрузкой 15 МПа/2 ч.
		B3	Материал ПЭ с дефектом 60%.
		B4	Соединение с дефектом 60% и сжимающей нагрузкой 15 МПа/2 ч.
		B5	Материал ПЭ с дефектом CF 80%.
		B6	Соединение с дефектом 80% и сжимающей нагрузкой 15 МПа/2 ч.

Для генерации основной волны используется узкополосный преобразователь продольной волны (центральная частота 2,25 МГц), а приемником является пьезоэлектрический широкополосный преобразователь (центральная частота 2-3,5 МГц), который используется для сбора сигналов. Полученный сигнал регистрируется в усредненном режиме (256 раз) цифровым осциллографом Tektronix TDS 2012C (два канала, полоса частот 100 МГц, частота дискретизации 2,0 Гвыб/с). Передатчик (Shantou Institute of Ultrasonic Instruments Co, SIUI 2.25P14) и преобразователи приемника (SIUI 3.5P14) имеют одинаковый диаметр 14 мм. Для повышения качества сигнала ультразвуковой волны для контакта между преобразователями и образцами используется контактная смазка.

3.2 Экспериментальные исследования оценки повреждений на основе линейных направленных волн

Экспериментальные исследования по разработанной методике проводятся согласно плану эксперимента.

Объектом исследования являются материалы труб ПЭ 32/40 и ПЭ 50/63/80/100/. Предмет исследования – обнаружение повреждений и изменений при помощи линейно направленных ультразвуковых волн.

Используя вышеприведенную линейную ультразвуковую экспериментальную установку, были получены сигналы во временной области - В1, В2 и В3 (рисунок 3.5). Изменения формы волны первичной формы и гармоник между образцами основного материала ПЭ и зоны сварного соединения трудно различимы, но после обработки сигнала и масштабирования, амплитуда второй гармоники в 10^2 - 10^3 была больше, чем у основных гармоник (рисунок 3.5 - (б) и (г)).

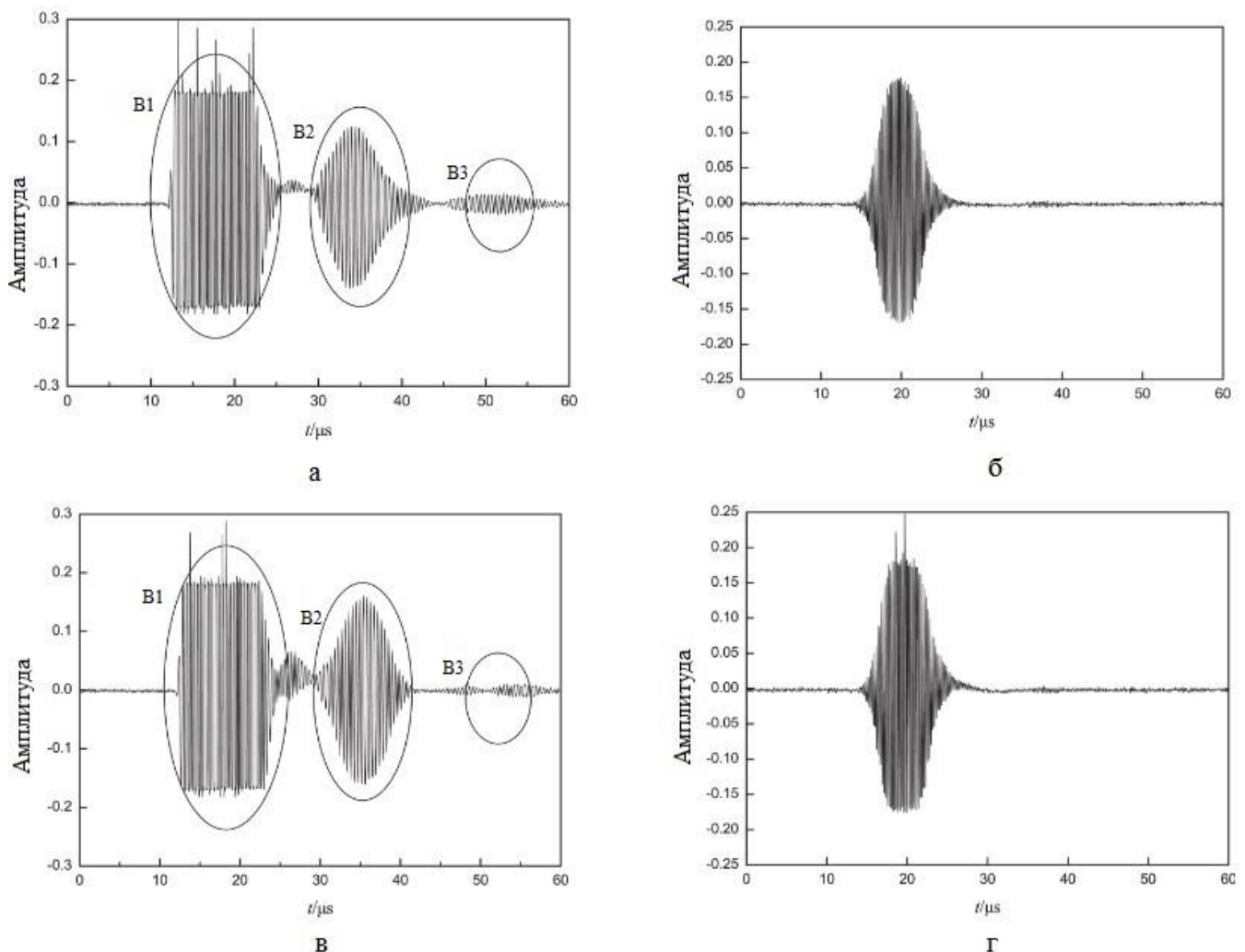


Рисунок 3.5 – Форма волны исследуемых образцов ПЭ и соединения.

- (а) полученная форма волны материала ПЭ без дефекта; (б) вторая гармоническая форма волны материала ПЭ; (в) полученная форма волны соединения ПЭ; (г) вторая гармоническая форма волны соединения ПЭ (составлено автором)

Эти сигналы представляют собой первичную форму волны и эхо первого и второго порядка. Широкополосный преобразователь обнаружил основные и вторые гармоники изменения структуры образцов ПЭ трубы (рисунок 3.6).

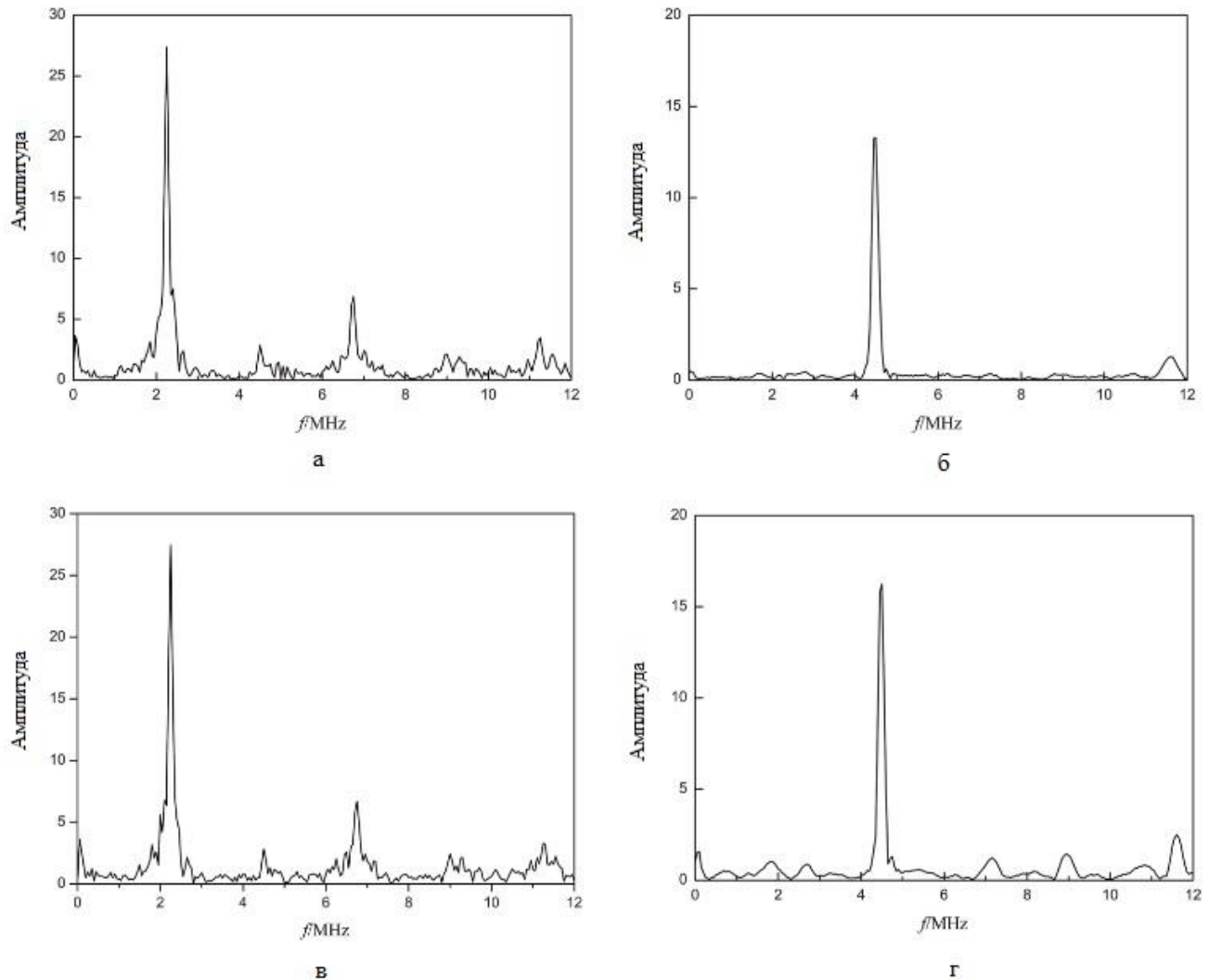


Рисунок 3.6 – Амплитуды частотного спектра основной (A1) и второй гармоники (A2): (а) основная частота основного материала ПЭ, (б) вторая гармоника основного материала ПЭ; (в) основная частота соединения материала ПЭ; (г) вторая гармоника соединения ПЭ (составлено автором)

В процессе эксперимента было настроено усиление второй гармонической формы волны в цифровом осциллографе примерно на 60 дБ и наблюдалась основная и гармоническая волна. Затем данные были извлечены из стационарной части первичной и гармонической волновых форм для обработки быстрым преобразованием Фурье и была построена зависимость частотного спектра основного (A1) и второго гармонического (A2) сигналов (рисунок 3.6).

Гармонические пики в частотном спектре были на уровне 4,5 МГц. Амплитуда второго гармонического (A2) составила почти половину амплитуды спектра основного сигнала (A1) из-за влияния фильтров и преобразователей, используемых в экспериментах на установке.

Для подтверждения, что вторая гармоника принимаемого сигнала обусловлена линейно направленным сигналом термической сварки ПЭ трубы, а не зеркальностью амплитуды линейного сигнала или экспериментальных приборов, сравнивались изменения амплитуды (A2) в частотных областях основного материала ПЭ и соединений образцов трубы, (рисунок 3.6 (б) и (г)). Амплитуды сигнала (A2) увеличивались в диапазоне с 13,27 до 16,25, что указывает на то, что очевидно влияние изменений в материале ПЭ трубы на поведение линейно направленных волн.

3.3 Экспериментальные исследования оценки повреждений на основе линейных направленных волн и статистическая обработка результатов

Были выбраны пять образцов из шести наборов образцов (материал ПЭ трубы, материал соединения ПЭ без дефектов и с дефектами). Сравнивались спектры амплитуд второй гармоники пяти образцов ПЭ В1, соединения (A1) с несжимающей нагрузкой, образцы (A2) и (Б1) с сжимающей нагрузкой 15 МПа/2 ч, соединения (В1) с 40% дефектом ПЭ и образцы В2 и Б1 с сжимающей нагрузкой 15 МПа/2 ч (рисунок 3.7).

Изменение амплитуды второй гармоники (A2) было в диапазоне частотного спектра 4,0 МГц-5,0 МГц. Таким образом, образец (В1) имеет наименьшую амплитуду (A2), а образец (Б2) имеет наибольшую амплитуду (A2). Существует очевидный разрыв пика амплитуды (A2) между образцами (В1) и (Б1) из-за существенного влияния термической сварки на хрупкость материала ПЭ. Разрыв амплитуды между (Б1) и (В1) означает, что холодный сплав играет ключевую роль в усугублении старения соединения ПЭ. Незначительные различия между образцами (Б1, Б2) и (В1, В2) подтверждают, что параметры акустической линейности чувствительны к старению сжимающей нагрузки материала ПЭ.

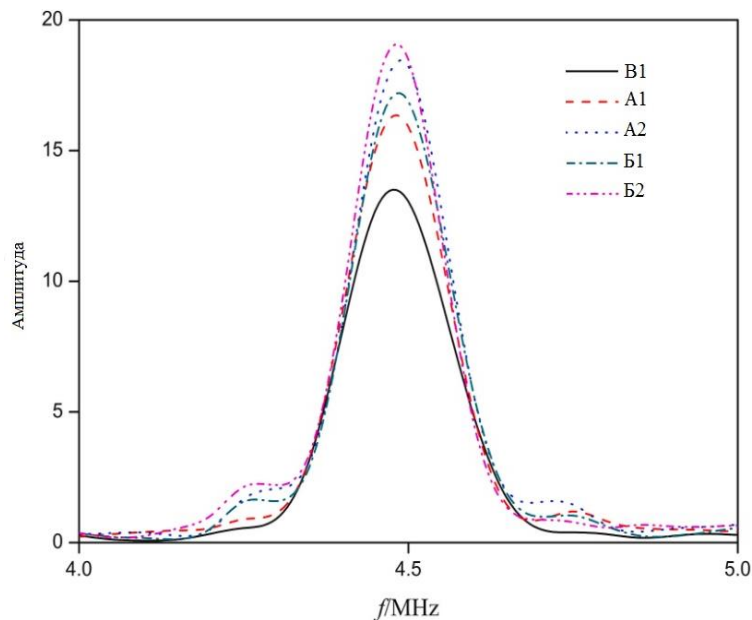


Рисунок 3.7 – Изменения спектров гармонической частоты для пяти образцов
(составлено автором)

Для сходимости результатов эксперимента, для набора из пяти образцов ПЭ100 (B1 - B5) при различных условиях испытания на старение (каждый образец испытывался три раза), были приведены значения линейности β . Средние акустические линейные параметры (β) B1, (β) B2, (β) B3, (β) B4 и (β) B5 составляют 0,0176, 0,0192, 0,0227, 0,0250 и 0,0265. Зависимости погрешностей показывают распределение значений (β) для всех образцов, причем диапазон представляет самые высокие и самые низкие измеренные значения. Эти зависимости погрешностей указывают на максимальное изменение экспериментально измеренных результатов для каждого образца. Изменение (β) в зависимости от условий старения наблюдается очевидная тенденция к росту от (B1) до (B5). На ранней стадии старения от (B1) до (B2) наблюдается прирост 0,0016 между (β) нормального образца и искусственно состаренного (рисунок 3.8). Значения (β) для (B2, B3) демонстрируют прирост 0,0035, что доказывает, что сжимающая нагрузка - 15 МПа/2 ч, вызывает больше микрповреждений старения в образцах, чем процесс искусственного старения.

Развитие повреждений в образцах ПЭ установлено из нормальных условий, достигая прочности на сжатие 15 МПа и 20 МПа, что означает, что от образцов (B 1, B 3, B 4 и B 5) изменение значения (β) увеличивается почти линейно. Значение

(β) отражает, что термическое искусственное старение не так сильно влияет, как например ползучесть при сжатии для этих образцов. Таким образом, эти результаты дают некоторые указания для интерпретации старения соединений ПЭ, которые являются самым уязвимым местом в газораспределительных трубопроводах.

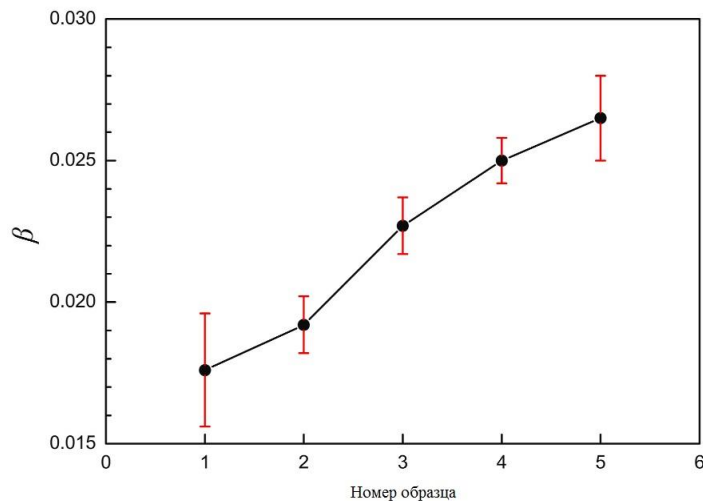


Рисунок 3.8 – Сравнение значений (β) для материала ПЭ при различных условиях старения (составлено автором)

На графике зависимости (рисунок 3.7) обобщены линейно направленные ультразвуковые измерения соединений ПЭ (образцы набора 2) при различных условиях старения сжимающей нагрузки. Нормализованный параметр линейности нанесен на график (рисунок 3.9) относительно четырех образцов соединений ПЭ. Значения (β) для (A1, A2) показывают быстрый рост с 0,0217 до 0,0244, что означает, что соединения ПЭ демонстрируют очевидную линейность при старении сжимающей ползучести. Значения (β) для (A2, A3) увеличиваются с 0,0244 до 0,0258 по мере увеличения времени выдержки давления сжимающей ползучести с 2 до 3 часов. Значения (β) образцов (A3, A4) увеличиваются от 0,0258 до 0,0282 при изменении давления от 15 МПа до 20 МПа. Значения (β) показывают линейную тенденцию. Учитывая эти полученные значительные изменения (β) можно сделать вывод, что параметр акустической линейности чувствителен к микроструктурной эволюции, включая изменения в дислокациях термического сплавления и преципитации, происходящих в соединениях ПЭ трубы. Показатель

(β) содержит информацию о старении соединений ПЭ и легко различает степень старения образцов термических соединений.

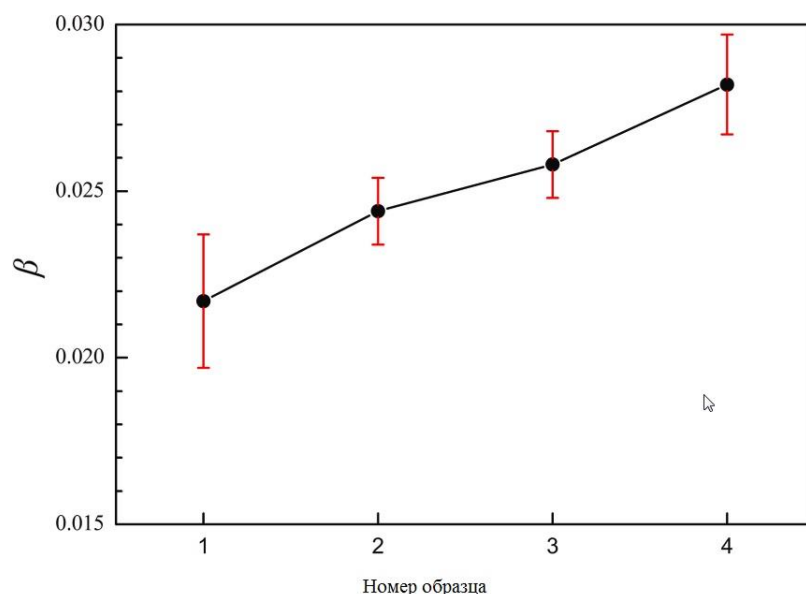


Рисунок 3.9 – Сравнение значений (β) для стыковых сварных соединений полиэтилена при различных условиях старения (составлено автором)

При проведении эксперимента сравнивались параметры акустической линейности образцов термического соединения ПЭ трубы с различными дефектами. Согласно китайскому техническому стандарту по проектированию газопроводов из полиэтилена CJJ63-2018, термическая обработка ПЭ требует времени поглощения 227с. Данный технический стандарт предписывает требования к процедуре сварки ПЭ. Образцы (B1, B2) и (B3) представляют собой соединения ПЭ с 40%, 60% и 80% дефектов на которых точки зависимостей значения (β) трех образцов (B1, B3, B5) имеют происхождения без нагрузки при сжатии, а треугольники указывают образцы соединений ПЭ (B2, B4, B6) с дефектами ПЭ при нагрузке ползучести материала ПЭ при сжатии. Значения (β) уменьшаются почти линейно от 0,0238 до 0,0223 и 0,0214, что согласуется с фактическими образцами (рисунок 3.10).

Степень ПЭ образца (B1) является наибольшей, образец (B5) является наименьшей, а степень ПЭ образца (B3) находится посередине. На этом этапе время поглощения тепла недостаточно, и соединение ПЭ образца не полностью сплавлено. Поэтому линейный эффект, вызванный термическим повреждением, преобладает над дислокациями. Когда процесс старения сжимающей нагрузки

осуществляется на этих образцах соединения ПЭ с дефектами изменяется (β) по-другому.

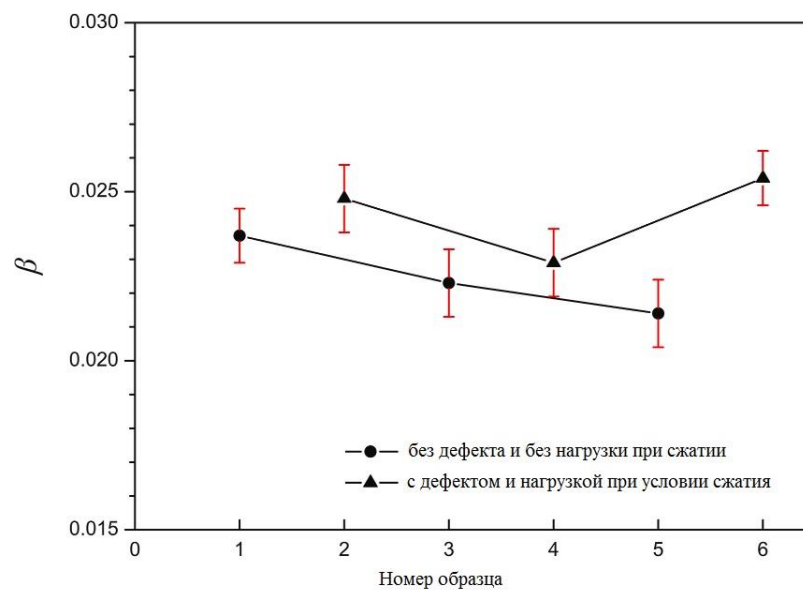


Рисунок 3.10 – Сравнение коэффициента линейности (β) для образцов ПЭ с дефектами и без дефектов (составлено автором)

Для образцов (B2, B4) и (B6) значения (β) уменьшаются от 0,0248 до 0,0229, а затем увеличиваются от 0,0229 до 0,0254. Увеличение параметра линейности означает, что произошли микрповреждения и дислокации. Уменьшение же параметра (β) означает, что старение/микроструктурное повреждение не является серьезным. Значения (β) образцов с компрессионной нагрузкой больше, чем у образцов без компрессионной нагрузки, что легко интерпретировать. Для образца B2 с дефектом ПЭ 40% при нагрузке в 15 МПа/2ч время поглощения тепла составляет 65 сек. Эффект старения термических микрповреждений сильнее, чем линейный эффект, вызванный дислокациями.

Изображения микроструктуры образцов соединения ПЭ было получено с помощью сканирующего электронного микроскопа (Hitachi TM3000). Для образца (B4) с дефектом 60% при 15 МПа/2ч в этой точке линейность, вызванная дислокациями, увеличивается, а линейность термического повреждения уменьшается (рисунок 3.11).

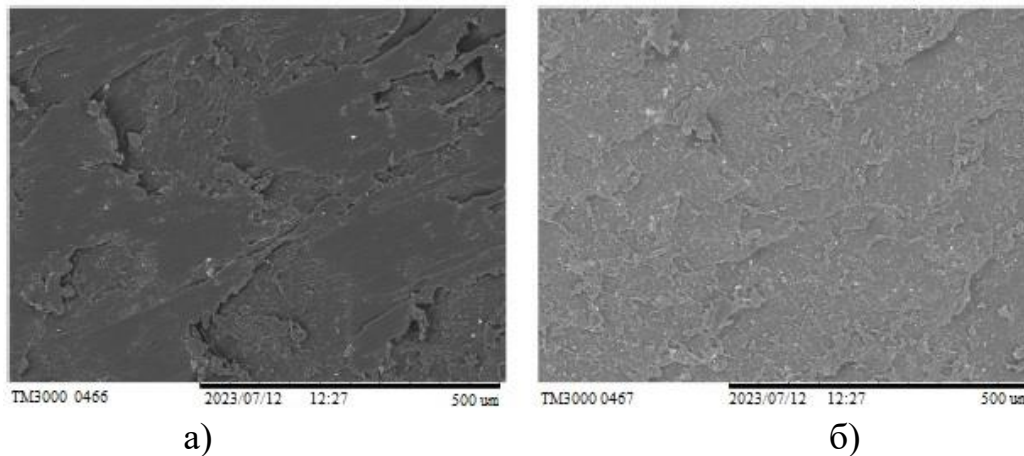


Рисунок 3.11 – Микроструктурные изображения с электронного микроскопа (Hitachi TM3000), соединений ПЭ с дефектом (а) и без дефектов (б)
(фото автора)

Для образца (В6) время поглощения тепла составило 182 сек, что приблизилось к требуемому кодом времени электронного микроскопа. На этом этапе линейный эффект, вызванный дислокациями, сильнее, чем эффект термического повреждения. Значение (β) увеличивается с 0,0229 до 0,254, затем достигает 0,0254, что очень близко к нормальному значению коэффициента линейности, равному 0,0244. Это означает, что соединение ПЭ с 80% старения очень близко к нормальной работе соединения ПЭ не состарившегося. Значение (β) указывает на то, что акустическая линейность для ПЭ сильно зависит от повреждения микроструктуры и ползучести при сжатии. Она увеличивается со степенью нагрузки сжатия (давлением и временем нагрузки).

Таким образом, методика возможности обнаружения старения, повреждений, а также всех нарушений в теле ПЭ трубопровода, которые используются в газораспределительных сетях была охарактеризована применением метода линейно направленного ультразвукового способа обнаружения повреждений и оценки старения при нагрузке ползучести материала ПЭ и его сжатии.

3.4 Выводы по главе 3

Ультразвуковые гармоники в диапазоне – 4,5 МГц, были получены из-за степени старения, например, нагрузка при сжатии или дефект в материале. Экспериментальные результаты показывают очевидную связь между относительным коэффициентом (β), которая отвечает за линейно направленный

ультразвук при использовании нагрузки ползучести материала ПЭ при сжатии или его старением.

1. Изменение измеренного коэффициента (β) хорошо согласуется с условиями старения образца ПЭ, а его значения термических стыков, искусственно состаренных больше, чем у нового материала ПЭ, поскольку структура стыка при термическом сплавлении вызвала сильный эффект линейности.

2. Для соединений ПЭ с дефектами в диапазоне – 40%, 60%, 80% поглощения ультразвуковых волн (β) сохраняет почти линейную монотонную тенденцию к снижению.

3. После выполнения нагрузки ползучести при сжатии значения (β) образцов показывают различные тенденции изменения, как например, (β) уменьшается с 0,0248 до 0,0229, а затем увеличивается с 0,0248 до 0,0254.

4. На основе полученных изображений электронного микроскопа (Hitachi TM3000) дислокации и термические микроповреждения внутри образцов играют различную роль в изменении акустической линейности в процессе испытания.

5. Коэффициент линейности волны (β) обеспечивает понимание информации о старении на микроструктурах, что дает задел на последующие исследования влияния линейно направленных волн на предмет обнаружения повреждений и местоположений ПЭ труб и коммуникаций под землей.

6. Проведенные исследования в этой главе диссертации имеют, актуальность для практического применения неразрушающего контроля старения соединений газовых труб из ПЭ.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РАННЕЙ ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ВОЛН В ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

4.1 Обнаружение линейно направленной волны и ее реакция на повреждение ПЭ трубопровода

Реакция линейно направленной волны на повреждение полиэтиленового трубопровода может быть упрощенно принят как расчет плотности, который может быть определён с помощью функции универсальной теории и модифицированной функции плотности [117]. Предположим A : масса полиэтилена на единицу площади равна M_{to} , масса, полученная функцией универсальной теории, равна M_a [54], а масса, полученная с помощью модифицированной функции плотности, равна M_b , то процесс расчета повреждения полиэтиленового трубопровода представлен формулой (4.1):

$$f(\rho) = \sum \alpha \cdot \frac{\overline{M_a + M_b}}{B(M_{to}) \cdot V} + A(\zeta), \quad (4.1)$$

где α – коэффициент плотности полиэтиленового трубопровода изменяется в зависимости от трещин, усталости, ползучести, степени сцепления, м³/кг;

ρ – плотность трубы, кг/м³;

$f(\rho)$ – функция повреждения трубопровода;

$A(\zeta)$ – функция пересмотра плотности;

$B(M_{to})\zeta$ – универсальная функция плотности;

V – объем трубопровода, м³;

ζ – пересмотренный коэффициент трубопровода.

Линейные направленные волны могут измерять расположение решетки полиэтиленового материала, тестировать нерегулярные и прерывистые повреждения, уменьшать частоту линейного сигнала возбуждения и осуществлять микроскопическую идентификацию места повреждения. По сравнению с нелинейными направленными волнами линейно направленные волны имеют меньше проблем гистерезиса напряжения-деформации и линейную диссипацию, а

также имеют более высокую скорость распознавания трещин, усталости, ползучести и других характеристик.

Функция (B) результат линейного ультразвукового испытания равна вектору положения ультразвукового распространения в трубопроводе [40], а амплитуда - волновое число и угловая частота, является функцией вектора емкости, при которой векторная функция и тестовая размерность равны. Обнаружение линейно направленной волны следующей формулой (4.2):

$$R(x) = \sum_l \sum_u \sum_t A \cos(kx - \omega t) \cdot \mu \cdot \phi(x) \cdot fh + \frac{(\lambda + \mu) \cdot \varphi(x)}{\rho}, \quad (4.2)$$

где λ – исчисление функции трубопровода;

t – время распространения волны, с;

μ – коэффициент повреждения Лагранжа;

l – испытательные соотношения, в том числе продольные, крутильные, изгибные.

Существует два вида скоростей линейного распространения направленной волны в полиэтиленовой трубе: групповая скорость и относительная скорость. С увеличением дальности распространения будут выделяться направленные волны с разными частотами [63], что вызовет рассеяние направленных волн на большой площади в определенной временной области и вызовет помехи при выделении характеристических сигналов [116]. Поэтому при выборе направленных волн следует выбирать волны с медленными изменениями скорости. Кроме того, направленные волны обладают мультимодальностью. При одной и той же частоте направленные волны имеют много режимов распространения, и каждый режим распространения имеет разные скорости. Поэтому анализ групповой скорости направленной волны и относительной скорости на разных модах лежит в основе обнаружения повреждений полиэтиленовых труб [93].

Чтобы реализовать обнаружение повреждений полиэтиленового трубопровода, необходимо рассчитать характеристическое дисперсионное уравнение направленной волны в трубопроводе, а также установить уравнение смещения и уравнение выражения напряжения одновременно направленной волны

в трубопроводе. Среди них методы построения характеристического дисперсионного уравнения делятся на:

- методы трансфер-матрицы;
- методы глобальной матрицы [41].

Метод глобальной матрицы заключается в создании большой матрицы, переносе всех значений линейной направленной волны в матрицу и объединении характеристик каждой частотной направленной волны для получения окончательного результата расчета. Поскольку метод глобальной матрицы имеет более широкий спектр применений, может вычислять собственные значения дисперсии в разных режимах и имеет более высокую надежность. Принимая, что внутренний диаметр полиэтиленовой трубы равен распространению линейных направленных волн [89, 106] и должно удовлетворять уравнению равновесия перемещений Навье, тогда результат можно представить в виде (4.3):

$$\mu \cdot d^2 + (\lambda + \mu)d = \rho \frac{\partial^2 d}{\partial t^2}, \quad (4.3)$$

где d – смещение распространения линейных направленных волн в трубопроводе, м.

В реальном испытательном процессе линейная направленная волна будет возмущаться внешними факторами, поэтому для разложения направленной волны вводится закон Гельмгольца, а результаты расчета можно записать в виде (4.4):

$$\begin{cases} F_{rm}(x) = [A_m \cdot \mu \cdot d^2 + \frac{B_m \cdot (\lambda + \mu) \cdot d}{r}] \cdot \cos n\theta \cdot \cos(\omega t + kz) \\ F_{\theta m}(x) = [\frac{C_m \cdot \mu \cdot d^2}{r} + D_m \cdot (\lambda + \mu) \cdot d] \cdot \sin n\theta \cdot \cos(\omega t + kz) \\ F_{zm}(x) = [\frac{E_m \cdot \mu \cdot d^2}{r} + F_m \cdot (\lambda + \mu) \cdot d] \cdot \cos n\theta \cdot \cos(\omega t + kz) \end{cases}, \quad (4.4)$$

где m - количество слоев полиэтиленовых труб;

$F_{rm}(x)$, $F_{\theta m}(x)$ и $F_{zm}(x)$ – радиальная, осевая и окружная составляющие смещения частиц в трубопроводе под действием направленных волн, м;

$F_{rm}(x) \neq 0$, $F_{\theta m}(x)$ и $F_{zm}(x) = 0$, означает, что волноводная волна является продольной модой;

$F_{\theta m}(x) \neq 0$, $F_{rm}(x)$ и $F_{zm}(x) = 0$, направленная волна представляет собой крутильную моду;

$F_{zm}(x) \neq 0$, $F_{rm}(x)$ и $F_{\theta m}(x) = 0$, направленная волна является изгибной. По предложенной формуле (4.4) можно построить уравнение дисперсии направленной волны полиэтиленового трубопровода (4.5):

$$[c_{ij}]_{6 \times 6} [A, B, A_1, B_1, A_2, B_2]^T = [0, 0, 0, 0, 0, 0]^T, \quad (4.5)$$

Результаты в матрице волны связаны с волновым числом и угловой частотой ω , а коэффициенты конкретных элементов являются комплексными. Кроме того, коэффициент связан с размером, плотностью, модулем Юнга и коэффициентом Пуассона. Решение уравнения (4.5) зависит от длины волны, толщины стенки трубы и частоты сдвига волны стенок, поэтому можно получить только приближенное решение при условии $[c_{1j}] = 0$ где мода продольной направленной волны находится в трубопроводе, когда как $[c_{11}] = 0$ показывает, что режим поперечной направленной волны находится в трубопроводе, с учетом $[c_{1n}] > 1$ что в трубопроводе присутствует мода изгибно-направленной волны.

4.2 Оценка повреждений ПЭ трубопровода с помощью линейно направленных волн

При оценке повреждений ПЭ следует выбирать различные сигналы и частоты возбуждения в соответствии с явлением линейной ультразвуковой модуляции внутри трубопровода, а приемные датчики следует располагать на поверхности трубопровода, сигналы при этом должны приниматься с использованием одного генератора и одного приемника высших гармоник и способами двух генераторов улавливания частот и одного приемника компонентов боковых лепестков. Алгоритм оценки повреждения с помощью линейно направленной волны показан на блок-схеме (рисунок 4.1).

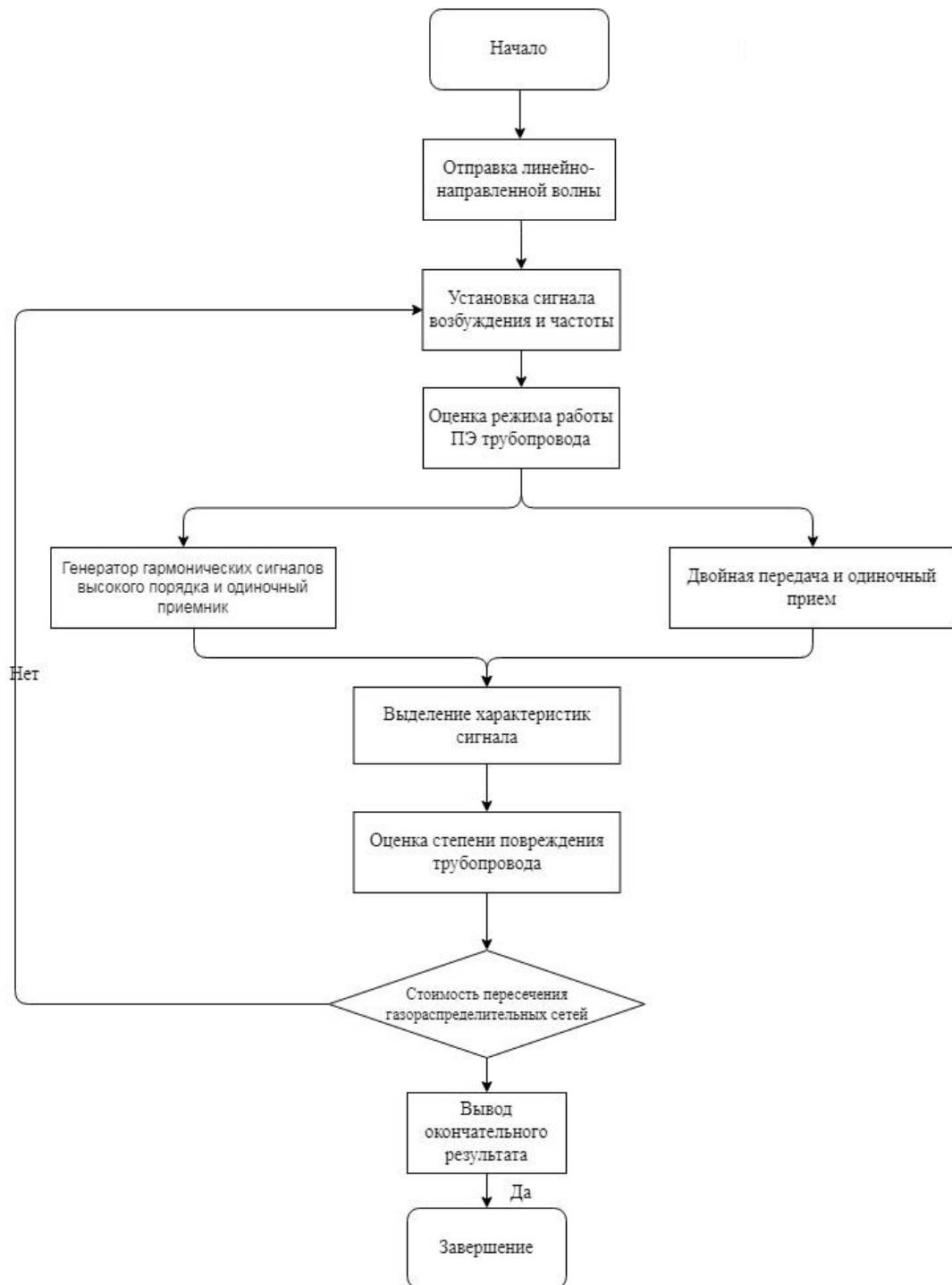


Рисунок 4.1 – Алгоритм оценки повреждения полиэтиленового трубопровода с помощью линейно направленной волны (составлено автором)

Для определения повреждения следует выполнить следующие шаги [89]:

Шаг 1: определить структуру сети полиэтиленового трубопровода, режим работы трубопровода, записать характеристики линейных волн и определить распределение дисперсии, сигнала возбуждения и частоты.

Шаг 2: установить порог и вес частоты, дисперсии, угловой частоты и других показателей. Извлечь соответствующие собственные значения с помощью ряда Фурье с заданными итерационными временными показателями повреждения ПЭ трубопровода.

Шаг 3: определить сигналы линейной направленной волны в различных режимах и рассчитать ситуацию с повреждением ПЭ трубопровода.

Шаг 4: сравнить результаты статистической оценки повреждения ПЭ трубопровода.

Шаг 5: провести итеративную корректировку по формулам (4.1) - (4.5), рассчитать окончательное повреждение ПЭ трубопровода и получить результаты окончательной оценки при различных режимах.

Методика оценки продемонстрирована при помощи экспериментальной установки (см. Глава 3) с генератором тональных импульсов высокой мощности, в которую входила система Ritec-SNAP модели RAM-5000, аттенюатор высокой мощности, предусилитель, фильтры нижних и верхних частот, преобразователи и цифровой осциллограф (Tektronix TDS 2012C), передатчик (Shantou Institute of Ultrasonic Instruments Co, SIUI 2.25P14) и преобразователи приемника (SIUI 3.5P14) на примере реконструкции городской газораспределительной сети, длина которой составляет 10,32 км, с 15 прямыми ПЭ трубами, 65 отводами, 72 переходами, 14 заглушками (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Параметры ПЭ трубопровода (по данным автора)

Внутренний диаметр (мм)	Внешний диаметр (мм)	Толщина (мм)	Испытательная частота (МГц)	Глубина фокуса (мм)
75.2±0.23	79.7±0.23	4,5	6.5~7.6	3~7
75.1±0.42	80.7±0.42	5,6	5.6~7.3	5~10
75.15±0.62	81.95±0.62	6,8	6.1~7.4	6~11
75.05±0.15	83.45±0.15	8,4	6.3~7.2	8~12
75.25±0.16	85.35±0.16	10,1	6.6~7.8	9~13

После получения информации о ПЭ трубопроводе необходимо определить параметры линейного передатчика направленной волны, и конкретные результаты (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Параметры линейных направленных волн [106]

Тип устройства	Частота излучения (МГц)	Увеличение (время)	Допустимая частота (МГц)	Точность теста (%)	Угол сканирования (°)	Скорость волны (м/с)
Эджилент	6~14	5.32	3~16	1	20~70	(-2341,+2457)
HFVA-41 Усилитель мощности	8~16	6.25	6~18	1	30~80	(-3121,+3417)
REKHF Пьезоэлектрический усилитель	10~19	5.62	8~20	10	20~75	(-2611,+2737)

Примечание: + означает поперечную волну, - означает продольную волну.

В соответствии с параметрами, указанными в таблицах 4.1, 4.2 компоненты амплитуды и дисперсии анализируются с использованием карты регистрации линейно направленных волн и вспомогательного программного обеспечения. При этом установлен норматив оценки повреждения ПЭ трубопровода, результаты которого приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Параметры, соответствующие степени повреждения [106]

Параметры повреждений	Статус повреждения					
	1	2	3	4	5	6
Степень повреждения (оценка)	I	III	IV	VI	IV	VV
Глубина повреждения (мм)	0~0.5	0.5~1	1~1.5	1.5~2	2~2.5	2.5~3

При этом эталонная частота приемника соответствует трем уровням: 1~2МГц, 2~3МГц и 3~4МГц [106]. При разных стандартах частоты существует три режима: продольный режим, режим изгиба и режим кручения [89].

Оценка повреждения ПЭ трубопроводов основана на амплитуде и дисперсии направленных волн, поэтому необходимо проанализировать место повреждения и получить результаты реагирования. По критериям, приведенным в таблице 4.3, было получено изменение амплитуды повреждения ПЭ трубопровода по графику, (рисунок 4.2).

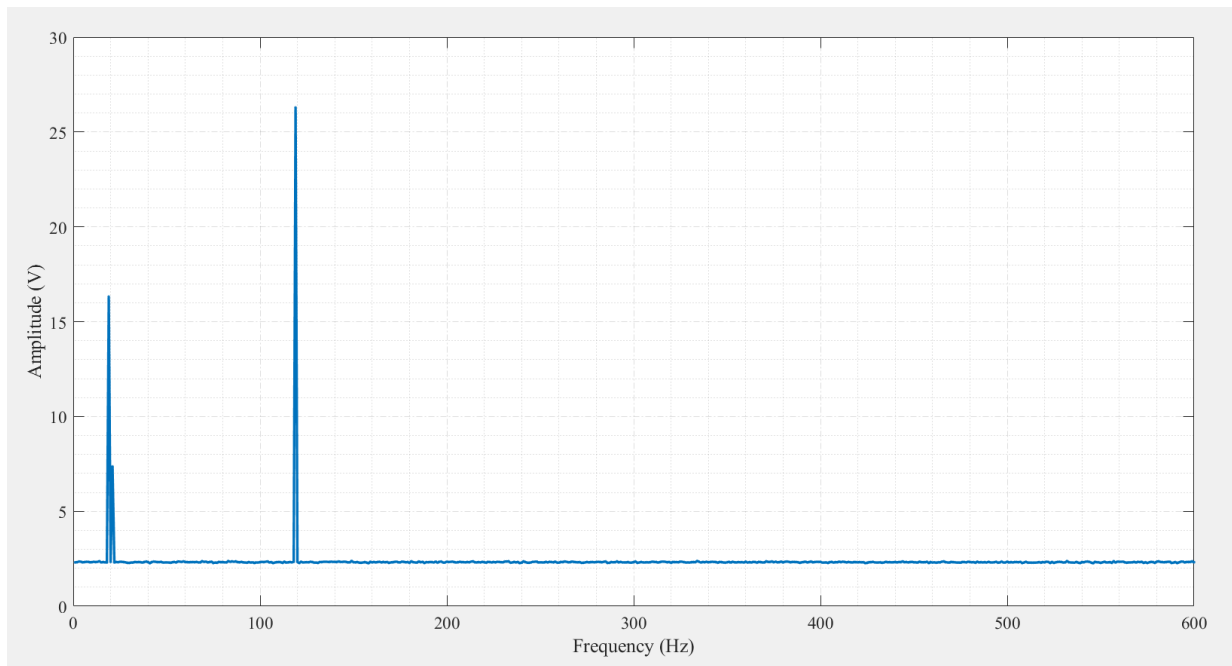


Рисунок 4.2 – Получение спектра сигнала повреждения (составлено автором)

По усилению спектра установлено, что линейно направленная волна имеет концентрированное пиковое значение, а амплитуда третьей гармоники выше, чем у второй гармоники. Причин вышеуказанного явления много. Одна из возможностей состоит в том, что скорость затухания третьей гармоники в газораспределительной полиэтиленовой трубе меньше, чем скорость затухания второй гармоники [89]. Другая возможность состоит в том, что эффект приема третьей гармоники лучше, и амплитуда изменяется больше [106]. Третья возможность заключается в том, что третья гармоника более чувствительна к конструкции полиэтиленового трубопровода. После полученного сигнала (рисунок 4.2) результаты преобразованы по формуле (4.4), и полученные изменения амплитуды при различных состояниях повреждения представлены на графике (рисунок 4.3).

По полученным результатам (рисунок 4.3) видно, что амплитуда гармоники изменяется с увеличением ширины при различных состояниях поврежденности. Передаваемый сигнал неравномерно флуктуирует по амплитуде волны второй гармоники, причем очевидного закона нет [89]. Причиной того, что амплитуда второй гармоники не проявляет явной закономерности с ростом поврежденности, может быть то, что третья гармоника менее чувствительна к повреждению полиэтиленового трубопровода [11].

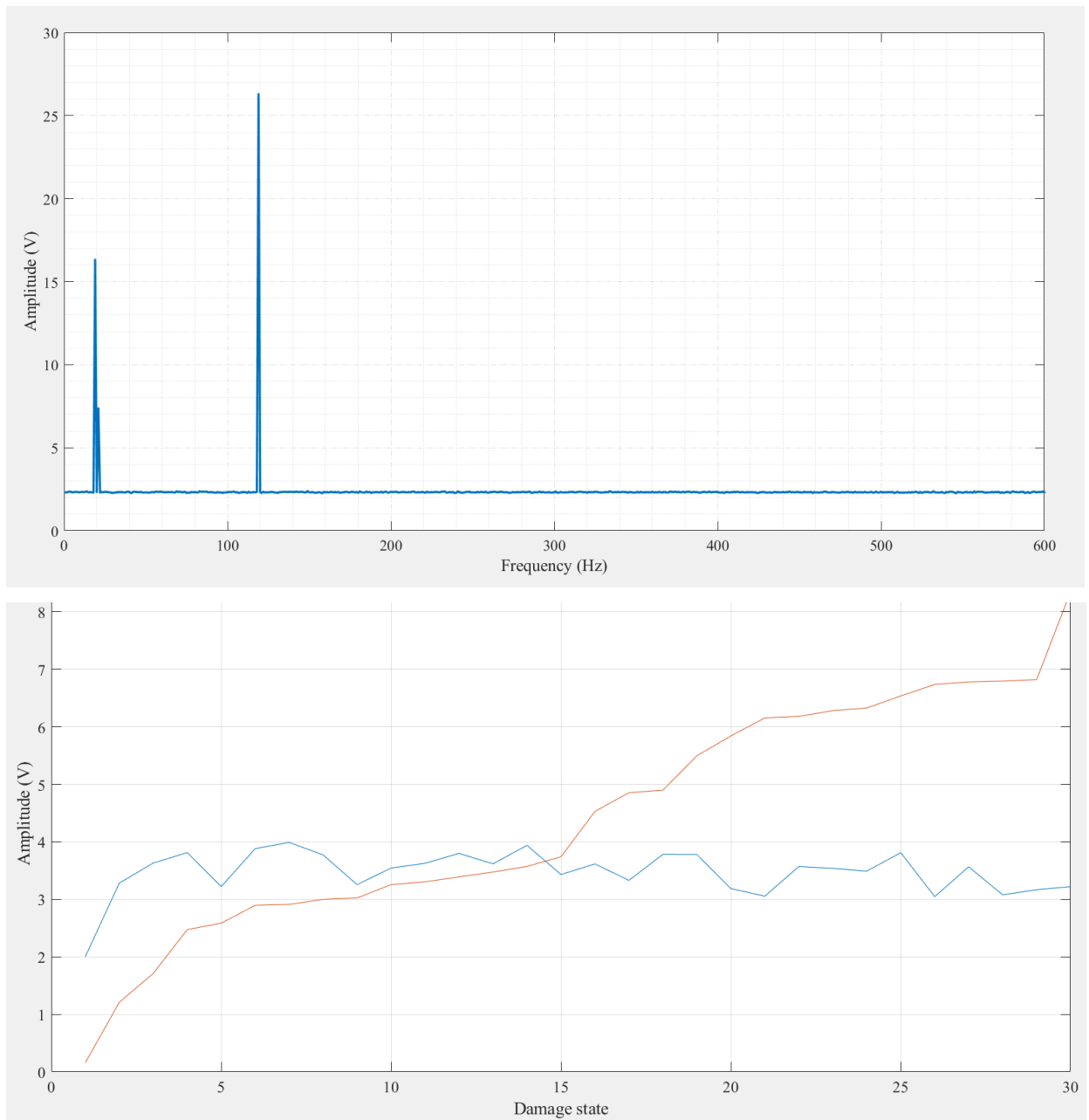


Рисунок 4.3 – Изменение амплитуды второй и третьей гармоник
(составлено автором)

Амплитуда второй гармоники увеличивается с увеличением состояния повреждения из-за увеличения скорости рассеяния, вызванного повреждением ПЭ трубопровода. Кроме того, скорость рассеяния линейно направленной волны в месте повреждения выше, что приводит к большему количеству принимаемых гармоник, которая проверяет эффективность линейно направленных волн при оценке повреждений ПЭ трубопровода. Однако тенденция роста амплитуды третьей гармоники не имеет закономерности и представляет собой флуктуирующие изменения, в основном из-за того, что поток газа в

газораспределительной сети будет влиять на волновую проводимость среды при различных повреждениях. Кроме того, угловая частота линейно направленной волны и режим трубопровода будут влиять на проводимость направленной волны, а затем каждый раз влиять на принимаемый сигнал возбуждения и вызывать разную степень изменения амплитуды.

4.3 Рекомендации по оценке повреждения полиэтиленового трубопровода в газораспределительной сети

Согласно информации о спектре, на графике (рисунок 4.4) были извлечены составляющие разностной частоты, составляющая суммарной частоты, значение энергии и энергетический коэффициент линейной направленной волны (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Частота сигнала возбуждения и компонента бокового лепестка (единицы измерения: Гц) [106]

Группа сигналов стимула	1	2	3
Высокочастотные сигналы возбуждения	120	220	320
Низкочастотный сигнал возбуждения	100	200	300
Суммарный частотный сигнал	80	180	280
Сигнал разностной частоты	140	240	340

Значения эталонной частоты (таблица 4.4) обеспечивают лучшую характеристику сигнала (рисунок 4.4). Сигналы группы 2 и группы 3 на графиках (рисунок 4.4) мало изменяются в амплитуде разностной частоты и амплитуде суммарной частоты при одном и том же повреждении, и в целом наблюдается нисходящий тренд вверх и вниз. Из разностной частотной составляющей видно, что частоты высокой и низкой частоты близки, а разностные частоты, создаваемые в полиэтиленовом трубопроводе, аналогичны, поэтому разные частоты имеют разные результаты оценки повреждения ПЭ трубопровода, а высокие и низкие частоты могут быть выбраны в соответствии с повреждением трубопровода. В то же время, в различных группах сигналов возбуждения, разностная частотная составляющая и суммарная частотная составляющая флуктуаций имеют тенденцию быть согласованными, а более поздние флуктуации более мягкие, главным образом потому, что значения энергии имеют нелинейную направленную

волну каждой группы, что говорит о последовательности затухания в более позднем периоде.

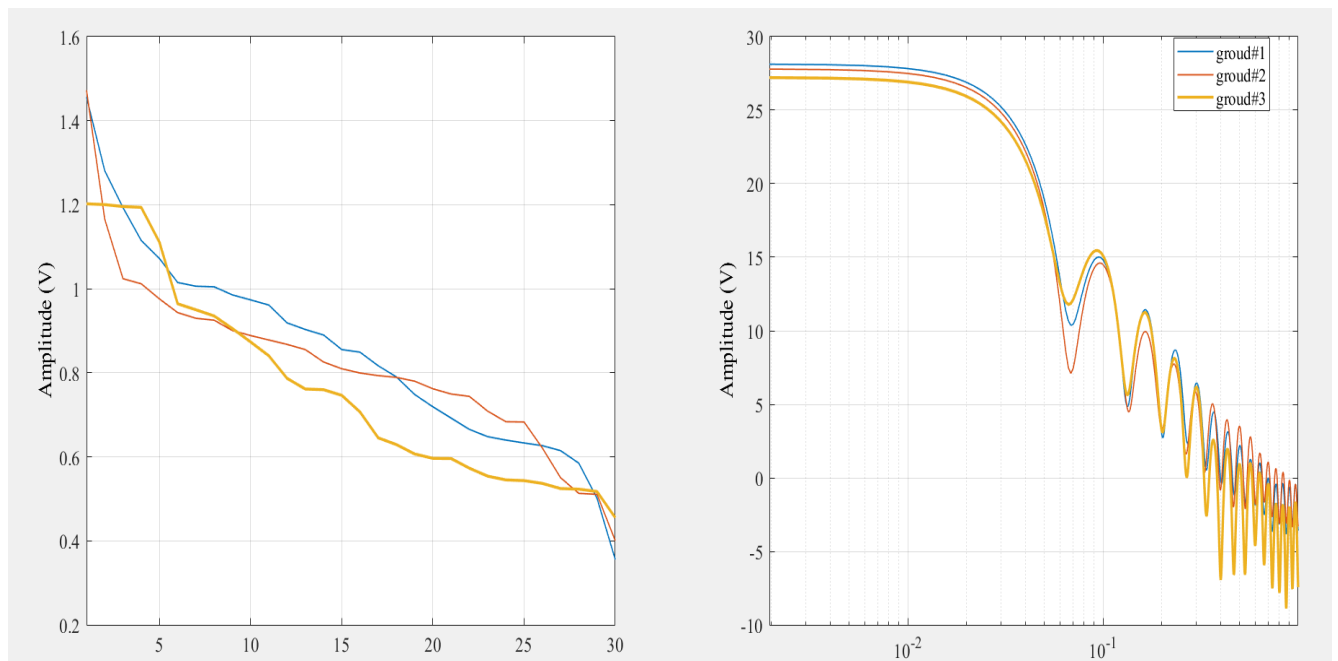


Рисунок 4.4 – Амплитудное изменение составляющей суммарной частоты и составляющей разностной частоты (составлено автором)

Таким образом, для оценки повреждений ПЭ трубопроводов можно использовать различные сигналы возбуждения, суммарную частоту и разностную частотную составляющую исходя из параметров (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Результаты оценки повреждения полиэтиленового трубопровода различными методами [106]

Компонент области действия	Нелинейные направленные волны		Линейные направленные волны	
	Точность (%)	Время (min)	Точность (%)	Время (min)
Трубопровод	93.34	4.41	88.33	4.32
	94.37	5.23	88.39	5.36
	92.33	6.24	85.34	6.42
Приложение	92.14	11.34	88.33	10.23
	91.27	8.25	88.32	9.25
	90.23	4.32	84.32	4.63
	99.31	5.23	85.34	5.12

Как видно из таблицы 4.5, между линейно направленной волной и, например, нелинейно направленной волной нет существенной разницы во времени расчета, но линейная направленная волна выше по точности. Причина в том, что при прохождении направленной волны через место повреждения амплитуда дисперсии и угловая частота малы, что не приводит к существенной разнице амплитуд

принимаемых сигналов, особенно трещин, усталости, ползучести и степени сцепления. Поскольку скорость затухания направленной волны низкая, энергия и энергетический коэффициент волны проводимости мало изменяются после прохождения через поврежденное место, поэтому ее невозможно идентифицировать в точке приема. Затухание энергии линейных направленных волн происходит быстрее, а разница между разными и суммарными частотами более заметна.

4.6 Выводы по главе 4

В данной главе предлагаются рекомендации по оценке повреждений ПЭ трубопровода в газораспределительной сети методом линейно направленных волн и проверялась рациональность данного метода:

1. Анализировались повреждения ПЭ трубопровода принимая в качестве основных показателей наблюдения амплитуды, суммарную частотную составляющую и разностную частотную составляющую линейно направленной волны.

2. Результаты показали, что амплитуда волны второй гармоники линейно направленной волны изменяется закономерно и пропорционально размеру повреждения трубопровода.

3. Суммарная частотная и разностная частотные составляющие обратно пропорциональны повреждению трубопровода.

4. Индексы могут отражать повреждение ПЭ трубопровода, что подтверждает рациональность оценки повреждения линейно направленной волной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной задачи по повышению эффективности ранней оценки повреждений полиэтиленовых труб на основе линейно направленных волн.

1. Разработана методика раннего выявления и оценки повреждений полиэтиленовых трубопроводов, основанная на использовании линейно-направленных волн и анализе характеристик направлений рассеяния волновых откликов от дефектов различной природы

2. Разработана система анализа, типизации волновых откликов дефектов с помощью программы, что может быть применено для соответствующего программно-аппаратного решения предложенной системы рефлексной дефектоскопии. Преимуществом является потенциал к раннему выявлению последствий деструктивных процессов в ПЭ трубопроводах.

3. Установлено, что амплитуда волны второй гармоники, возникающей при распространении линейно-направленной волны и отражения от дефекта в полиэтиленовом трубопроводе находится в прямой пропорциональной зависимости от степени повреждения материала трубопровода, что позволяет использовать данный параметр в качестве диагностического признака.

4. Для соединений ПЭ, дефектность которых проявляется в поглощении ультразвуковых волн (β) в интервале 40%–80%, установлено почти линейная монотонная зависимость.

5. Разработан программный модуль для ЭВМ, реализующий предложенный метод ранней оценки повреждений и методические рекомендации по его практическому применению.

Перспективы дальнейшего развития исследования заключаются в совершенствовании существующих и новых технических решений по определению влияния линейно направленных волн на нелинейность волны в среде распространения при встрече с дефектом и деградационными процессами структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Более точная классификация дефектов с технологией (GWT) длинноволнового метода контроля // NDT Solutions : сайт. – URL: <https://ndt-solutions.by/articles/Application/bole-tochnaya-klassifikatsiya-defektov-s-tekhnologiy-gwt-dlinnovolnovogo-metoda-kontrolya/> (дата обращения: 29.06.2025). – Текст : электронный.
2. Бондаренко, П. М. Новые методы и средства контроля состояния подземных труб / П. М. Бондаренко. – Москва : Машиностроение, 2008. – С. 74.
3. Будунув, М. А. Применение полимерных труб при строительстве газопровода / М. А. Будунув, Т. В. Федюнина // Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения. – 2022. – С. 23–26.
4. Волков, Д. С. Напряженно-деформированное состояние участка магистрального газопровода Бованенково – Ухта подводного перехода через Байдарацкую губу после всплытия / Д. С. Волков, И. Л. Сарычев, А. С. Кузьбожев, И. Н. Бирилло, И. В. Шишкин. – DOI 10.32935/1815-2600-2022-140-3-60-64 // Технологии нефти и газа. – 2022. – № 3 (140). – С. 60–64.
5. Волков, Д. С. Техническое состояние магистрального газопровода Бованенково – Ухта на подводном переходе через Байдарацкую губу / Д. С. Волков, И. Л. Сарычев, А. С. Кузьбожев, И. Н. Бирилло, И. В. Шишкин // Технологии нефти и газа. – 2022. – № 2 (139). – С. 62–64.
6. ГОСТ Р 54983–2012. Системы газораспределительные. Сети газораспределения природного газа. Общие требования к эксплуатации. Эксплуатационная документация : национальный стандарт Российской Федерации. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095364> (дата обращения: 21.06.2025). – Текст : электронный.
7. Казаков, В. В. Нелинейная акустическая диагностика трещин в стержнях и пластинах : препринт № 498 ИПФ РАН / В. В. Казаков, А. М. Сутин, А. Э. Екимов. – Нижний Новгород : Институт прикладной физики РАН, 1999. – 32 с.

8. Муравьева, О. В. Крутильные волны, возбуждаемые электромагнитно-акустическими преобразователями, при акустическом волноводном контроле трубопроводов / О. В. Муравьева, С. В. Ленков, С. А. Мурашов. – DOI 10.7868/S032079191506009X // Акустический журнал. – 2016. – Т. 62, № 1. – С. 117–124.
9. Орехова, Ю. А. Использование инновационных технологий и материалов в транспортировке природного газа / Ю. А. Орехова, И. В. Орехова, Ю. С. Матвеева // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности. – 2020. – С. 139–141.
10. Палаев, А. Г. Обоснование возможности применения метода на основе акустических линейных направленных волн для оценки повреждений полиэтиленовых труб газораспределительной сети / А. Г. Палаев, **И. Тянь**, Ф. Чжао, Б. Ван, Х. Цянь // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2023. – № 3–4. – С. 18–22. – DOI 10.24412/0131-4270-2023-3-4-18-22
11. Палаев, А. Г. Ранняя оценка повреждений полиэтиленовых трубопроводов на основе линейных направленных волн / А. Г. Палаев, **И. Тянь**, Ц. Ван, Т. Хуан // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2024. – № 3–4. – С. 23–31. – DOI 10.24412/0131-4270-2024-3-4-23-31
12. Палаев, А. Г. Сравнительное исследование методов локализации подземных полиэтиленовых трубопроводов / А. Г. Палаев, Ф. Чжао, И. Тянь, Б. Ван, М. Шао. – DOI 10.24412/0131-4270-2023-3-4-23-27 // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2023. – № 3–4. – С. 23–27.
13. Патент № 2080592 Российская Федерация, МПК G01N 29/00. Ультразвуковая антенная решетка в виде двухмерной матрицы : № 94006268/28 : заявлено 21.02.1994 : опубликовано 27.05.1997 / В. Н. Козлов, А. А. Самокрутов, В. Г. Шевалдыкин ; патентообладатель ООО «Фирма АКС». – 3 с.
14. Патент № 2515957 Российская Федерация, МПК G01N 29/04 (2006.01). Комплекс для ультразвукового контроля изделий и оптическое измерительное устройство комплекса : № 2012147687/28 : заявлено 09.11.2012 : опубликовано

20.05.2014 / А. А. Самокрутов, В. Г. Шевалдыкин, А. М. Станкевич [и др.] ; патентообладатель ООО «Акустические Контрольные Системы». – 7 с.

15. Патент № 2629896 Российская Федерация, МПК G01N 29/04 (2006.01). Способ ультразвукового контроля трубопровода и система для его осуществления : № 2016138509 : заявлено 29.09.2016 : опубликовано 04.09.2017 / А. А. Самокрутов, Ю. А. Седелев, С. Ю. Воронихин [и др.] ; патентообладатель ЗАО «ИнтроСкан Технолоджи». – 9 с.

16. Патент № 2822296 Российская Федерация, МПК G01N 29/04 (2024.01). Устройство автоматизированного ультразвукового обнаружения дефектов на поверхности трубопроводов. Заявка № 2024109418: заявл. 08.04.2024: опубл. 04.07.2024 / А.Г. Палаев, **Ифань Тянь**, И.М. Ландышев; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 13 с.: ил.

17. Патент № CN208206874U Китай, МПК G01N 29/04. Ultrasonic pipeline defect detection device : заявлено 23.05.2018 : опубликовано 07.12.2018 / Wang Jian, Li Qiang, Zhang Wei [et al.] ; applicant Taizhou Cheng An Nondestructive Testing Co., Ltd. – 8 p.

18. Патент № CN211825846U Китай, МПК G01N 29/04. Pipeline polyethylene pipe defect detection device : заявлено 21.01.2020 : опубликовано 30.10.2020 / Xu Guohua, Wang Wei, Li Zhigang [et al.] ; applicant Daqing Zhongdaxin Testing Engineering Service Co., Ltd. – 9 p.

19. Сарычев, И. Л. Анализ опасности бокового оголения газопровода / И. Л. Сарычев, А. С. Кузьбожев, И. Н. Бирилло, И. В. Шишкин. – DOI 10.32935/1815-2600-2023-147-4-39-44 // Технологии нефти и газа. – 2023. – № 4 (147). – С. 39–44.

20. Суслов, А. В. Акустический метод определения толщины отложений в технологическом оборудовании / А. В. Суслов. – DOI 10.18287/2541-7525-2025-31-1-83-92 // Вестник Самарского университета. Естественная серия. – 2025. – Т. 31, № 1. – С. 83–92.

21. Суслов, А. В. Исследование влияния температурных напряжений на собственные колебания пластин / А. В. Суслов, Е. Е. Ярославкина. – DOI 10.18287/2541-7525-2024-30-2-45-53 // Вестник Самарского университета. Естественная серия. – 2024. – Т. 30, № 2. – С. 45–53.

22. Тянь, И. Обоснование возможности применения метода ранней оценки повреждений полиэтиленовых труб на основе линейных направленных волн / **И. Тянь**, А. Г. Палаев // Трубопроводный транспорт – 2023 : Тезисы докладов XVIII Международной научно-практической конференции, Уфа, 16-17 ноября 2023 года. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2023. – с. 282-283.

23. **Тянь, Ифань** Метод ранней оценки повреждений трубопроводов на основе линейных направленных волн / **Ифань Тянь**, А. Г. Палаев // Актуальные проблемы транспорта и хранения углеводородных ресурсов при освоении Арктики и Мирового Океана : Материалы Международной научно-технической конференции, Тюмень, 07-08 ноября 2023 года. – Тюмень: ТИУ, 2023. – с. 200-204.

24. Шайхлисламов, А. Г. Изучение ассортимента полиэтиленовых газопроводов / А. Г. Шайхлисламов, И. И. Шарафутдинов // Природопользование и устойчивое развитие регионов России : сборник статей. – Пенза, 2021. – С. 214–218.

25. Шредер, А. С. Акустический расчет технологических трубопроводов компрессорной станции для оценки низкочастотных пульсаций давления в тупиковых ответвлениях / А. С. Шредер, О. А. Курасов, П. В. Бурков, А. Н. Гаврилин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336, № 1. – С. 206–214.

26. Шредер, А. С. Негативное воздействие вибрации на технологические трубопроводы компрессорной станции с электроприводными газоперекачивающими агрегатами / А. С. Шредер, О. А. Курасов, П. В. Бурков, А. Н. Гаврилин, Д. В. Ермаков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335, № 10. – С. 167–177.

27. Aleksander, G.P. Predicting Service Life of Polyethylene Pipes under Crack Expansion using «Random Forest» Method / G.P. Aleksander, **T. Yifan**, Z. Fuming // International Journal of Engineering. Transactions C: Aspects. – Vol. 36, No. 12. – P. 2243–2252. DOI: 10.5829/ije.2023.36.12c.14.
28. Almeida, F. C. L. Towards an in-situ measurement of wave velocity in buried plastic water distribution pipes for the purposes of leak location / F. C. L. Almeida, M. J. Brennan, P. F. Joseph, S. Dray, S. Whitfield, A. T. Paschoalini. – DOI 10.1016/j.jsv.2015.06.015 // Journal of Sound and Vibration. – 2015. – Vol. 359. – P. 40–55.
29. Bach, P. M. Reliability of Infrared Thermography in Detecting Leaks in Buried Water Reticulation Pipes / P. M. Bach, J. K. Kodikara. – DOI 10.1109/JSTARS.2017.2708817 // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2017. – Vol. 10, № 9. – P. 4210–4224.
30. Baghalian, A. Implementation of the Surface Response to Excitation Method for Pipes / A. Baghalian, S. Tahakori, H. Fekrmandi, M. Unal, V. Y. Senyurek, D. McDaniel, I. N. Tansel. – DOI 10.1007/978-3-319-41766-0_31 // Mechanics of Composite and Multi-functional Materials, Volume 7 : Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series / ed. by W. C. Ralph [et al.]. – Cham : Springer, 2017. – P. 261–266.
31. Barile, C. Sound Waves and Acoustic Emission / C. Barile, C. Casavola, G. Pappalettera, V. P. Kannan. – Cham : Springer Nature, 2023. – DOI 10.1007/978-3-031-23789-8.
32. Chalasani, S. Buried Pipes Detection through Ground Penetrating Radar Images / S. Chalasani, T. Srinivasarao // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 8, № 12. – P. 61–68. – URL: <http://www.iaeme.com/IJMET/issues.asp?JType=IJMET&VType=8&IType=12> (дата обращения: 22.06.2025). – Текст : электронный.
33. Chen, H. Rainfall estimation from ground radar and TRMM Precipitation Radar using hybrid deep neural networks / H. Chen, V. Chandrasekar, H. Tan, R. Cifelli.

– DOI 10.1029/2019GL084771 // *Geophysical Research Letters*. – 2019. – Vol. 46. – P. 10669–10678.

34. Chen, K.-T. The study of an adaptively active control on the acoustic propagation in a pipe / K.-T. Chen, Y. H. Chen, W. J. Hsueh, J. N. Wang, Y. H. Liu. – DOI 10.1016/S0003-682X(97)00103-5 // *Applied Acoustics*. – 1998. – Vol. 55, № 1. – P. 53–66.

35. Chen, L. L. Application of tracer method in underground pipeline exploration under complicated conditions / L. L. Chen // *Science and Technology of West China*. – 2011. – Vol. 10, № 25. – P. 22–23. – На кит. яз.

36. Chowdhury, M. S. Pipeline Inspection Gauge Position Estimation Using Inertial Measurement Unit, Odometer, and a Set of Reference Stations / M. S. Chowdhury, M. F. Abdel-Hafez. – DOI 10.1115/1.4030945 // *Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*. – 2016. – Vol. 2, № 2. – Article 021001.

37. CJJ 61–2017. Technical specification for urban underground pipeline detection : industry standard of the People's Republic of China / prepared by Beijing Surveying and Mapping Technology Design and Research Institute. – Beijing, 2017. – Текст : непосредственный. – На кит. яз.

38. Cui, Z. A review on image reconstruction algorithms for electrical capacitance/resistance tomography / Z. Cui, Q. Wang, Q. Xue, W. Fan, L. Zhang, Z. Cao, B. Sun, H. Wang, W. Yang. – DOI 10.1108/SR-01-2016-0027 // *Sensor Review*. – 2016. – Vol. 36, № 4. – P. 429–445.

39. Darma, P. N. Improvement of image reconstruction in electrical capacitance tomography (ECT) by sectorial sensitivity matrix using a K-means clustering algorithm / P. N. Darma, M. R. Baidillah, M. W. Sifuna [et al.]. – DOI 10.1088/1361-6501/ab1022 // *Measurement Science and Technology*. – 2019. – Vol. 30, № 7. – Article 075402.

40. Das, S. Nonlinear Time-Dependent Mechanical Behavior of Medium-Density Polyethylene Pipe Material / S. Das, A. S. Dhar. – DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003695 // *Journal of Materials in Civil Engineering*. – 2021. – Vol. 33, № 5. – Article 04021068.

41. Deblieck, R. A. C. A simple intrinsic measure for rapid crack propagation in bimodal polyethylene pipe grades validated by elastic-plastic fracture mechanics analysis of data from instrumented Charpy impact test / R. A. C. Deblieck, D. J. M. L. van Beek, M. McCarthy, P. Mindermann, K. Remerie, B. Langer, R. Lach, W. Grellmann. – DOI 10.1002/pen.24380 // Polymer Engineering & Science. – 2017. – Vol. 57, № 1. – P. 13–21.
42. Desai, P. R. Assessment of Scour Progression Using Ultrasonic Guided Waves for Active Scour Monitoring : master's thesis / P. R. Desai. – San Diego : University of California, San Diego, 2023. – URL: <https://www.proquest.com/openview/3ae928f339bd77cee506a7c9525e890d/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y> (дата обращения: 22.05.2025). – Текст : электронный.
43. Diogo, A. R. A review of signal processing techniques for ultrasonic guided wave testing / A. R. Diogo, B. Moreira, C. A. Gouveia, J. M. R. Tavares. – DOI 10.3390/met12060936 // Metals. – 2022. – Vol. 12, № 6. – Article 936.
44. Dou, Q. 3D Buried Utility Location Using A Marching-Cross-Section Algorithm for Multi-Sensor Data Fusion / Q. Dou, L. Wei, D. R. Magee, P. R. Atkins, D. N. Chapman, G. Curioni, K. F. Goddard, F. Hayati, H. Jenks, N. Metje, J. Muggleton, S. R. Pennock, E. Rustighi, S. G. Swinger, C. D. F. Rogers, A. G. Cohn. – DOI 10.3390/s16111827 // Sensors. – 2016. – Vol. 16, № 11. – Article 1827.
45. Egerton, J. S. Ultrasonic attenuation and phase velocity of high-density polyethylene pipe material / J. S. Egerton, M. J. S. Lowe, P. Huthwaite, H. V. Halai. – DOI 10.1121/1.4976689 // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2017. – Vol. 141, № 3. – P. 1535–1545.
46. Electromagnetic Testing (ET) & Eddy Current Testing / American Society for Nondestructive Testing // ASNT : site. – URL: <https://www.asnt.org/what-is-nondestructive-testing/methods/electromagnetic-testing> (дата обращения: 16.06.2026). – Текст : электронный.
47. Evangelidis, M. High Definition Electrical Capacitance Tomography for Pipeline Inspection / M. Evangelidis, L. Ma, M. Soleimani. – DOI

10.2528/PIER13041305 // Progress In Electromagnetics Research. – 2013. – Vol. 141. – P. 1–15.

48. Feng, B. A Review of Magnetic Flux Leakage Nondestructive Testing / B. Feng, S. Liu [et al.]. – DOI 10.3390/s22197362 // Sensors. – 2022. – Vol. 22, № 19. – Article 7362.

49. Fuchs, H. V. Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis / H. V. Fuchs, R. Riehle. – DOI 10.1016/0003-682X(91)90062-J // Applied Acoustics. – 1991. – Vol. 33, № 1. – P. 1–19.

50. Gao, Y. An analytical model of ground surface vibration due to axisymmetric wave motion in buried fluid-filled pipes / Y. Gao, J. M. Muggleton, Y. Liu, E. Rustighi. – DOI 10.1016/j.jsv.2017.02.022 // Journal of Sound and Vibration. – 2017. – Vol. 395. – P. 142–159.

51. Gao, Y. Axisymmetric fluid-dominated wave in fluid-filled plastic pipes: Loading effects of surrounding elastic medium / Y. Gao, Y. Liu, J. M. Muggleton. – DOI 10.1016/j.apacoust.2016.09.016 // Applied Acoustics. – 2017. – Vol. 116. – P. 43–49.

52. Gao, Y. Ground surface vibration due to axisymmetric wave motion in buried fluid-filled pipes / Y. Gao, J. M. Muggleton, E. Rustighi [et al.] // International Congress on Sound and Vibration : proceedings, Florence, Italy, July 12–16, 2015. – Florence, 2015. – P. 1–8. – URL: https://english.cas.cn/newsroom/archive/research_archive/rp2015/201509/W020150928445742701071.pdf (дата обращения: 22.06.2025). – Текст : электронный.

53. Guan, R. Guided waves for damage identification in pipeline structures: A review / R. Guan, Y. Lu, W. Duan, X. Wang. – DOI 10.1002/stc.2007 // Structural Control and Health Monitoring. – 2017. – Vol. 24, № 11. – Article e2007.

54. Guo, Z. Study on Preparation of Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene Pipe of Good Thermal-Mechanical Properties Modified with Organo-Montmorillonite by Screw Extrusion / Z. Guo, R. Xu, P. Xue. – DOI 10.3390/ma13153342 // Materials. – 2020. – Vol. 13, № 15. – Article 3342.

55. Hagglund, F. A novel phased array ultrasonic testing (PAUT) system for on-site inspection of welded joints in plastic pipes / F. Hagglund, M. Robson, M. J.

Troughton, W. Spicer, I. R. Pinson // 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014) : proceedings, Prague, Czech Republic, October 6–10, 2014. – Prague, 2014.

56. Harkat, H. GPR target detection using a neural network classifier designed by a multi-objective genetic algorithm / H. Harkat, A. E. Ruano, M. G. Ruano, S. D. Bennani. – DOI 10.1016/j.asoc.2019.03.030 // Applied Soft Computing. – 2019. – Vol. 79. – P. 310–325.

57. Hoarau, Q. Robust adaptive detection of buried pipes using GPR / Q. Hoarau, G. Ginolhac, A. M. Atto, J. M. Nicolas. – DOI 10.1016/j.sigpro.2016.07.001 // Signal Processing. – 2017. – Vol. 132. – P. 293–305.

58. Hu, B. Experimental study on the corrosion testing of a buried metal pipeline by transient electromagnetic method / B. Hu, R. Yu, J. Liu. – DOI 10.1108/ACMM-10-2014-1444 // Anti-Corrosion Methods and Materials. – 2016. – Vol. 63, № 4. – P. 262–268.

59. Hu, L. Non-contact subsurface thermography for high-temperature metallic structures using laser ultrasound and wave-equation-based inversion / L. Hu, P. Zuo, Z. Sun, Z. Fan. – DOI 10.1016/j.ymssp.2023.110378 // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2023. – Vol. 197. – Article 110378.

60. Huang, S. Research on acoustic wave attenuation from the perspective of soil particle movement using the discrete element method / S. Huang, C. Lu, H. Li, J. He, Q. Wang, X. Cao [et al.]. – DOI 10.1016/j.compag.2023.107747 // Computers and Electronics in Agriculture. – 2023. – Vol. 207. – Article 107747.

61. Huber, B. J. Capacitive tomography for the location of plastic pipe / B. J. Huber ; Gas Technology Institute. – 2002. – 55 p. – URL: <https://netl.doe.gov/sites/default/files/2018-06/793997.pdf> (дата обращения: 22.05.2025). – Текст : электронный.

62. Inguva, V. An explicit symplectic approach to solving the wave equation in moving media / V. Inguva, N. Feldmann, L. Claes, T. Koturbash, T. Hahn-Jose, V. Koutcherov, E. Y. Kenig. – DOI 10.1002/eng2.12573 // Engineering Reports. – 2023. – Vol. 5, № 3. – Article e12573.

63. Istrate, I.-R. Environmental life cycle assessment of the incorporation of recycled high-density polyethylene to polyethylene pipe grade resins / I.-R. Istrate, R. Juan, M. Martin-Gamboa [et al.]. – DOI 10.1016/j.jclepro.2021.128580 // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 319. – Article 128580.

64. Karami, M. Review of corrosion role in gas pipeline and some methods for preventing it / M. Karami. – DOI 10.1115/1.4006124 // Journal of Pressure Vessel Technology. – 2012. – Vol. 134, iss. 5. – P. 1–5.

65. Katz, A. Innovative and Effective Techniques for Locating Underground Conduits : report / A. Katz, F. Karaa, E. Niver ; University Transportation Research Center. – New Jersey : University Transportation Research Center, 2011. – URL: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/23251> (дата обращения: 22.05.2025). – Текст : электронный.

66. Kavi, J. Detection of buried FRP composite pipes using ground penetrating radar / J. Kavi, U. B. Halabe, H. V. S. GangaRao // Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology. – 2020. – Vol. 6, № 7. – P. 10479–10484. – URL: <https://orcid.org/0000-0003-4695-9340> (дата обращения: 22.06.2025). – Текст : электронный.

67. Khokhlova, V. The Localization of Buried Objects in the Soil Using an RFID Tag: Protocol Description and Parameter Estimation With the Model of the Oscillating Magnetic Field in Media / V. Khokhlova, E. Delevoye. – DOI 10.1109/TMAG.2019.2898840 // IEEE Transactions on Magnetics. – 2019. – Vol. 55, № 5. – Article 6500616. – P. 1–16

68. Kim, H. M. A New Design of MFL Sensors for Self-Driving NDT Robot to Avoid Getting Stuck in Curved Underground Pipelines / H. M. Kim, H. R. Yoo, G. S. Park. – DOI 10.1109/TMAG.2018.2846283 // IEEE Transactions on Magnetics. – 2018. – Vol. 54, № 11. – Article 6202705. – P. 1–5.

69. Latête, T. Towards using convolutional neural network to locate, identify and size defects in phased array ultrasonic testing / T. Latête, B. Gauthier, P. Belanger. – DOI 10.1016/j.ultras.2021.106436 // Ultrasonics. – 2021. – Vol. 115. – Article 106436.

70. Le, D. Reciprocity-based closed-form solutions to guided waves in multilayered structures subjected to time-harmonic excitations / D. Le, L. H. Le, H. Nguyen, E. L. C. M. Plan, H.-N. Tran, D. D. Nguyen, H. Phan. – DOI 10.1016/j.euromechsol.2023.105083 // European Journal of Mechanics – A/Solids. – 2023. – Vol. 102. – Article 105083.
71. Lin, J. Simulation of Seismic Wave Scattering by Embedded Cavities in an Elastic Half-Plane Using the Novel Singular Boundary Method / J. Lin, C. Z. Zhang, L. L. Sun, J. Lu. – DOI 10.4208/aamm.OA-2016-0187 // Advances in Applied Mathematics and Mechanics. – 2018. – Vol. 10, № 2. – P. 322–342.
72. Lissenden, C. J. Nonlinear ultrasonic guided waves: Principles for nondestructive evaluation / C. J. Lissenden. – DOI 10.1063/5.0038340 // Journal of Applied Physics. – 2021. – Vol. 129, № 2. – Article 021101.
73. Liu, Y. A Comprehensive Review of Acoustic Methods for Locating Underground Pipelines / Y. Liu, D. Habibi, D. Chai, X. Wang, H. Chen, Y. Gao, S. Li. – DOI 10.3390/app10031031 // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, № 3. – Article 1031.
74. Lobato de Almeida, F. C. Improved acoustic methods for leak detection in buried plastic water distribution pipes : doctoral thesis / F. C. Lobato de Almeida. – Southampton : University of Southampton, 2013. – URL: <https://eprints.soton.ac.uk/355964/> (дата обращения: 22.06.2025). – Текст : электронный.
75. Loke, M. H. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method / M. H. Loke, J. E. Chambers, D. F. Rucker, O. Kuras, P. B. Wilkinson. – DOI 10.1016/j.jappgeo.2013.02.017 // Journal of Applied Geophysics. – 2013. – Vol. 95. – P. 135–156.
76. Lowe, P. S. Application of Ultrasonic Guided Waves for Inspection of High Density Polyethylene Pipe Systems / P. S. Lowe, H. Lais, V. Paruchuri, T.-H. Gan. – DOI 10.3390/s20113184 // Sensors. – 2020. – Vol. 20, № 11. – Article 3184.
77. Makris, K. F. Sonic assessment of physical ageing of plastic pipes / K. F. Makris, J. G. Langeveld, F. H. Clemens-Meyer, J. Watts, H. Begum, K. V. Horoshenkov.

– DOI 10.1016/j.jsv.2022.117393 // Journal of Sound and Vibration. – 2023. – Vol. 544.
– Article 117393.

78. Mao, H. Detection of weld defects using ultrasonic-guided waves based on matching pursuit and density peak clustering / H. Mao, J. Ren, Y. Tang, H. Mao, Y. Chen, X. Yi [et al.]. – DOI 10.1177/01423312221140618 // Transactions of the Institute of Measurement and Control. – 2023. – Vol. 45, № 8. – P. 1470–1483.

79. Martini, A. Autocorrelation Analysis of Vibro-Acoustic Signals Measured in a Test Field for Water Leak Detection / A. Martini, A. Rivola, M. Troncosi. – DOI 10.3390/app8122450 // Applied Sciences. – 2018. – Vol. 8, № 12. – Article 2450.

80. Mishra, D. PIG [Pipe Inspection Gauge]: An Artificial Dustman for Cross Country Pipelines / D. Mishra, K. K. Agrawal, A. Abbas, R. Srivastava, R. S. Yadav. – DOI 10.1016/j.procs.2019.05.009 // Procedia Computer Science. – 2019. – Vol. 152. – P. 333–340.

81. Miura, S. Bi-rigid guide wire enables endoscope insertion into winding small gas pipelines / S. Miura, T. Nakagami, V. Parque, T. Miyashita. – DOI 10.1299/mej.20-00088 // Mechanical Engineering Journal. – 2020. – Vol. 7, № 4. – Article 20-00088.

82. Muggleton, J. M. “Mapping the Underworld”: recent developments in vibro-acoustic techniques to locate buried infrastructure / J. M. Muggleton, E. Rustighi. – DOI 10.1680/geolett.13.00032 // Géotechnique Letters. – 2013. – Vol. 3, № 3. – P. 137–141.

83. Muggleton, J. M. A shear wave ground surface vibration technique for the detection of buried pipes / J. M. Muggleton, B. Papandreou. – DOI 10.1016/j.jappgeo.2014.04.021 // Journal of Applied Geophysics. – 2014. – Vol. 106. – P. 164–172.

84. Muggleton, J. M. Determining the location of buried plastic water pipes from measurements of ground surface vibration / J. M. Muggleton, M. J. Brennan, Y. Gao. – DOI 10.1016/j.jappgeo.2011.06.030 // Journal of Applied Geophysics. – 2011. – Vol. 75, № 1. – P. 54–61.

85. Muggleton, J. M. Point vibration measurements for the detection of shallow-buried objects / J. M. Muggleton, M. J. Brennan, C. D. F. Rogers. – DOI

10.1016/j.tust.2012.02.006 // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2014. – Vol. 39. – P. 27–33.

86. Muggleton, J. M. The design and instrumentation of an experimental rig to investigate acoustic methods for the detection and location of underground piping systems / J. M. Muggleton, M. J. Brennan. – DOI 10.1016/j.apacoust.2007.08.007 // Applied Acoustics. – 2008. – Vol. 69, № 11. – P. 1101–1107.

87. Muggleton, J. M. Wavenumber prediction and measurement of axisymmetric waves in buried fluid-filled pipes: Inclusion of shear coupling at a lubricated pipe/soil interface / J. M. Muggleton, J. Yan. – DOI 10.1016/j.jsv.2012.10.024 // Journal of Sound and Vibration. – 2013. – Vol. 332, № 5. – P. 1216–1230.

88. Netzelmann, U. Induction thermography: principle, applications and first steps towards standardisation / U. Netzelmann, G. Walle, S. Lugin, A. Ehlen, S. Bessert, B. Valeske. – DOI 10.1080/17686733.2016.1145842 // Quantitative InfraRed Thermography Journal. – 2016. – Vol. 13, № 2. – P. 170–181.

89. Palaev, A. G. Method for Assessing Damage to Gas Distribution Network Pipelines Based on Nonlinear Guided Wave / A. G. Palaev, Z. Fuming, **T. Yifan** // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. – 2024. – Vol. 37, No. 5. – P. 852–859. – DOI 10.5829/ije.2024.37.05b.04

90. Papandreou, B. A study into the feasibility of using acoustic techniques to locate buried objects / B. Papandreou, E. Rustighi, M. J. Brennan. – Southampton : Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, 2008. – URL: <https://eprints.soton.ac.uk/65216/1/Pub10690.pdf> (дата обращения: 22.06.2025). – Текст : электронный.

91. Papandreou, B. On the detection of objects buried at a shallow depth using seismic wave reflections / B. Papandreou, M. J. Brennan, E. Rustighi. – DOI 10.1121/1.3552878 // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2011. – Vol. 129, № 3. – P. 1366–1374.

92. Pasadas, D. J. Automatic parameter selection for Tikhonov regularization in ECT Inverse problem / D. J. Pasadas, A. L. Ribeiro, H. G. Ramos, T. J. Rocha. – DOI

10.1016/j.sna.2016.05.019 // Sensors and Actuators A: Physical. – 2016. – Vol. 246. – P. 73–80.

93. Patadia, H. Rapid Crack Propagation (RCP) Performance of Unimodal Medium Density Polyethylene (MDPE) Pipe / H. Patadia, K. Lively, M. Lamborn [et al.]. – DOI 10.1002/j.1941-9635.2013.tb01002.x // Plastics Engineering. – 2013. – Vol. 69, № 5. – P. 12–17.

94. Patent No. US 11,235,456 B2 United States, Int. Cl. B25J 9/00, B25J 9/12, B25J 19/00 (2006.01). Securing device and method for operating a securing device : Appl. No. 16/551,904 : filed 27.08.2019 : patented 01.02.2022 / P. Bartsch, D. Brisse ; applicant M-ROBOT OHG. – 2 drawing sheets.

95. Patent No. US 9,874,521 B2 United States, Int. Cl. G01N 21/64, B01L 3/00 (2006.01). Detection plate : Appl. No. 14/909,281 : filed 19.08.2014 : patented 23.01.2018 / K. Nagatomi ; applicant Panasonic Intellectual Property Management Co., Ltd. – 11 drawing sheets.

96. Rahaman, A. Design and characterization of a MEMS piezoelectric acoustic sensor with the enhanced signal-to-noise ratio / A. Rahaman, C. H. Park, B. Kim. – DOI 10.1016/j.sna.2020.112087 // Sensors and Actuators A: Physical. – 2020. – Vol. 311. – Article 112087.

97. Sazesh, S. Vibration analysis of cantilever pipe conveying fluid under distributed random excitation / S. Sazesh, S. Shams. – DOI 10.1016/j.jfluidstructs.2019.03.018 // Journal of Fluids and Structures. – 2019. – Vol. 87. – P. 84–101.

98. Shafique, S. Application of differential equation in the field of acoustic / S. Shafique, N. Hina, M. A. Rana, A. Bano. – DOI 10.1088/1402-4896/acd088 // Physica Scripta. – 2023. – Vol. 98, № 6. – Article 065206.

99. Shah, J. Guided wave ultrasonic testing for crack detection in polyethylene pipes: laboratory experiments and numerical modeling / J. Shah, S. El-Hawwat, H. Wang. – DOI 10.3390/s23115131 // Sensors. – 2023. – Vol. 23, № 11. – Article 5131.

100. Shao, L. Research on High Temperature Region Segmentation of Infrared Pipeline Image Based on Improved Two-Dimensional-Otsu / L. Shao, Y. Zhang, J. Li, H.

Liu, X. Chen, X. Yu. – DOI 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)05-1637-06 // Spectroscopy and Spectral Analysis. – 2019. – Vol. 39, № 5. – P. 1637–1642.

101. Shao, M. Understanding the phase behavior during CO₂ flooding by dissipative particle / M. Shao, P. Alexander, Yu. Xia, H. Xu, **Y. Tian**, A.M. Shipachev, Zh. Yang // Journal of Molecular Liquids. – 2024. - Vol. 409. – P. 125514. DOI: 10.1016/j.molliq.2024.125514.

102. Shi, Y. Automated Classification of Ultrasonic Signal via a Convolutional Neural Network / Y. Shi, W. Xu, J. Zhang, X. Li. – DOI 10.3390/app12094179 // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, № 9. – Article 4179.

103. Sugimoto, T. Underground Imaging Using Shear Waves: Stacking Method of the Reflected Scattered Waves / T. Sugimoto, M. Okujima. – DOI 10.1143/JJAP.35.3105 // Japanese Journal of Applied Physics. – 1996. – Vol. 35, № 4. – P. 3105–3108.

104. Suslov, A. V. Acoustic Methods for Measuring the Thickness of Deposits on the Inner Wall of Pipelines / A. V. Suslov, E. E. Yaroslavkina. – DOI 10.17122/ngdelo-2023-5-132-144 // Oil and Gas Business. – 2023. – Vol. 21, № 5. – P. 132–144.

105. Tashakori, S. Contact and non-contact approaches in load monitoring applications using surface response to excitation method / S. Tashakori, A. Baghalian, M. Unal, H. Fekrmandi, V. Y. Şenyürek, D. McDaniel, I. N. Tansel. – DOI 10.1016/j.measurement.2016.04.013 // Measurement. – 2016. – Vol. 89. – P. 197–203.

106. **Tian, Y.** Early assessment method for damage to polyethylene pipes based on linear directional waves / **Y. Tian**, A. Palaev, A. Goluntsov, Z. Liu, M. Shao, B. Wang. // Mechanics of Advanced Materials and Structures. – 2025. – Vol. 33, No. 1. – Article 2456102. P. 1–21. – DOI 10.1080/15376494.2025.2456102

107. **Tian, Y.** Method for Early Damage Assessment of Pipes Based on Linear Guided Waves / **Y. Tian**, A. G. Palaev, F. Zhao // Proceedings of the 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElCon 2024, St. Petersburg, 29 - 30 January 2024. – Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024. – P. 685–688. – DOI: 10.1109/ElCon61730.2024.10468233.

108. **Tian, Y.** Non-destructive testing technology for corrosion wall thickness reduction defects in pipelines based on electromagnetic ultrasound / **Y. Tian, A. G. Palaev, I. A. Shammazov, Y. Ren** // *Frontiers in Earth Science*. – 2024. – Vol. 12. – Article 1432043. – 12 p. – DOI 10.3389/feart.2024.1432043

109. Troughton, M. On-site volumetric inspection of butt fusion and electrofusion joints in polyethylene pipes / M. Troughton, F. Hagglund // *Joining Plastics*. – 2016. – Vol. 10, № 1. – P. 48–55.

110. Ungureanu, C. Use of electric resistivity tomography (ERT) for detecting underground voids on highly anthropized urban construction sites / C. Ungureanu, A. Priceputu, A. L. Bugea, A. Chirică. – DOI 10.1016/j.proeng.2017.11.148 // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 209. – P. 202–209.

111. Uslu, B. Underground Utility Locating Technologies for Condition Assessment and Renewal Engineering of Water Pipeline Infrastructure Systems / B. Uslu, Y. J. Jung, S. K. Sinha. – DOI 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000221 // *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. – 2016. – Vol. 7, № 4. – Article 04016011.

112. Volosova, M. A. Electrical Discharge Machining Non-Conductive Ceramics: Combination of Materials / M. A. Volosova, A. A. Okunkova, S. V. Fedorov, K. Hamdy, M. A. Mikhailova. – DOI 10.3390/technologies8020032 // *Technologies*. – 2020. – Vol. 8, № 2. – Article 32.

113. Vyas, R. A Sequential RFID System for Robust Communication with Underground Carbon Steel Pipes in Oil and Gas Applications / R. Vyas, B. Tye. – DOI 10.3390/electronics8121374 // *Electronics*. – 2019. – Vol. 8, № 12. – Article 1374.

114. Wang, H. Automated Classification of Pipeline Defects from Ultrasonic Phased Array Total Focusing Method Imaging / H. Wang, Z. Fan, X. Chen, J. Cheng, W. Chen, Z. Wang, Y. Bu. – DOI 10.3390/en15218272 // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, № 21. – Article 8272.

115. Wang, L. Using low altitude thermal infrared remote sensing technique to detect the underground oil pipelines / L. Wang, Z. P. Wu, C. Chen [et al.] // *Science of Surveying and Mapping*. – 2018. – Vol. 43, № 3. – P. 142–147. – На кит. яз.

116. Wee, J. W. Modeling and application of discontinuous slow crack growth behaviors of high-density polyethylene pipe with various geometries and loading conditions / J. W. Wee, S. Y. Park, B. H. Choi. – DOI 10.1016/j.engfracmech.2020.107205 // Engineering Fracture Mechanics. – 2020. – Vol. 236. – Article 107205.

117. Wu, Y. Investigation of mechanical behavior of buried DN110 polyethylene pipe with a scratch defect under land subsidence / Y. Wu, X. You, S. Zha. – DOI 10.1016/j.engfailanal.2021.105371 // Engineering Failure Analysis. – 2021. – Vol. 125. – Article 105371.

118. Xiong, C. B. Integrated acoustic survey method for inspecting the unburied status of submarine pipeline / C. B. Xiong, Z. Li, X. Sun [et al.] // Journal of Hohai University (Natural Sciences). – 2017. – Vol. 45, № 5. – P. 425–431. – На кит. яз.

119. Xu, C. Research on buried non-metallic pipe detection technology based on sound wave propagation characteristics / C. Xu. – Huainan : Anhui University of Science and Technology, 2019. – На кит. яз.

120. Zang, X. Ultrasonic guided wave techniques and applications in pipeline defect detection: a review / X. Zang, Z.-D. Xu, H. Lu, C. Zhu, Z. Zhang. – DOI 10.1016/j.ijpvp.2023.105033 // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2023. – Vol. 206. – Article 105033.

121. Zhang, J. A Review of Passive RFID Tag Antenna-Based Sensors and Systems for Structural Health Monitoring Applications / J. Zhang, G. Y. Tian, A. M. J. Marindra, A. I. Sunny, A. B. Zhao. – DOI 10.3390/s17020265 // Sensors. – 2017. – Vol. 17, № 2. – Article 265.

122. Zhang, W. Application of high density resistivity method to detecting urban underground water pipelines / W. Zhang, H. Y. Xiao, Z. C. Zhong // Geotechnical Investigation & Surveying. – 2009. – Vol. 37, № 7. – P. 91–94. – На кит. яз.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Устройство автоматизированного ультразвукового обнаружения дефектов на поверхности трубопроводов



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт внедрения результатов диссертационной работы



胜利油田高原石油工程技术有限公司
Shengli Highland Oilfield Services Co., Ltd

Tel: 0546-8376988, URL: www.highlandservices.cn,
Email: zbmjj@chinahighland.com or lpmajj@163.com
Tax Number: 370502672212639, Account: 242919277890,
Add: No. 28 Fuqian Avenue, Dongying District, Dongying City
SWIFT NO.: BKCHCNBJ500

批准:

委员会主任:

马建军

日期: 2026 年 03 月 19 日

关于副博士学位论文研究成果应用的证明

田一钊

学科专业: 2.8.5. “输油管道、天然气管道、基地及储罐的建设与运营”
攻读技术科学副博士学位

委员会成员包括:

主席: 总工程师谢莫华

委员会成员: 工程师徐瑞明、工程师王建东。

共同特此出具本证明文件, 确认在“胜利高原油田服务有限公司”开展科研工作期间, 已完成题为《基于线性定向波技术的聚乙烯管道损伤早期评估方法选择论证》的学位论文研究项目。具体研究内容包括:

1. 基于软件系统的缺陷波响应分析系统, 以及配套的聚乙烯管道损伤早期评估软硬件集成方案。
2. 用于精确模拟线性定向波与缺陷相互作用时 S 矩阵的散射波方向数最小化方法。应用上述学位论文研究成果, 可有效提升中俄聚乙烯输气管道系统的运行可靠性。

委员会主席:

谢莫华

谢莫华

委员会成员:

徐瑞明

徐瑞明

王建东

王建东

2026 年 03 月 19 日





胜利油田高原石油工程技术服务有限公司
Shengli Highland Oilfield Services Co., Ltd

Tel: 0546-8376988, URL: www.highlandservices.cn,
Email: zbmjj@chinahighland.com or lpmajj@163.com
Tax Number: 370502672212639, Account: 242919277890,
Add: No. 28 Fuqian Avenue, Dongying District, Dongying City
SWIFT NO.: BKCHCNBJ500

Утверждаю

Генеральный директор:

Ма Цзяньцзюнь /подпись/

Дата 19.03.2026 г.

АКТ

о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертации Тянь Ифань

на тему: «Обоснование выбора метода ранней оценки повреждений полиэтиленовых труб на основе линейных направленных волн»,
по научной специальности 2.8.5. «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ»

Комиссия в составе:

Председатель: главный инженер Се Мохуа

Члены комиссии: инженер Сюй Жуймин, инженер Ван Цзяньдун.

Составлен настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Обоснование выбора метода ранней оценки повреждений полиэтиленовых труб на основе линейных направленных волн», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы компанией «Шэнли Хайленд Оилфилд Сервисес Компани Лимитед» для обнаружения дефектов в стенке полиэтиленовых труб.

1. Диссертационные исследования, принятые к внедрению, подкреплены данными, полученными в ходе натурных экспериментов – исследований по выявлению дефектов малых размеров в полиэтиленовых трубопроводах.

2. Работа используется для точного моделирования метода минимизации числа направлений рассеянных волн S-матрицы, когда линейно направленная волна взаимодействует с дефектом.

Применение результатов исследований, изложенных в вышеупомянутой диссертации, может эффективно повысить эксплуатационную надежность китайско-российской системы полиэтиленовых газопроводов.

Председатель комиссии: /подпись/ Се Мохуа

Члены комиссии: /подпись/ Сюй Жуймин

/подпись/ Ван Цзяньдун

19.03.2026 г.

Печать: /Шэнли Хайленд Оилфилд Сервисес Компани Лимитед * Печать для контрактов * 3705010015938/

Российская Федерация

Санкт-Петербург

Двадцать первого мая две тысячи двадцать шестого года

Я, Бурчалкин Максим Львович, нотариус нотариального округа Санкт-Петербург, свидетельствую подлинность подписи переводчика Гулиевой Айиды Намиговны.

Подпись сделана в моем присутствии.

Личность подписавшего документ установлена.

Зарегистрировано в реестре: № 78/356-н/78-2026-н-31/26

Уплачено за совершение нотариального действия: 800 руб. 00 коп.



М.Л. Бурчалкин



Итого в настоящем документе

Прошито и скреплено печатью

3 (три) листа

НОТАРИУС:

Я, дипломированный переводчик Гулиева Айида Намиговна, владеющая китайским и русским языками, подтверждаю, что выполненный мною перевод приложенного документа является правильным, точным и полным.

Переводчик

Гулиева Айида Намиговна